

平成19年度卒業論文

RIBFにおける不安定核反応測定
のための高効率中性子検出器の開発



田中 佳奈

指導教官 中村 隆司

学籍番号 : 04-16108

東京工業大学 理学部 物理学科

2008年2月27日

概要

不安定核ビーム生成施設の登場により、これまで未知であった、安定線より大きく離れた中性子過剰な核についての新たな研究が飛躍的に進みつつある。特に中性子を過剰に含む中性子ドリップライン上の原子核は、束縛エネルギーや核密度の低下に起因すると考えられる中性子ハロー核・スキン核、shell 構造の変化、二中性子相関などの特異な原子核構造が見い出され、研究対象として注目されている。

こうした不安定核ビーム生成施設の一つ Radio Isotope Beam Factory(RIBF) は 2007 年に理化学研究所で稼働を始め、ウランまでの全元素にわたって、不安定核ビームを高エネルギー、大強度で発生させることができるようになった。

これらの施設での実験において必要不可欠となるのは、高エネルギーの中性子を高効率で検出することのできる大型の中性子検出器である。本卒業研究では、今後 RIBF で実際に用いられる中性子検出器 NEBULA の製作に向けて、計算コード DEMONS を用いて、中性子検出器に関するシミュレーションを行った。中性子検出器の厚さや中性子の入射エネルギーに対する検出効率の依存性、中性子検出器の形状・厚さに対する時間・位置分解能の依存性を求め、その結果を考察する。

目次

| | | |
|-----|----------------------------|----|
| 第1章 | 序 | 1 |
| 1.1 | RIBFにおける不安定核ビーム発生能力 | 2 |
| 第2章 | 中性子検出器開発の目的 | 4 |
| 2.1 | 中性子過剰核の分解反応と不変質量法 | 4 |
| 第3章 | RIBFにおける中性子検出器の概要 | 7 |
| 第4章 | シミュレーション方法 | 10 |
| 4.1 | プラスチックシンチレータによる中性子の検出方法の原理 | 10 |
| 4.2 | イベントの種類と検出効率 | 11 |
| 4.3 | シミュレーション条件 | 13 |
| 4.4 | 位置分解能 | 15 |
| 4.5 | 時間分解能 | 15 |
| 4.6 | 速度、運動量、運動エネルギー分解能 | 17 |
| 第5章 | シミュレーション結果と考察 | 18 |
| 5.1 | 検出効率の厚さ依存性 | 18 |
| 5.2 | 検出効率のエネルギー依存性 | 22 |
| 5.3 | 検出効率のスレッシュホールド依存性 | 25 |
| 5.4 | シンチレータの形状と分解能 | 28 |
| 5.5 | 中性子検出器の厚さと分解能 | 33 |
| 第6章 | まとめと今後の展望 | 39 |
| 第7章 | 付録 | 40 |
| 7.1 | 中性子検出に關与する反応と粒子 | 40 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | RIBFの概形 | 1 |
| 1.2 | 不安定核ビームの発生能力 | 2 |
| 1.3 | 研究可能範囲を表した核図表 | 3 |
| 2.1 | γ 線分光学と不変質量法および E_{rel} 、 S_{2n} 、 E_x の関係 | 4 |
| 2.2 | 不変質量法を用いた実験の例： ^{14}Be の非弾性散乱 | 5 |
| 3.1 | 実験装置のアップグレード | 8 |
| 3.2 | 中性子検出器 NEBULA の概形 | 9 |
| 4.1 | 中性子の運動エネルギーと各反応断面積の関係 | 11 |
| 4.2 | シミュレーションを行ったジオメトリー | 14 |
| 4.3 | 位置分解能の求め方 | 16 |
| 5.1 | 検出効率の厚さ依存性 | 19 |
| 5.2 | 検出に關与する反応と粒子の種類厚さ依存性 | 20 |
| 5.3 | C/A の厚さ依存性 | 21 |
| 5.4 | 検出効率のエネルギー依存性 | 23 |
| 5.5 | 検出に關与する反応と粒子のエネルギー依存性 | 24 |
| 5.6 | C/A のエネルギー依存性 | 25 |
| 5.7 | 検出効率のスレッシュホールド依存性 | 26 |
| 5.8 | 検出に關与する反応と粒子のスレッシュホールド依存性 | 27 |
| 5.9 | C/A のスレッシュホールド依存性 | 28 |
| 5.10 | 位置・時間分解能 | 29 |
| 5.11 | 速度、運動エネルギー、運動量分解能 | 30 |
| 5.12 | 1~8面のy方向の位置分解能 | 34 |
| 5.13 | 1~8面の時間分解能 | 35 |
| 5.14 | Veto 前面からの水平距離 z と位置・時間分解能の σ の値の関係 | 38 |
| 7.1 | eventA,B,Cにおける反応と放出粒子とイベント数の関係 | 41 |

表目次

| | | |
|------|--|----|
| 4.1 | 中性子検出のための主な反応と粒子の種類 | 10 |
| 4.2 | 本論文中で扱うイベントの種類と分類 | 13 |
| 4.3 | シミュレーション条件 | 14 |
| 5.1 | 厚さ依存性におけるシミュレーション条件 | 18 |
| 5.2 | エネルギー依存性におけるシミュレーション条件 | 22 |
| 5.3 | スレッシュホールド依存性におけるシミュレーション条件 | 25 |
| 5.4 | 分解能を求める際のシミュレーション条件 | 28 |
| 5.5 | 中性子検出器の形状による効率、位置、時間分解能の σ の値の違い (eventC) | 31 |
| 5.6 | 中性子検出器の形状による速度、運動量、エネルギー分解能の σ の値の 違い (eventC) | 31 |
| 5.7 | 中性子検出器の形状による効率、位置、時間分解能の σ の値の違い (eventB) | 32 |
| 5.8 | 中性子検出器の形状による速度、運動量、エネルギー分解能の σ の値の 違い (eventB) | 32 |
| 5.9 | Veto 前面からの水平距離 z と位置・時間分解能の σ の値 (case1,4) | 36 |
| 5.10 | Veto 前面からの水平距離 z と位置・時間分解能の σ の値 (case2,3) | 37 |

第1章 序

不安定核ビーム生成施設の登場により、これまで未知であった、安定線より大きく離れた中性子過剰な核についての新たな研究が飛躍的に進みつつある。特に中性子を過剰に含む中性子ドリップライン上の原子核は、束縛エネルギーや核密度の低下に起因すると考えられる中性子ハロー核・スキン核、shell 構造の変化、二中性子相関などの特異な原子核構造が見い出され、研究対象として注目されている。

こうした不安定核ビーム生成施設の一つに、2007年に理化学研究所で稼働を始めた Radio Isotope Beam Factory (RIBF) がある。RIBF は従来の施設に新たに3つのサイクロトロン (リングサイクロトロン fRC、IRC、および超伝導サイクロトロン SRC) と超伝導不安定核ビーム生成分離装置 (BigRIPS) を加えた施設である。その概形を図 1.1 に示す。

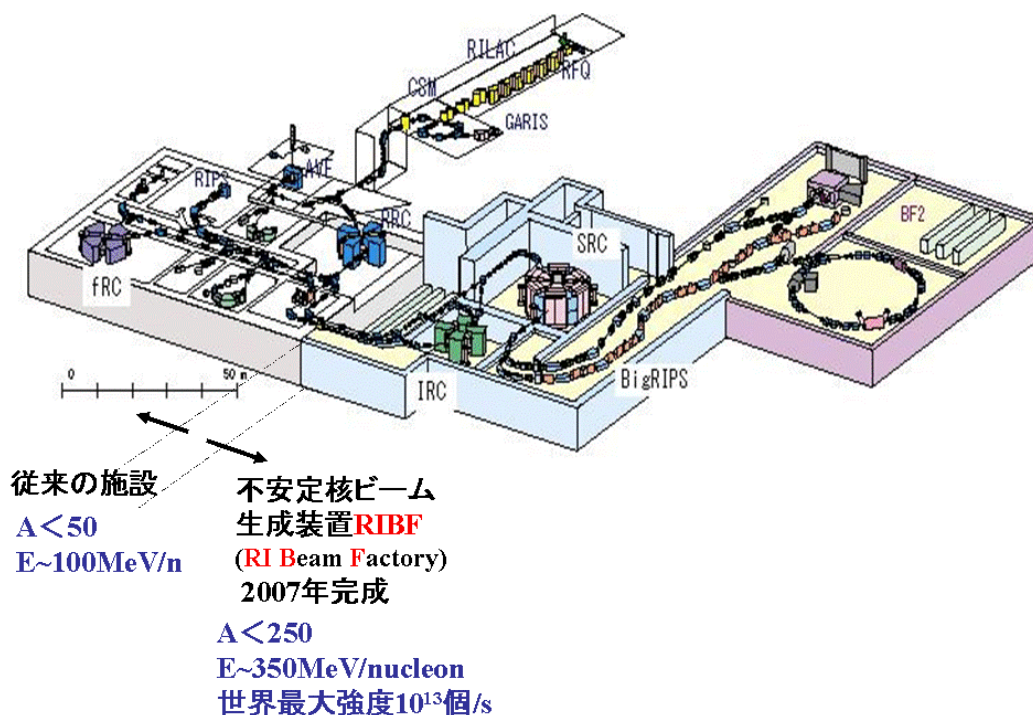


図 1.1: RIBF の概形。新施設 RIBF は従来の施設に新たに3つのサイクロトロン (リングサイクロトロン fRC、IRC、および超伝導サイクロトロン SRC) と超伝導不安定核ビーム生成分離装置 (BigRIPS) を加えた施設である。

1.1 RIBF における不安定核ビーム発生能力

RIBF を用いることで、不安定核ビーム発生能力が飛躍的に高まると期待されている。

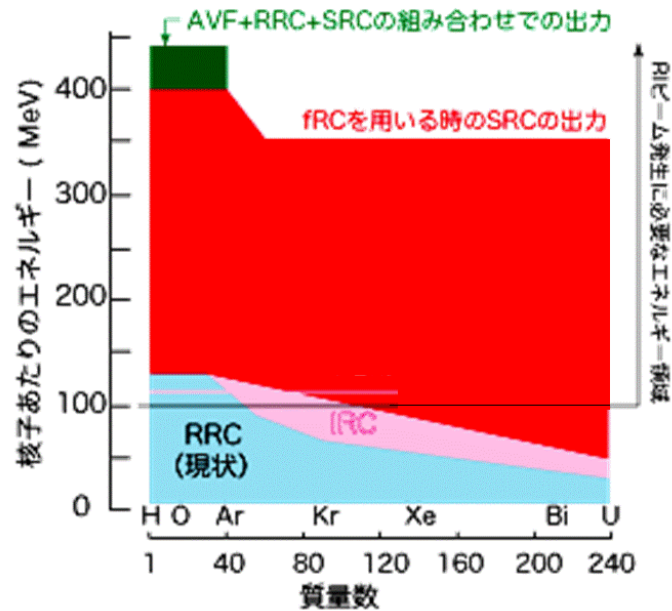


図 1.2: 不安定核ビームの発生能力。水色の範囲は従来の施設、ピンク・赤・緑の範囲は新施設 RIBF を用いることにより発生可能な不安定核ビーム。

図 1.2 は従来の施設と新施設において発生させることのできる不安定核ビームの質量数と 1 核子あたりのエネルギーの関係を示している。従来の施設では、1 核子あたり 100MeV のエネルギーで発生し得る不安定核ビームは、質量数 50 以下に限られていた (図 1.2 の水色の範囲) が、新施設 RIBF を用いることにより、ウランまでの全元素にわたって 1 核子あたり 350MeV 程度のエネルギーで、またその強度も従来の 100 ~ 1000 倍にあたる世界最大強度 10^{13} 個/s で発生させることができるようになった。このような飛躍的なビームの高エネルギー化と大強度化により、これまで実現できなかった、新しい種類の不安定核ビームを利用した実験が可能になると考えられている。

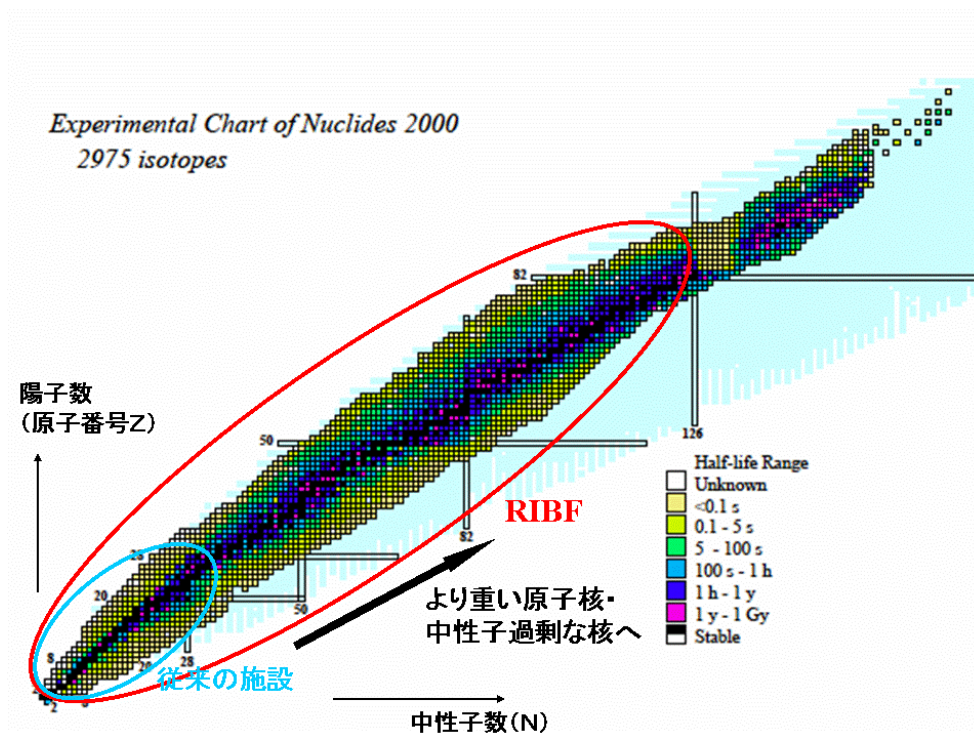


図 1.3: 従来の施設と新施設 RIBF における研究可能範囲を表した核図表。不安定核ビームの発生能力の向上により、新施設 RIBF では質量数 250 のウランまで研究可能になると期待されている。

図 1.3 は従来の施設と新施設 RIBF における、研究可能範囲を示した核図表である。従来の施設では質量数 50 までの軽い元素のみに限られていた研究だが、新施設 RIBF を用いることで、質量数 250 のウランまでのより重い原子核・中性子過剰な原子核の研究が飛躍的に進むと期待されている。

特に我々が注目しているのは、中性子を過剰に含む中性子ドリップライン上の原子核である。これらの極限状態では束縛エネルギーや核密度の低下に起因すると考えられる中性子ハロー核・スキン核、shell 構造の変化、二中性子相関、ソフト励起、集団運動などの特異な原子核構造が見い出される。また、鉄より重い元素合成過程 r-process は、超新星爆発の際にドリップラインに沿って進んだと予想されており、ドリップライン上の原子核は、研究対象として興味を持たれている。

第2章 中性子検出器開発の目的

2.1 中性子過剰核の分解反応と不変質量法

中性子ドリップライン上の原子核の特異な原子核構造を理解・研究する上で重要となるのは、中性子ドリップライン上の原子核の非束縛な励起準位を特定することである。ここでは、安定核における励起準位と不安定核の非束縛準位を特定する方法について述べる。

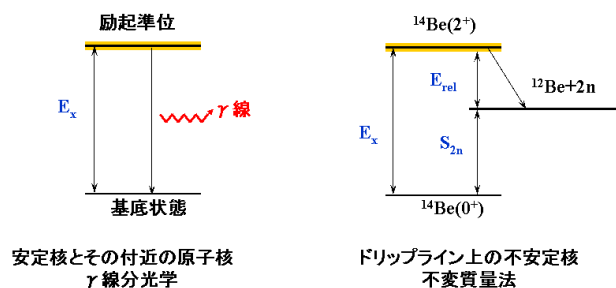


図 2.1: γ 線分光学 (左) と不変質量法 (右) および E_{rel} 、 S_{2n} 、 E_x の関係。不安定核の非束縛準位を特定する方法としては、放出粒子の運動量を測定することによる「不変質量法」が有効である。

安定核とその付近の原子核においては、励起準位の特定方法として「 γ 線分光学」が用いられる。これは、図 2.1 左のように原子核が励起準位から基底状態に落ちるときに放出される γ 線を測定し、そのエネルギースペクトルから励起準位を特定する方法である。これは、中性子の束縛エネルギーが大きいために有効な方法である。

一方、中性子ドリップライン上の原子核は中性子と弱く結合している、すなわち中性子の束縛エネルギーが小さいため、非束縛準位に励起した原子核は基底状態に落ちることがなく、図 2.1 右のように中性子を含むいくつかの粒子に崩壊する。このように励起準位から基底状態に落ちる際の γ 線を測定できない不安定核では、非束縛準位を特定する方法として放出粒子の運動量を測定することによる「不変質量法」が有効である。

例として近年我々の研究室・杉本氏らが行った ^{14}Be の非弾性散乱を示す [1]。図 2.2 は

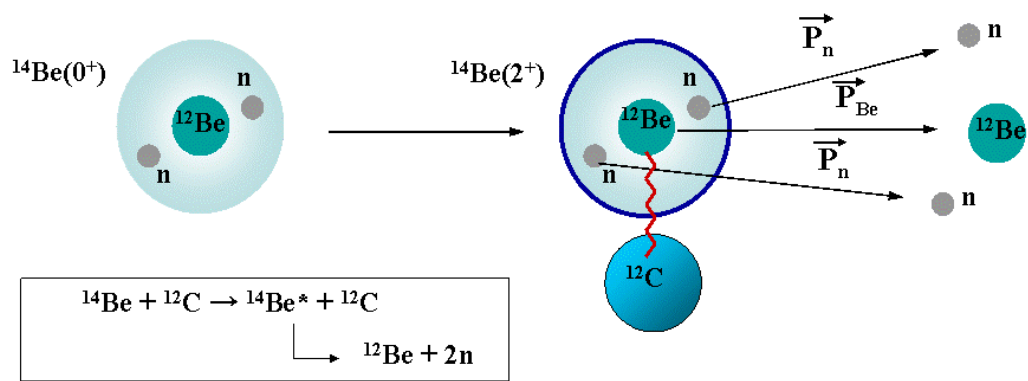


図 2.2: 不変質量法を用いた実験の例： ^{14}Be の非弾性散乱

実験で用いた反応、崩壊の様子を模式的に表したものである。陽子数 4、中性子数 10 のドリップライン上の中性子過剰な不安定核 ^{14}Be は、 ^{12}Be のまわりを 2 つの中性子が広がって分布した二中性子ハロー核と呼ばれる形を形成している。不安定核ビームとして生成された ^{14}Be は炭素などの原子核に衝突すると、核力による強い相互作用によってエネルギーの高い準位に励起する。2 つの中性子は非常に弱く結合しているため、励起した ^{14}Be は 2 つの中性子と残りの核に崩壊する。

実験ではこの放出粒子の運動量ベクトル $P_{^{14}\text{Be}}, P_n, P_n$ を各イベントごとに測定することで、崩壊の前後で不変な質量 M を求める。

$$\text{不変質量 } M = \sqrt{(E_{^{12}\text{Be}} + E_n + E_n)^2 - (P_{^{12}\text{Be}} + P_n + P_n)^2} \quad (2.1)$$

不変質量 M と静止質量の差から不安定核の励起準位の相対エネルギー E_{rel}

$$E_{rel} = M - (M_{^{12}\text{Be}} + M_n + M_n) \quad (2.2)$$

および、相対エネルギー E_{rel} と中性子分離エネルギー S_{2n} から励起エネルギー E_x

$$E_x = E_{rel} + S_{2n} \quad (2.3)$$

を求めることができる(図 2.1 右を参照)。杉本氏らの実験では、既知の値である $S_{2n}=1.26(13)[\text{MeV}]$ と実験によって求めた $E_{rel}=0.3[\text{MeV}]$ により ^{14}Be の 2^+ 状態の励起エネルギーが $E_x=1.54(13)[\text{MeV}]$ と求まった。

以上のように、崩壊して放出されたすべての粒子の質量が既知の場合、励起状態から崩壊して出てくる粒子の運動量 P を測定することで、励起準位を求めることができる。不変質量法を用いた実験を行う際に重要となるのは、放出粒子を高効率で検出する検出器である。本卒業論文では、特に中性子を検出するための中性子検出器について述べる。

第3章 RIBFにおける中性子検出器の概要

新施設 RIBF では不安定核ビームの高エネルギー化 (1.1 節参照) に伴い、中性子過剰核の分解反応により放出される粒子のエネルギーも大幅に高くなる (従来の施設では 30 ~ 100MeV 程度、新施設 RIBF では 100 ~ 500MeV 程度) と予想される。新施設 RIBF において不変質量法によって、これまで未知であったより重い原子核・中性子過剰な原子核の非束縛準位の特定を行うためには、高エネルギーの放出粒子を高効率で検出する検出器が必要不可欠である。そこで理化学研究所では実験装置をアップグレードさせる計画が進められている。

図 3.1 は従来の施設と新施設 RIBF での放出粒子を検出するための実験装置を、同じ縮尺で上から見た図である。入射した不安定核ビームは標的と衝突すると、分解反応によって、いくつかの粒子に崩壊する。放出された粒子はスペクトロメータ (RIBF では 'SAMURAI' と呼ばれる) によって磁気的に電荷を持つ荷電粒子と電荷を持たない中性子に分離される。中性子は中性子検出器 (RIBF では 'NEBULA' と呼ばれる) によって検出される。

RIBF では高エネルギーで重い原子核の実験に対応するため、検出器の検出効率・アクセプタンス・質量分解能の向上を目指している。

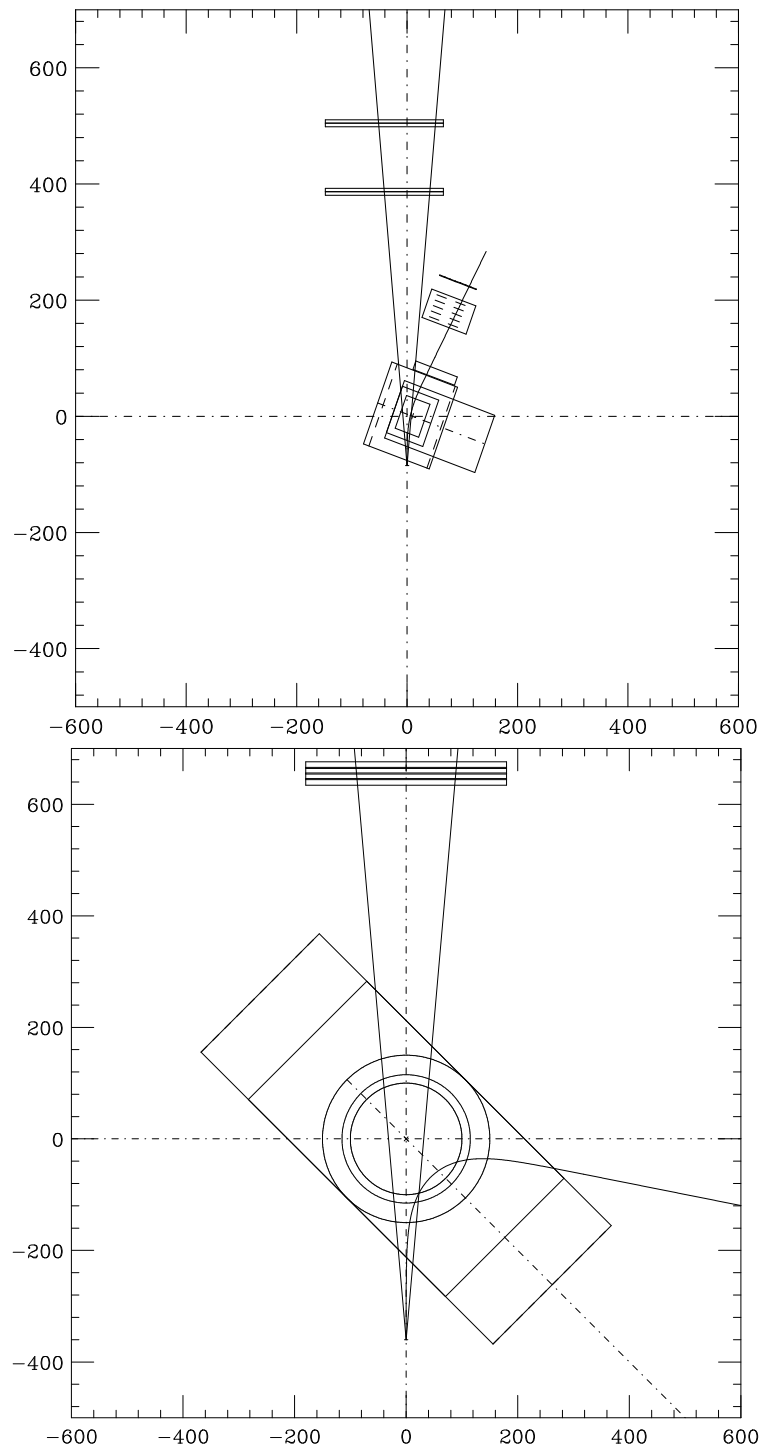


図 3.1: 従来の施設と新施設 RIBF での実験装置 (俯瞰図)。分解反応によって放出された粒子はスペクトロメータで荷電粒子と中性子に分離される。中性子はその後方に位置する中性子検出器によって検出される。RIBF では不安定核の高エネルギー化に伴い、実験装置をアップグレードさせる計画が進められている。

中性子検出器 NEBULA (NEutron-detection system for Breakup of Unstable-Nuclei with Large Acceptance) は、不安定核の分解反応によって放出された中性子を検出するための検出器である。NEBULA の詳細な構成は計画中であるが、図 3.2 に示すように、荷電粒子を排除するための Veto カウンターと 8 面の中性子検出器から成るものとして考案されている。各面の中性子検出器は約 30 本の両読みのプラスチックシンチレータから成る (プラスチックシンチレータによる中性子の検出方法などの詳細は 4.1 節において述べる)。

以下は中性子検出器 NEBULA の特徴と目標値である。

- ・ 高効率：従来の 20% → 70%
- ・ 大きなアクセプタンス：水平方向に $\pm 10^\circ$
- ・ 同時に放出される複数個の中性子 (multi-neutron coincidence events) の検出効率の向上 (例えば 2n の場合 $(20\%)^2 = 4\%$ $(70\%)^2 = 49\%$)
- ・ 不変質量分解能：従来の水準またはそれ以上 (相対エネルギー 1MeV で 200keV)
- ・ 精細化されたシンチレータによる位置分解能の向上

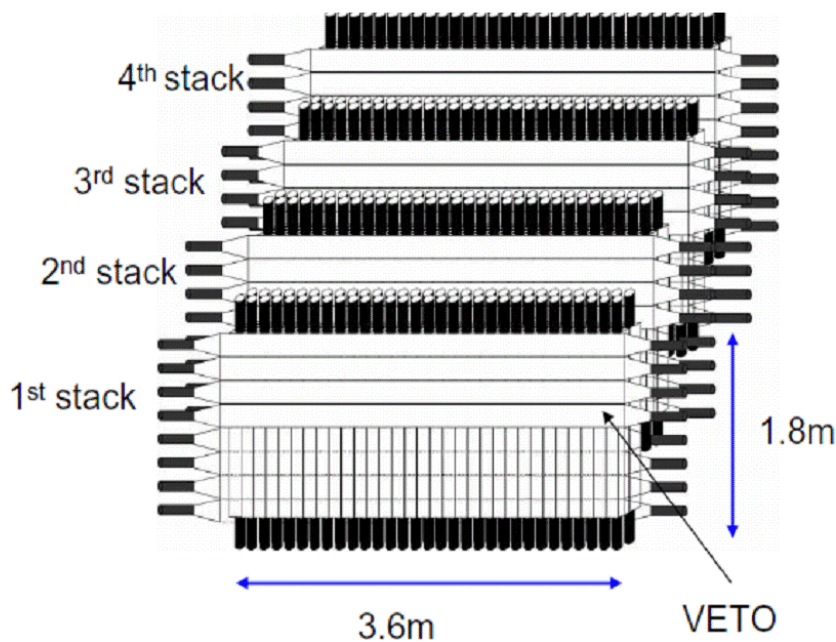


図 3.2: 中性子検出器 NEBULA の概形。荷電粒子を排除するための Veto カウンターと複数面の中性子検出器から成る。

本卒業研究では、今後 RIBF で実際に用いられる中性子検出器 NEBULA の製作に向けて、計算コード DEMONS[2] を用いて、中性子検出器に関するシミュレーションを行った。特に中性子検出器の厚さや中性子の入射エネルギーに対する検出効率の依存性、シンチレータの形状・厚さに対する時間・位置分解能、エネルギー分解能の依存性を求め、その結果を考察する。

第4章 シミュレーション方法

4.1 プラスチックシンチレータによる中性子の検出方法の原理

中性子はそれ自身に電荷がないため、陽子などの荷電粒子のように電磁相互作用を用いた直接的な検出を行うことはできない。そのため、強い相互作用によって生じた2次的な荷電粒子を検出する間接的な検出方法がとられる。ここでは中性子過剰核の分解反応で生じる中性子の検出として有用なプラスチック検出器について述べる。

RIBFでは中性子検出器として、蛍光減衰時間が短く、軽い粒子に対して蛍光効率が良い、プラスチックシンチレータを用いる予定である。入射中性子は、強い相互作用によってプラスチックの構成元素である炭素や水素と様々な反応をする。中性子との反応で生じた荷電粒子は、シンチレータを通過する際にエネルギー的に許される限り、電磁相互作用を繰り返して、運動エネルギーを損失する。失われた運動エネルギーの一部が、物質中の分子内電子(主に π 電子)を励起し、励起エネルギーの一部が蛍光エネルギーに変換される。

表 4.1 は計算コード DEMONS で想定している中性子の検出に關与する主な反応と荷電粒子である。便宜上、各反応と荷電粒子に反応番号と粒子番号をつけることにする。

| 反応番号 | 反応 | 粒子番号 | 荷電粒子 |
|------|---|-------|-----------------|
| | | par0 | γ 線 |
| | | par1 | n(検出できない) |
| int1 | n+p n+p | par2 | p |
| int2 | n+ ¹² C n+ ¹² C+ γ (非弾性散乱)(γ 線の検出) | par3 | ¹² C |
| int3 | n+ ¹² C n+ ¹² C (弾性散乱) | par4 | α |
| int4 | n+ ¹² C n+ ¹² C+ γ (非弾性散乱)(¹² Cによる中性子の検出) | par5 | ⁹ Be |
| int5 | n+ ¹² C α + ⁹ Be | | |
| int6 | n+ ¹² C n+3 α | | |
| int7 | n+ ¹² C n+p+ ¹¹ B または n+n+ ¹¹ C または p+ ¹² B | par7 | ¹¹ B |
| | | par9 | ¹¹ C |
| | | par10 | ¹² B |

表 4.1: 計算コード DEMONS で想定している、中性子検出のための主な反応と粒子の種類

反応1番、反応3番は中性子と陽子、および中性子と炭素の弾性散乱による中性子の検出反応である。弾性散乱におけるエネルギー移行率は標的核となる荷電粒子の種類によって異なり、エネルギー保存則と運動量保存則から

$$\frac{E}{E_n} = 4 \cos^2 \theta \frac{M}{(1+M)^2} \quad (4.1)$$

と与えられる。ここで、Mは(標的核の質量)/(中性子の質量)、 E_n は入射中性子の運動エネルギー、Eは反跳核(陽子や炭素)の運動エネルギー、 θ は反跳核の散乱角である。質量が同程度の中性子和陽子との散乱の場合は、M=1であり、エネルギー移行率が高く、1回

の散乱で中性子のエネルギーの大部分が反跳核である陽子に移行する。特に $\theta=0^\circ$ の場合、入射中性子の運動エネルギーが全て陽子に移行するため、水素は最も有効な減速材と言える。一方、炭素などの重い原子核との散乱の場合は、 $M=12$ と大きくなり、エネルギー移行率が低くなる。

反応 2 番 ($n+^{12}\text{C} \rightarrow n+^{12}\text{C}+\gamma$) は、励起した ^{12}C が基底状態に落ちる時に放出される 4.43MeV の γ 線がシンチレータ中の電子とコンプトン散乱を起こした際に発せられる蛍光を捉える反応である。我々が知りたい中性子の情報とは無関係な反応であるため、解析を行う際にスレッシュホールドを設定して、反応 2 番を取り除く必要がある(詳細は 4.2 節において述べる)。反応 4 番 ($n+^{12}\text{C} \rightarrow n+^{12}\text{C}+\gamma$) は、荷電粒子 ^{12}C によって中性子を検出することのできる反応である。

反応 7 番は陽子または中性子のノックアウト反応であり、反応 $n+^{12}\text{C} \rightarrow n+n+^{11}\text{C}$ では、2 次的な中性子が放出される。この 2 次的な中性子は入射中性子と同様にプラスチックシンチレータの中で反応を起こす。我々が知りたいのは入射中性子の情報であるため、解析では入射中性子の 1 回目の反応のみを取り扱うことにする(詳細は 4.2 節において述べる)。

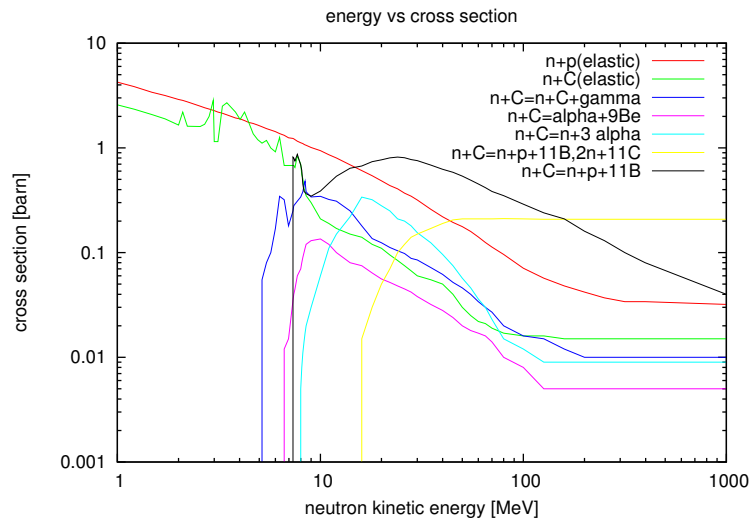


図 4.1: DEMONS で入力している中性子の運動エネルギーと各反応断面積の関係。中高エネルギー領域 (100MeV ~) の中性子検出のためには、反応 7 番 (陽子のノックアウト反応) が重要である。

各反応の反応断面積は入射中性子の運動エネルギーによって変わる。図 4.1 は、DEMONS 内で用いている中性子の運動エネルギーに対する各反応の反応断面積である。これは、実験結果を良く表した図であり、中高エネルギー領域 (100MeV ~) の中性子検出のためには、反応 7 番 (陽子のノックアウト反応) が重要であることがわかる。

4.2 イベントの種類と検出効率

入射した中性子は 1 回目の相互作用ですべてのエネルギーを荷電粒子に移行して検出される場合もあれば、何度も相互作用を起こして運動エネルギーを損失しながら、複数回検

出されることもある。そこで、本論文で取り扱うイベントの種類を分類を行っておく。

まず、シンチレータ中で起こる全てのイベントを eventA とする。eventA はシンチレータ中の蛍光が弱いため実験で検出することができないようなイベントも含んでおり、シミュレーションでのみ与えられる真の情報である。

次に、シンチレータ両端のフォトマルでの発光量がフォトマルのディスクリ (0.5[MeVee] 程度) を超えたイベントを eventB とする。ここで、左右のフォトマルの発光量 A_l, A_r [MeVee] は、シンチレータ内の真の発光量を A [MeVee]、シンチレータ中でヒットした位置からシンチレータ両端のフォトマルまでの距離を x_l, x_r [cm] とすると

$$A_l = A \exp\left(-\frac{x_l}{\lambda}\right) \quad (4.2)$$

$$A_r = A \exp\left(-\frac{x_r}{\lambda}\right) \quad (4.3)$$

と書ける。ただし λ は減衰長 [cm] であり、左右のフォトマルにたどり着くまでの光の減衰を示している。eventB は実験において検出されるイベントである。ディスクリはバックグラウンドを取り除くために用いられる。また、各入射中性子に対して、eventB が 1 回だけ検出されたものを 1n event、2 回検出されたものを 2n event、3 回以上検出されたものを multi event と呼ぶことにする。1 個の中性子を入射したにもかかわらず、2n event、multi event のような複数回検出されるイベントは、2 個の中性子を入射した場合の 2 中性子検出と区別がつかなくなる場合がある。この現象をクロストークといい、実験・解析を行う上で、区別する必要のある現象である。

最後に、シンチレータ内の真の発光量がスレッシュホールド (6[MeVee] 程度) を超えたイベントを eventC とする。ここで左右のフォトマルで検出される発光量の相乗平均は

$$\sqrt{A_r \times A_l} = A \exp\left(-\frac{W}{2\lambda}\right) \quad (4.4)$$

と表せる。ただし W はシンチレータの幅 $x_l + x_r$ [cm] である。したがって、観測される左右のフォトマルの発光量 A_l, A_r [MeVee] からシンチレータ内の真の発光量 A [MeVee] は

$$A = \sqrt{A_r \times A_l} \times \exp\left(\frac{W}{2\lambda}\right) \quad (4.5)$$

と表せる。eventC は中性子の情報を得るための解析を行うイベントである。スレッシュホールドは反応 2 番 ($n+^{12}\text{C} \rightarrow n+^{12}\text{C}+\gamma$) で放出される γ 線 (4.43MeV) による蛍光を排除するために用いられる。シンチレータ内の真の発光量 A [MeVee] がスレッシュホールドを超えた eventC の総数により検出効率を

$$\text{検出効率 (efficiency)} = \frac{\text{eventC として検出することのできた入射中性子の総数}}{\text{入射中性子の総数}} \quad (4.6)$$

と定義する。

以上をまとめたものが表 4.2 である。便宜上、本論文ではこのイベント名を使うことにする。また、反応 7 番 (中性子のノックアウト反応) による 2 次的な中性子のイベントを入射中性子のイベントと混同させないようにするため、解析では eventB、eventC の 1 回目の反応のみを扱うことにする。

| | |
|--------|---|
| eventA | シンチレータ中で起こる反応全て。 実験では観測できないシミュレーションでのみ与えられる情報。 |
| eventB | 実験的に検出されるイベント。 シンチレータ両端のフォトマルでの発光量がフォトマルのディスクリ (0.5[MeVee] 程度) を超えたイベント。 各入射中性子に対して、eventB が 1 回検出されるものを 1n event、 2 回検出されるものを 2n event、3 回以上検出されるものを multi event と呼ぶ。 |
| eventC | 解析的に取り扱うイベント。 シンチレータ内の発光量が γ 線 (4.43MeV) による発光を排除するために用いられる スレッシュホールド (6[MeVee] 程度) を超えたイベント。 eventC の総数により検出効率を決める。 |

表 4.2: 本論文中で取り扱うイベントの種類と分類

4.3 シミュレーション条件

シミュレーションは計算コード DEMONS [2] を用いて行った。シミュレーション条件・ジオメトリーを表 4.3、図 4.2 に示す。

中性子のビーム軸を z 方向とし、鉛直方向を x 方向、水平方向を y 方向とした。標的の位置は Veto カウンター中央から 1000cm 前方である。入射エネルギー T_0 [MeV]、半径 1.0[cm] のペンシルビームとして中性子を計 10^4 個の入射させた。中性子検出器は一つの大きさが厚さ D [cm] \times 高さ H [cm] \times 幅 W 180[cm] のプラスチックシンチレータを 1 面あたり、30 段重ねて、計 N 面の構成とした。Veto 両端、シンチレータ両端のディスクリはバックグラウンドを取り除くために用いられる。ここでは十分低い値として 0.500[MeVee] とした。また、荷電粒子を取り除くための Veto カウンター内の発光量のスレッシュホールドを 0.500[MeVee] とした。

以下のシミュレーションでは、検出効率が中性子検出器の面の数 N 、中性子の入射エネルギー T_0 [MeV]、シンチレータ内の発光量のスレッシュホールド thr [MeVee] によってどのように変化するかを見る。また、分解能がシンチレータの形状 (厚さ D [cm] \times 高さ H [cm])、および中性子検出器の面ごとに、どのように変化するかを見る。

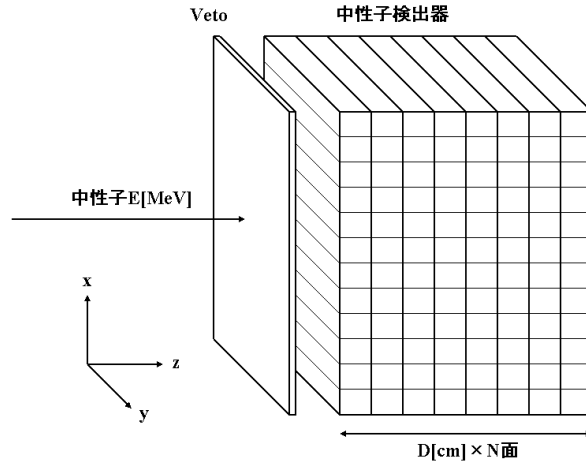


図 4.2: シミュレーションを行ったジオメトリ。一つの大きさが厚さ $D[\text{cm}]$ × 高さ $H[\text{cm}]$ × 幅 $W180[\text{cm}]$ のプラスチックシンチレータを 1 面あたり 30 段重ね、計 N 面の構成。

| | |
|-----------------------|---|
| x 方向 | 鉛直方向 |
| y 方向 | 水平方向 |
| z 方向 | ビーム軸 |
| 標的の位置 | Veto カウンター中央から 1000cm 前方 |
| ビーム | 10^4 個の半径 1.0[cm] のペンシルビーム |
| 中性子の入射エネルギー | $T_0[\text{MeV}]$ |
| 中性子検出器の形状 | 鉛直方向にシンチレータ 30 段 × N 面 |
| Veto 両端のディスクリ | 0.500[MeVee] |
| シンチレータ両端のディスクリ | 0.500[MeVee] |
| Veto 内の発光量のスレッシュホールド | 0.500[MeVee] |
| シンチレータ内の発光量のスレッシュホールド | thr[MeVee] |
| シンチレータ一つの大きさ | 厚さ $D[\text{cm}]$ × 高さ $H[\text{cm}]$ × 幅 $W180[\text{cm}]$ |
| 減衰長 | $\lambda = 200[\text{cm}]$ |
| シンチレータ中の光の速度 | $v_s = 13.929[\text{cm}]$ |

表 4.3: シミュレーション条件。以下のシミュレーションでは中性子検出器の面の数 N 、中性子の入射エネルギー $T_0[\text{MeV}]$ 、シンチレータ内の発光量のスレッシュホールド thr[MeVee]、シンチレータ一つの厚さ $D[\text{cm}]$ × 高さ $H[\text{cm}]$ を様々に変化させた。

4.4 位置分解能

ここでは位置分解能の求め方を述べる。座標の原点は Veto 前面の中央とする。

まず、実験値 ($x_{obs}, y_{obs}, z_{obs}$) の定め方について述べる。実験で知ることのできる中性子の情報は、1 回ごとの eventB に対して検出された面、セル、標的から左右のフォトマルにたどり着いた時刻 (T_l および T_r)、フォトマルの両端での発光量 (A_l および A_r) である。 x_{obs}, z_{obs} については、それぞれセル・面における座標と、シンチレータ一つの高さ H ・厚さ D の幅を持つ一様乱数をふるることにより

$$x_{obs} = (\text{検出されたセルの中心の } x \text{ 座標}) + (\text{高さ } H \text{ の幅を持つ一様乱数}) \quad (4.7)$$

$$z_{obs} = (\text{検出された面の中心の } z \text{ 座標}) + (\text{厚さ } D \text{ の幅を持つ一様乱数}) \quad (4.8)$$

と求めた。 y_{obs} は時刻 T_l, T_r , シンチレータ内の光の速度 v_s [cm/ns] より

$$y_{obs} = \frac{T_l - T_r}{2} \times v_s \quad (4.9)$$

と求めた。

次に基準値となる (x_0, y_0, z_0) の定め方を示す。図 4.3 のように、中性子が検出された面の中心の z 座標を基準値 $z = z_0$ とする。

$$z_0 = (\text{検出された面の中心の } z \text{ 座標}) \quad (4.10)$$

またペンシルビームの場合、標的の座標を (x_i, y_i, z_i) とすると、

$$x_0 = x_i, \quad y_0 = y_i \quad (4.11)$$

である。

以上より、位置分解能を

$$dx = x_{obs} - x_0, \quad dy = y_{obs} - y_0, \quad dz = z_{obs} - z_0 \quad (4.12)$$

と求めた。

4.5 時間分解能

標的から左 (および右) のフォトマルで観測されるまでにかかる時間 T_l (および T_r) は、次式のように標的からシンチレータ中のヒットした位置までの真の時間 T_{true} 、Intrinsic な効果による不確定性 $\Delta T_{l_{int}}$ (および $\Delta T_{r_{int}}$)、transmission の効果による不確定性 ΔT_{tra} 、シンチレータ中のヒットした位置から左 (および右) のフォトマルまでの距離 x_l (および x_r) をシンチレータ中の光の速度 v_s [cm/ns] で走る時間 x_l/v_s (および x_r/v_s) を足し合わせることで決めている。

$$T_l = T_{true} + \Delta T_{tra} + \Delta T_{l_{int}} + \frac{x_l}{v_s} \quad (4.13)$$

$$T_r = T_{true} + \Delta T_{tra} + \Delta T_{r_{int}} + \frac{x_r}{v_s} \quad (4.14)$$

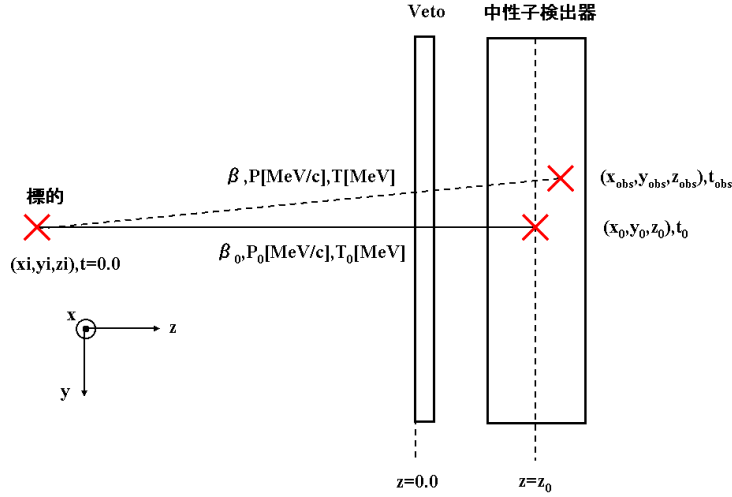


図 4.3: 位置分解能の求め方。中性子が検出された面の中心の座標により基準値 (x_0, y_0, z_0) を定め、検出されるセル、面、および左右のフォトマルにたどり着いた時刻 $(T_l$ および $T_r)$ から実験値 $(x_{obs}, y_{obs}, z_{obs})$ を決める。

Intrinsic な効果による不確定性はシンチレータ中を光が走る際の経路の不確定性やフォトマルで検出する際の情報処理の時間の不確定性による。transmission の効果はシンチレータの幅による。

計算コード DEMONS では transmission による不確定性のみ含まれていたため、Intrinsic な不確定性は、 $\mu=0.0[\text{ns}]$ 、 $\sigma=0.35[\text{ns}]$ の正規乱数をふった。

標的からシンチレータ中のヒットした位置までの時刻 t_{obs} は左右のフォトマルで観測される時刻 T_l, T_r から

$$t_{obs} = \frac{1}{2} \left(T_l + T_r - \frac{W}{v_s} \right) \quad (4.15)$$

と求めた。ただし、 v_s はシンチレータ内の光の速度 $[\text{cm/ns}]$ 、 W はシンチレータの幅 $x_l + x_r [\text{cm}]$ である。

基準値 t_0 はペンシルビームの場合、標的からヒットした面までの距離 $z_0 - z_i$ を、中性子が初速度 v_0 のまま飛行しているものとして

$$t_0 = \frac{z_0 - z_i}{v_0} \quad (4.16)$$

と求めた。ただし v_0 の求め方は 4.6 節において述べる。

以上より時間分解能を

$$dt = t_{obs} - t_0 \quad (4.17)$$

と求めた。

4.6 速度、運動量、運動エネルギー分解能

実験で観測される速度 β 、運動エネルギー T 、運動量 $P = (P_x, P_y, P_z)$ は標的 (x_i, y_i, z_i) からヒットした位置 $(x_{obs}, y_{obs}, z_{obs})$ までの距離 $l = \sqrt{(x_{obs} - x_i)^2 + (y_{obs} - y_i)^2 + (z_{obs} - z_i)^2}$ 、光速 c を用いて、以下のように求めた。

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{l}{c \times t_{obs}} \quad (4.18)$$

$$T = \frac{M_n}{\sqrt{1 - \beta^2}} - M_n \quad (4.19)$$

$$P = \sqrt{(T + M_n)^2 - M_n^2} \quad (4.20)$$

$$P_x = \frac{x_{obs} - x_i}{l} P, P_y = \frac{y_{obs} - y_i}{l} P, P_z = \frac{z_{obs} - z_i}{l} P \quad (4.21)$$

基準値となる中性子の初速度 v_0 、運動量 P_0 は入射運動エネルギー T_0 、中性子の質量 M_n より相対論的に

$$P_0 = \sqrt{(T_0 + M_n)^2 - M_n^2} \quad (4.22)$$

$$\beta_0 = \frac{v_0}{c} = \frac{\sqrt{(T_0 + M_n)^2 - M_n^2}}{T_0 + M_n} \quad (4.23)$$

と求めた。以上より、速度、運動量、運動エネルギー分解能を

$$d\beta = \beta - \beta_0 \quad (4.24)$$

$$d\vec{P} = (dP_x, dP_y, dP_z) = \vec{P} - \vec{P}_0 = (P_x, P_y, P_z - P_0) \quad (4.25)$$

$$dE = T - T_0 \quad (4.26)$$

と求めた。

第5章 シミュレーション結果と考察

この章ではシミュレーションを行った結果と考察を述べる。

5.1 節、5.2 節、5.3 節では次の3つの項目について厚さ依存性、エネルギー依存性、スレッシュホールド依存性を求めた。

- ・ 検出効率=(eventCとして検出することのできた入射中性子の総数)/(入射中性子の総数)、および 1n event、2n event、multi event の総数
- ・ 各入射中性子に対して1回目の eventC の反応と粒子の種類
- ・ C/A：各入射中性子に対して1回目の eventC が eventA の何番目に相当するか

5.4 節、5.5 節では、中性子の形状および厚さに応じて、各入射中性子の1回目の eventB、1回目の eventC の位置、時間、速度、運動量、運動エネルギー分解能を求めた。

5.1 検出効率の厚さ依存性

| | |
|-----------------------|---|
| 中性子の入射エネルギー | $T_0=250[\text{MeV}]$ |
| 中性子検出器の形状 | 厚さ D12[cm] × 高さ H12[cm] × 幅 W180[cm]、30 段 N 面 |
| シンチレータ内の発光量のスレッシュホールド | thr=6.000[MeVee] |

表 5.1: 厚さ依存性におけるシミュレーション条件。面の数 N を様々に変化させた。

中性子の入射エネルギーを $T_0=250[\text{MeV}]$ 、中性子検出器の面の数 N を 1 から 20 まで増やしていった時の、検出効率の厚さ依存性を図 5.1 左のピンクの点で示す。ただし横軸は中性子検出器全体の厚さ (12[cm] × N 面) である。ペンシルビームの場合、面を増やし中性子検出器の厚さを厚くしていくと、検出効率が 100% に近づくことが確かめられた。特に、D=100[cm] 以上で検出効率 70% を実現できることがわかった。

また eventC として検出された各入射中性子のうち、eventB として1回だけ検出されたものを 1n event、2回検出されたものを 2n event、3回以上検出された multi event とする (詳細は 4.2 節参照) と、これらの総数はそれぞれ図 5.1 左の赤、緑、青の点となった。また、eventC として検出された入射中性子のうち、1n event の総数、2n event の総数、multi event の総数の割合

$$\frac{\text{1n event の総数}}{\text{eventC として検出された入射中性子の総数}} \quad (5.1)$$

$$\frac{\text{2n event の総数}}{\text{eventC として検出された入射中性子の総数}} \quad (5.2)$$

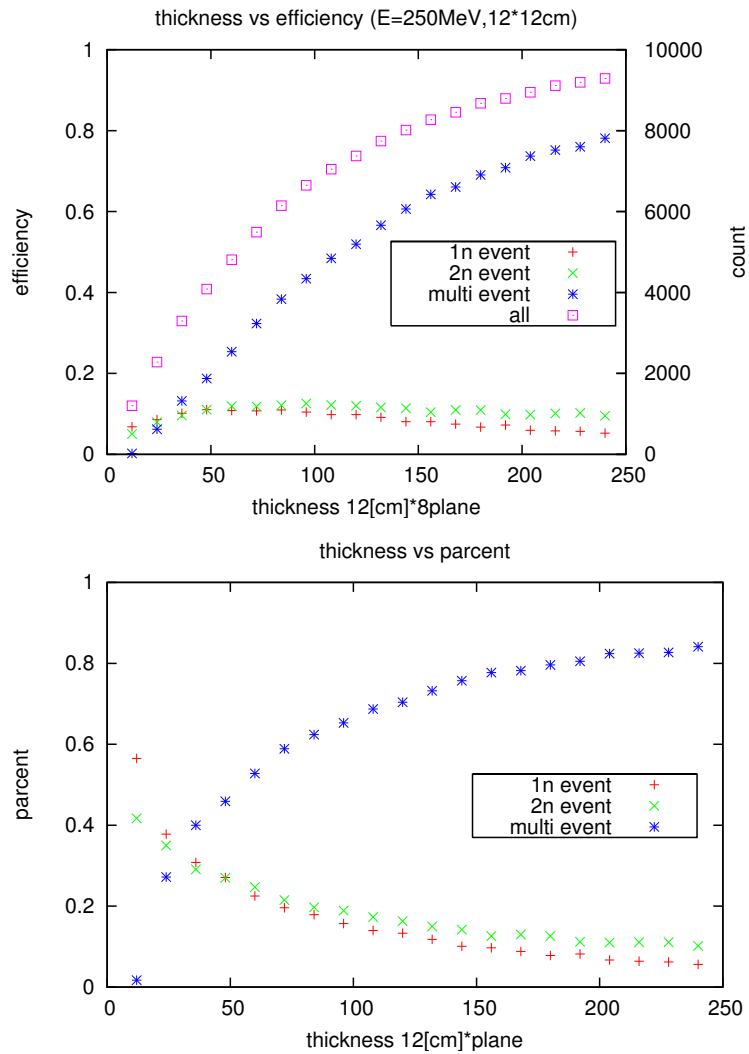


図 5.1: 左: 検出効率の厚さ依存性。横軸は中性子検出器全体の厚さ (12[cm] × N 面)。D=100[cm] 以上で検出効率 70 % を実現できる。右: eventC として検出された入射中性子に対する 1n event、2n event、multi event の割合。面の数を増やすと multi event が増えることがわかる。

multi event の総数

eventC として検出された入射中性子の総数

(5.3)

を求めると図 5.1 右となった。面の数を増やし中性子検出器を厚くすると、1n event や 2n event の割合は減少し、multi event の割合が増加することがわかる。12[cm] × 8面=96[cm] の場合、検出されるイベントの約 60% が multi event であるため、このような multi event によるクロストーク現象を区別する方法が重要な課題となる。

次に *eventC* として検出されたイベントのうち、1 回目のイベントを取り出した時の、中性子検出に關与する反応と粒子の種類の高さ依存性を図 5.2 に示す。中性子検出のためには、反応 7 番 ($n+^{12}\text{C} \rightarrow n+p+^{11}\text{B}$ または $n+n+^{11}\text{C}$ または $p+^{12}\text{B}$) すなわち陽子のノックアウト反応と、その時放出される陽子が重要なことがわかった。

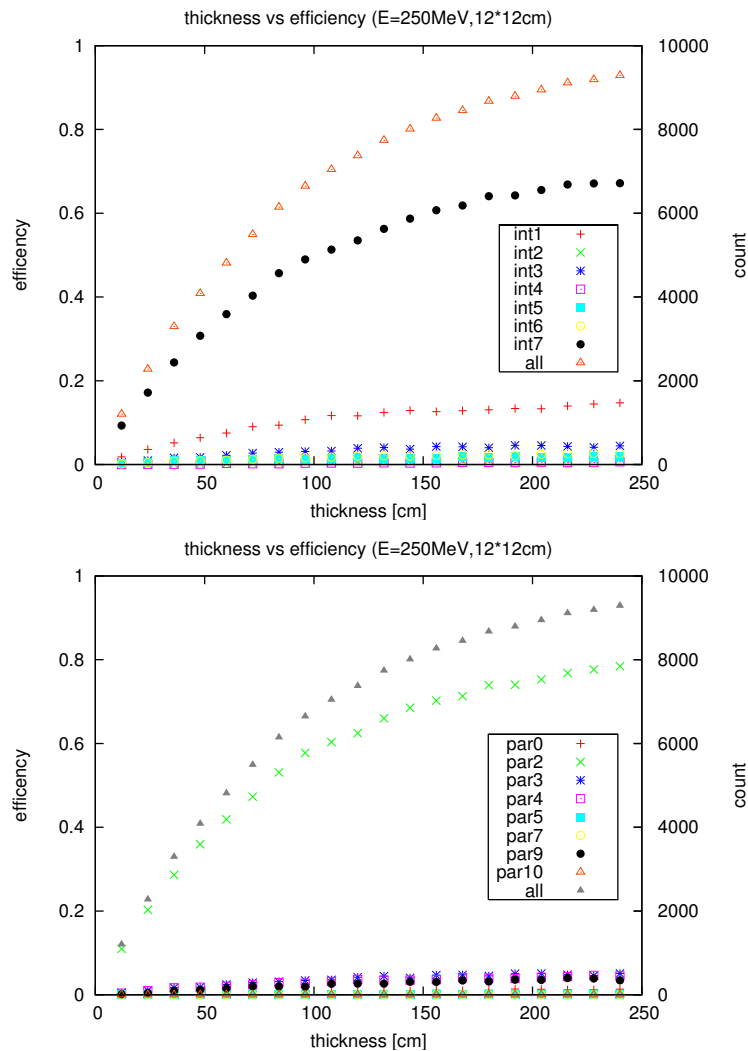


図 5.2: 検出に關与する反応 (左) と粒子 (右) の種類の厚さ依存性。中性子検出のためには反応 7 番 (陽子のノックアウト反応) と par2(陽子) が重要である。

次に C/A(各入射中性子に対して 1 回目の *eventC* が *eventA* の何番目に相当するか) の厚

さ依存性を図 5.3 に示す。ただし、 $C/A=1$ を 1st hit、 $C/A=2$ を 2nd hit、 $C/A=3$ 以上を ge 3rd hit と表記している。面を増やし中性子検出器の厚さが厚くなるにつれ、1st hit のイベントは一定になるが、その代わり増えてくるのは 2nd hit や ge 3rd hit のイベントである。これは、反応したにもかかわらず検出されない、すなわち微弱な蛍光しか出さない、エネルギー移行率の低い反応 3 番 (炭素との弾性散乱) に主に起因すると考えられる (詳細は 7.1 節で述べる)。このような 2nd hit、ge 3rd hit のイベントは分解能の低下を促すと考えられ、好ましいものではない。

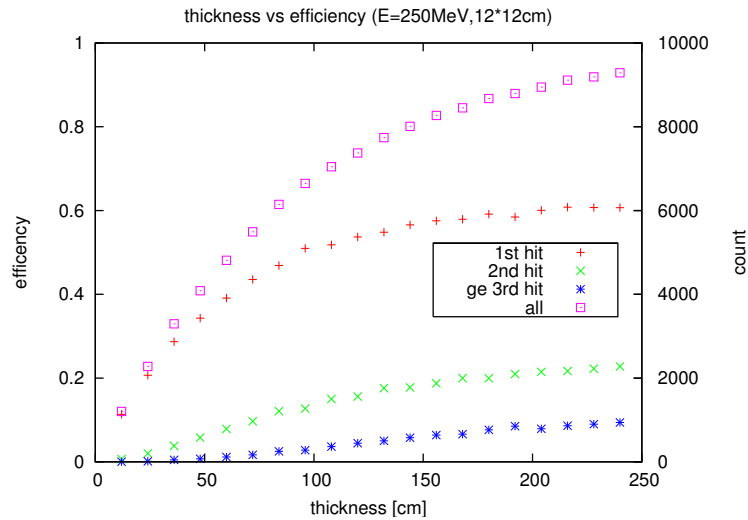


図 5.3: C/A の厚さ依存性 ($C/A=1$ を 1st hit、 $C/A=2$ を 2nd hit、 $C/A=3$ 以上を ge 3rd hit と表記)。中性子検出器の厚さが厚くなるにつれ、2nd hit や ge 3rd hit のイベントが増える。これらのイベントは分解能の低下を促すことになり好ましいものではない。

5.2 検出効率のエネルギー依存性

| | |
|----------------------|---|
| 中性子の入射エネルギー | T_0 [MeV] |
| 中性子検出器の形状 | 厚さ D12[cm] × 高さ H12[cm] × 幅 W180[cm]、30 段 8 面 |
| シンチレータ内の発光量のスレッシュヨルド | thr=6.000[MeVee] |

表 5.2: エネルギー依存性におけるシミュレーション条件。中性子の入射エネルギー T_0 [MeV] を様々に変化させた。

中性子の入射エネルギー T_0 [MeV] を様々に変化させた時、検出効率のエネルギー依存性を図 5.4 左のピンクの点に示す。中性子の入射エネルギーが低エネルギー (~ 100 MeV) では検出効率が低い。これは、シミュレーションで与えているシンチレータ中の粒子との反応断面積が小さいためだと考えられる (図 4.1 参照)。また、反応が起こったとしても、発光量が少ないために、スレッシュヨルド 6MeVee を超えることができず、検出されないためだと考えられる。

中性子の入射エネルギーが中高エネルギー領域 (100 ~ 500MeV) ではエネルギーによらず、検出効率はほぼ一定になる。中性子検出器の厚さが 12[cm] × 8 面の場合、 $T_0=100$ [MeV] 以上でほぼ一定の検出効率 70% を実現できることがわかる。これも同様に、シミュレーションで与えているシンチレータ中の粒子との反応断面積が一定のためだと言える (図 4.1 参照)。また、入射する中性子のエネルギーが高いために、シンチレータ中の発光量が多く、スレッシュヨルドよりも十分高いエネルギーで発光するためだと考えられる (詳細は 5.3 節で述べる)。

また 1n event の総数、2n event の総数、multi event の総数をそれぞれ図 5.4 左の赤、緑、青の点に示す。また、eventC として検出された入射中性子の総数のうち、1n event の総数、2n event の総数、multi event の総数の割合を図 5.4 右に示す。エネルギーが高くなると、multi event が急増することがわかる。中高エネルギー領域の中性子を検出する際には、このような multi event によるクロストーク現象を区別する方法が重要な課題となることがわかる。

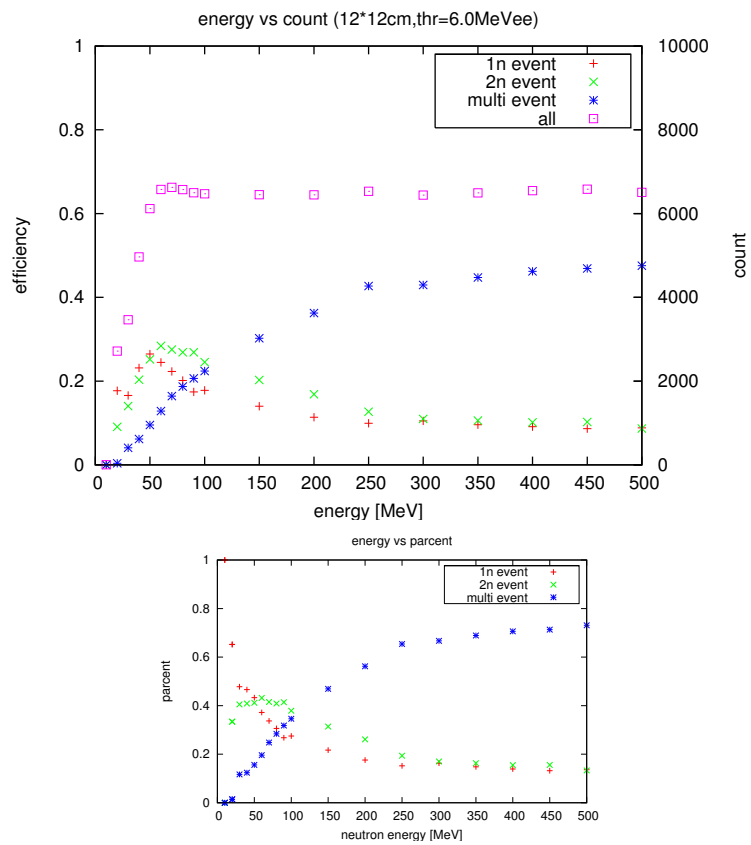


図 5.4: 左：検出効率のエネルギー依存性。中性子検出器の厚さが 12[cm] × 8 面の場合、 $T_0=100$ [MeV] 以上でほぼ一定の検出効率 70% を実現。右：中性子の入射エネルギーが高くなると multi event の割合が増えることがわかる。

次に1回目に検出された evenC を取り出した時の、反応と粒子の種類のエネルギー依存性を図 5.5 に示す。中性子の入射エネルギーが 200[MeV] 以上の中高エネルギー領域では、エネルギーによらず、検出される eventC の 65%以上が反応 7 番 ($n+^{12}\text{C} \rightarrow n+p+^{11}\text{B}$ または $n+n+^{11}\text{C}$ または $p+^{12}\text{B}$) すなわち陽子のノックアウト反応によるもの、80%以上が par2(陽子)によるものであることがわかった。

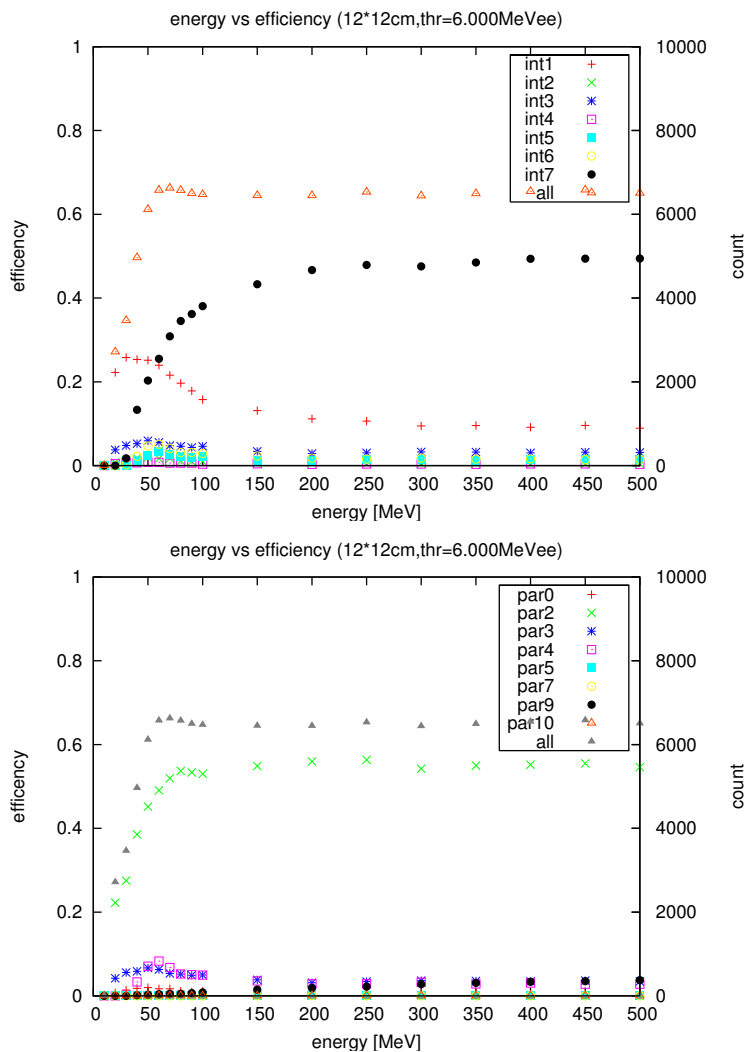


図 5.5: 検出に關与する反応(左)と粒子(右)の種類のエネルギー依存性。中性子の入射エネルギーが 200[MeV] 以上の中高エネルギー領域では、エネルギーによらず、反応 7 番(陽子のノックアウト反応)と par2(陽子)が中性子検出のために重要である。

次に、C/A のエネルギー依存性を図 5.6 に示す。中性子の入射エネルギーが高くなるにつれ、1st hit が増すことがわかる。これはスレッシュヨルドを超える反応が増えるためだと考えられる。すなわち、反応したのにスレッシュヨルドを超えない、という分解能を低下させるイベントが少なくなる。中性子検出器の厚さが同じ場合は、中性子の入射エネルギーが高い方が分解能の向上が望め、好ましいと言える。

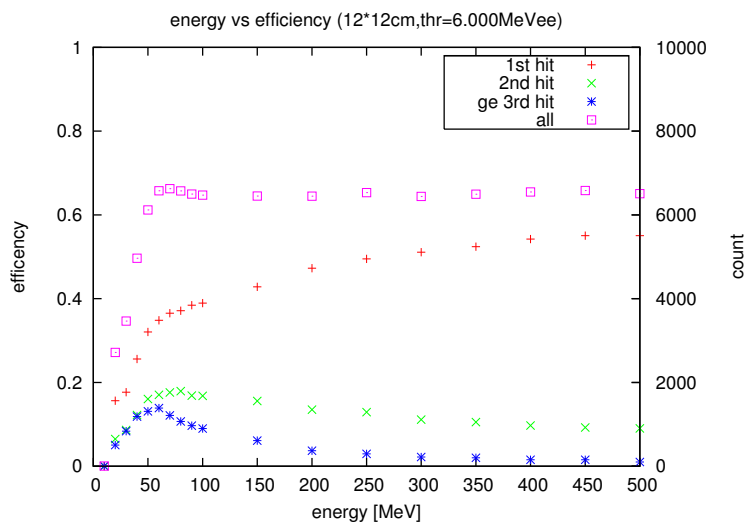


図 5.6: C/A のエネルギー依存性。中性子の入射エネルギーが高くなるにつれ、1st hit が増す。中性子検出器の厚さが同じ場合は、中性子の入射エネルギーが高い方が分解能の向上が望め、好ましいと言える。

5.3 検出効率のスレッシュホールド依存性

| | |
|-----------------------|---|
| 中性子の入射エネルギー | $T_0=250[\text{MeV}]$ |
| 中性子検出器の形状 | 厚さ D12[cm] × 高さ H12[cm] × 幅 W180[cm]、30 段 8 面 |
| シンチレータ内の発光量のスレッシュホールド | thr[MeVee] |

表 5.3: スレッシュホールド依存性におけるシミュレーション条件。シンチレータ内の発光量のスレッシュホールド thr[MeVee] を様々に変化させた。

中性子の入射エネルギー $T_0=250[\text{MeV}]$ 、シンチレータ内の発光量のスレッシュホールド thr[MeV] を様々に変化させた時の、検出効率のスレッシュホールド依存性を図 5.7 左のピンクの点に示す。スレッシュホールドを下げると検出効率は徐々に上昇するが、中性子の入射エネルギーが $T_0=250[\text{MeV}]$ と高い場合は、スレッシュホールドによる検出効率の変化はさほど大きくないと言える。

また、1n event の総数、2n event の総数、multi event の総数をそれぞれ図 5.7 左の赤、緑、青の点に、検出された入射中性子の総数に対する 1n event の総数、2n event の総数、multi event の総数の割合を図 5.7 右に示す。1 回目に検出された evenC を取り出した時の、反応と粒子の種類のスレッシュホールド依存性を図 5.8 に、C/A のスレッシュホールド依存性を図 5.9 に示す。いずれの場合も入射エネルギーが $T_0=250[\text{MeV}]$ と高い場合には、スレッシュホールドによる大きな違いは見られなかった(詳細は 7.1 節で述べる)。

すなわち、高エネルギーの中性子検出において重要なのは、中性子検出器の形状、および中性子の入射エネルギーであることがわかった。

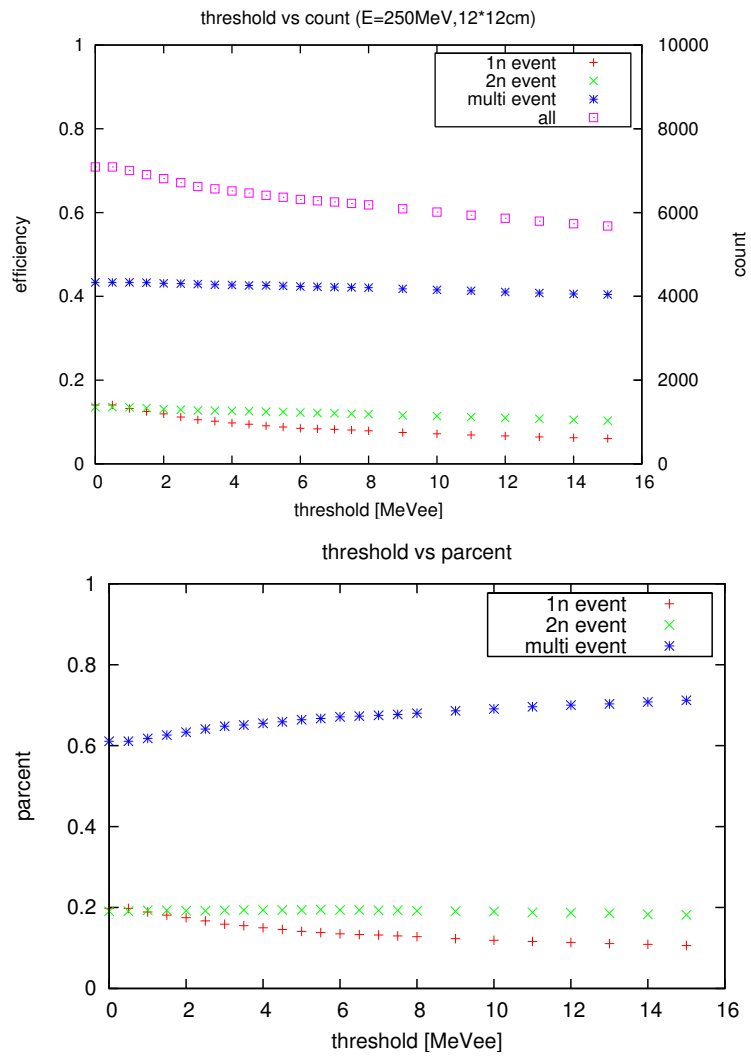


図 5.7: 検出効率のスレッシュホルド依存性。スレッシュホルドを下げると検出効率は徐々に上昇するが、中性子の入射エネルギーが $T_0=250$ [MeV] と高い場合は、スレッシュホルドによる検出効率の変化はさほど大きくない。

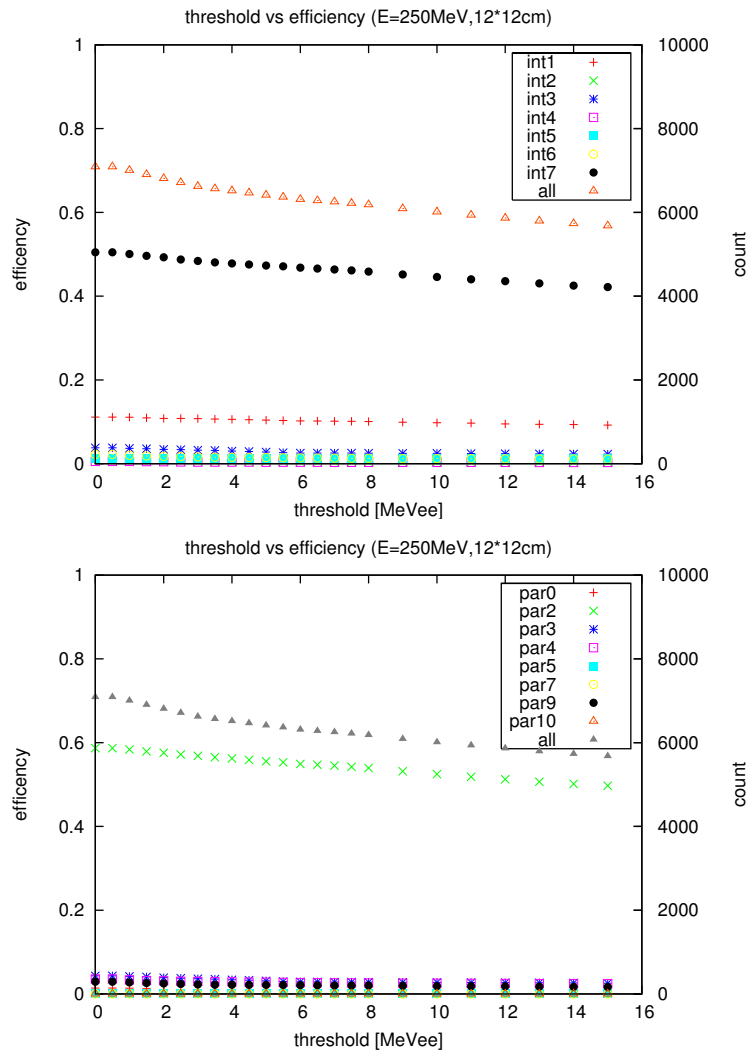


図 5.8: 検出に関与する反応(左)と粒子(右)の種類のスレッシュヨルド依存性。スレッシュヨルドによる大きな変化は見られない。

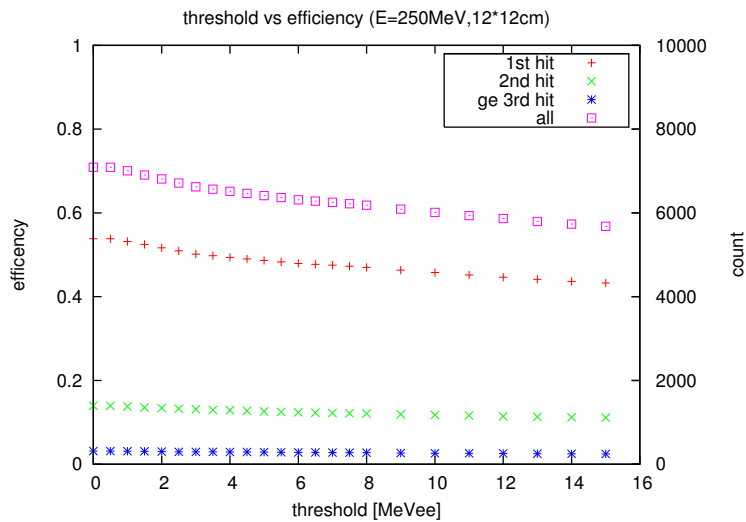


図 5.9: C/A のスレッシュヨルド依存性。スレッシュヨルドによる大きな変化は見られない。

5.4 シンチレータの形状と分解能

| | |
|----------------------|---|
| 中性子の入射エネルギー | $T_0=250[\text{MeV}]$ |
| 中性子検出器の形状 | 厚さ D[cm] × 高さ H[cm] × 幅 W180[cm]、30 段 8 面 |
| シンチレータ内の発光量のスレッシュヨルド | thr=6.000[MeVee] |

表 5.4: 中性子検出器の形状と分解能を求める際のシミュレーション条件。4 種類のシンチレータの形状で分解能を求めた。

シミュレーション条件は表 5.4 に示すように中性子の入射エネルギーを $T_0=250[\text{MeV}]$ 、中性子検出器の形状を厚さ D[cm] × 高さ H[cm] × 幅 W180[cm]、30 段 8 面、シンチレータ内の発光量のスレッシュヨルドを thr=6.000[MeVee] とした。ここでは、各入射中性子の 1 回目の eventC、1 回目の eventB について以下に示す 4 種類の中性子検出器の形状による分解能の違いを求めた。

- case1 : 12 × 12[cm] (厚さ D × 高さ H[cm])
- case2 : 6 × 12[cm]
- case3 : 6 × 6[cm]
- case4 : 6 × 12[cm]

1 回目の eventC、12 × 12[cm](case1) の場合の位置、時間、速度、運動エネルギー分解能、運動量 (成分ごと) を図 5.10、5.11 に示す。dx, dz, dP_x は矩形に、その他は近似的にガウス分布となった。他の case においても同様の結果が得られた。

矩形の分布を示す dx, dz, dP_x については $\sigma = (\text{全幅}) / \sqrt{12}$ (表の括弧内は全幅) と求めた。ガウス分布を示す各分解能についてはガウス関数

$$g(x) = A \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5.4)$$

をフィットさせることで σ の値を求めた。表 5.5、5.6 は eventC における検出効率、各分解能の σ の値である。

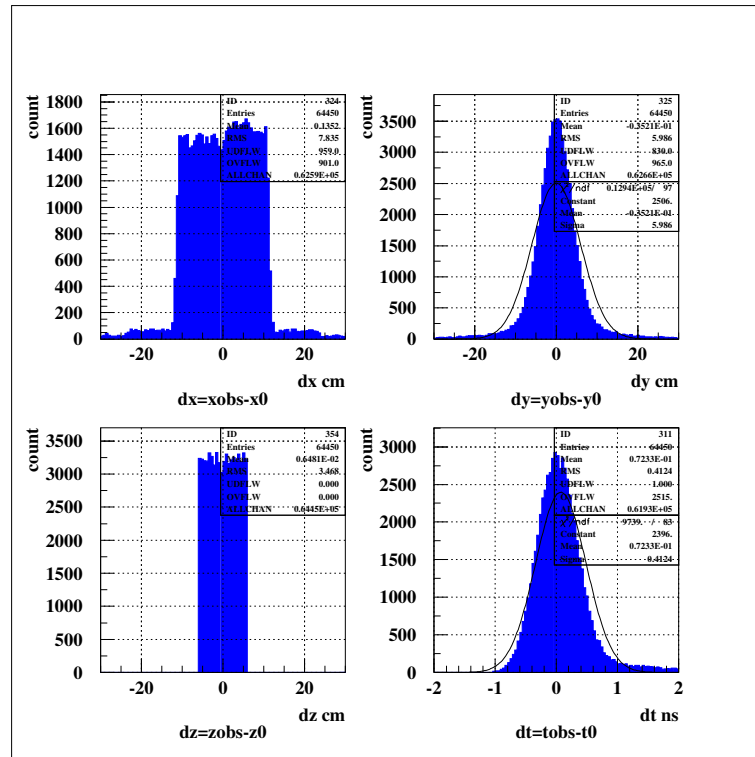


図 5.10: 位置・時間分解能 (1 回目の eventB、 12×12 cm の場合)。 dx, dz は矩形に、その他はガウス分布となった。

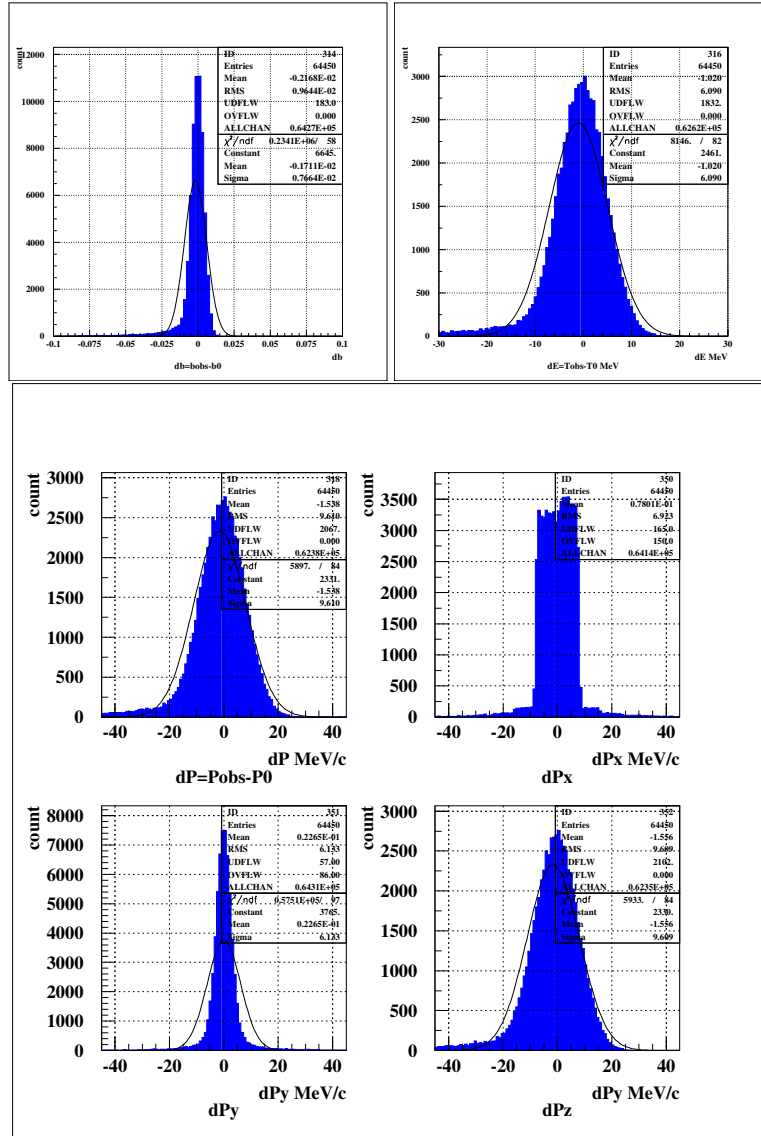


図 5.11: 速度、運動エネルギー、運動量分解能 (1 回目の eventC、 $12 \times 12\text{cm}$ の場合)。 dP_x は矩形に、その他はガウス分布となった。

| case | D[cm] | H[cm] | 検出効率 | 1n event | 2n event | multi event | dx [cm] | dy [cm] | dz [cm] | dt [ns] |
|------|-------|-------|--------|----------|----------|-------------|------------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 12 | 12 | 0.6553 | 993 | 1269 | 4271 | 6.93(24.0) | 4.40 | 3.46(12.0) | 0.331 |
| 2 | 6 | 12 | 0.3955 | 811 | 781 | 2363 | 6.93(24.0) | 3.86 | 1.73(6.0) | 0.281 |
| 3 | 6 | 6 | 0.3991 | 817 | 780 | 2394 | 3.46(12.0) | 3.86 | 1.73(6.0) | 0.282 |
| 4 | 12 | 6 | 0.6443 | 978 | 1096 | 4369 | 3.46(12.0) | 4.33 | 3.46(12.0) | 0.333 |

表 5.5: 中性子検出器の形状による効率、位置、時間分解能の σ の値の違い (eventC)

| case | D[cm] | H[cm] | $d\beta$ | dP [MeV/c] | dP_x [MeV/c] | dP_y [MeV/c] | dP_z [MeV/c] | dE [MeV] |
|------|-------|-------|----------|--------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| 1 | 12 | 12 | 0.00432 | 8.17 | 5.20(18.0) | 3.10 | 8.17 | 5.02 |
| 2 | 6 | 12 | 0.00334 | 6.20 | 5.20(18.0) | 2.78 | 6.21 | 3.82 |
| 3 | 6 | 6 | 0.00337 | 6.32 | 2.60(9.0) | 2.76 | 6.31 | 3.92 |
| 4 | 12 | 6 | 0.00434 | 8.20 | 2.60(9.0) | 3.06 | 8.18 | 5.06 |

表 5.6: 中性子検出器の形状による速度、運動量、エネルギー分解能の σ の値の違い (eventC)

x 方向の位置分解能 dx 、x 方向の運動量分解能 dP_x はシンチレータ一つの高さ H[cm] に大きく依存し、高さ H[cm] を 2 倍にする (case3 2、case4 1) と、 σ の値が 2 倍になる、すなわち dx 、 dP_x の分解能は 50% 低下することがわかる。一方、z 方向の位置分解能 dz はシンチレータ一つの厚さ D[cm] に大きく依存し、高さ D[cm] を 2 倍にする (case2 1、case3 4) と、 dx 、 dP_x は 50% 低下することがわかる。この他の分解能はシンチレータ一つの厚さ D[cm] に依存しており、厚さ D[cm] を 2 倍にする (case2 1、case3 4) と、 σ の値は 1.2 倍の範囲であり、分解能の低下は 20% 以内に収まることわかった。

したがって、シンチレータの形状として、例えば、case3 と case4 のように同じ 6[cm] × 12[cm] のシンチレータがあった場合は、case4 のように幅 D を 12[cm]、高さ H を 6[cm] として使用した方が検出効率と分解能の向上が望め、好ましいと言える。

| case | D[cm] | H[cm] | eventB1 回目の検出効率 | dx [cm] | dy [cm] | dz [cm] | dt [ns] |
|------|-------|-------|-----------------|------------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 12 | 12 | 71.2 | 6.93(24.0) | 3.98 | 3.46(12.0) | 0.307 |
| 2 | 6 | 12 | 45.3 | 6.93(24.0) | 3.67 | 1.73(6.0) | 0.258 |
| 3 | 6 | 6 | 45.1 | 3.46(12.0) | 3.63 | 1.73(6.0) | 0.256 |
| 4 | 12 | 6 | 70.5 | 3.46(12.0) | 3.92 | 3.46(12.0) | 0.310 |

表 5.7: 中性子検出器の形状による効率、位置、時間分解能の σ の値の違い (eventB)

| case | D[cm] | H[cm] | $d\beta$ | dP [MeV/c] | dP_x [MeV/c] | dP_y [MeV/c] | dP_z [MeV/c] | dE [MeV] |
|------|-------|-------|----------|--------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| 1 | 12 | 12 | 0.00407 | 7.63 | 5.196(18.0) | 2.81 | 7.62 | 4.70 |
| 2 | 6 | 12 | 0.00310 | 5.75 | 5.196(18.0) | 2.64 | 5.76 | 3.51 |
| 3 | 6 | 6 | 0.00308 | 5.82 | 2.598(9.0) | 2.61 | 5.82 | 3.58 |
| 4 | 12 | 6 | 0.00409 | 7.73 | 2.598(9.0) | 2.78 | 7.72 | 4.74 |

表 5.8: 中性子検出器の形状による速度、運動量、エネルギー分解能の σ の値の違い (eventB)

同様に eventB における検出効率、各分解能の σ を表 5.7、5.8 に示す。矩形の分布を示す dx, dz, dP_x については違いが見られないものの、その他の分解能は向上する傾向にあることがわかる。

5.5 中性子検出器の厚さと分解能

中性子検出器の厚さによる分解能の違いを見るため、前 5.4 節の 4 種類のシンチレータの形状 case1 ~ 4 について、中性子検出器の面ごと全 8 面の y 方向の位置分解能と時間分解能を求めた。ただし、統計を増やすため中性子を 10^5 個入射させた。また 1 回目の eventC を取り扱っている。12 × 12cm(case1) の場合、各面に対する位置分解能、時間分解能はそれぞれ図 5.12、5.13 のようになった。

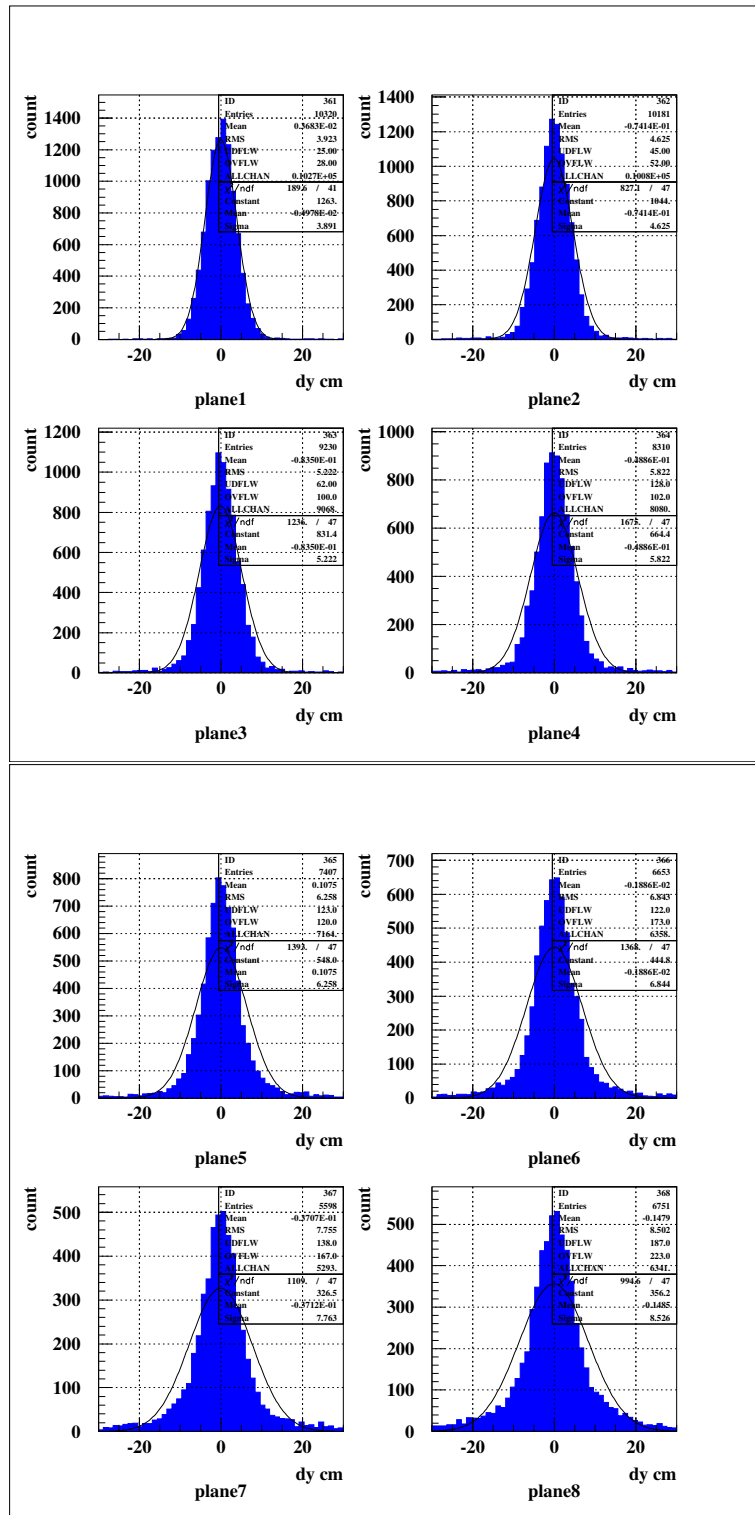


図 5.12: 1 ~ 8 面の y 方向の位置分解能 (eventC、12 × 12cm の場合)。後方の面ほどガウス分布の幅に広がりがある。

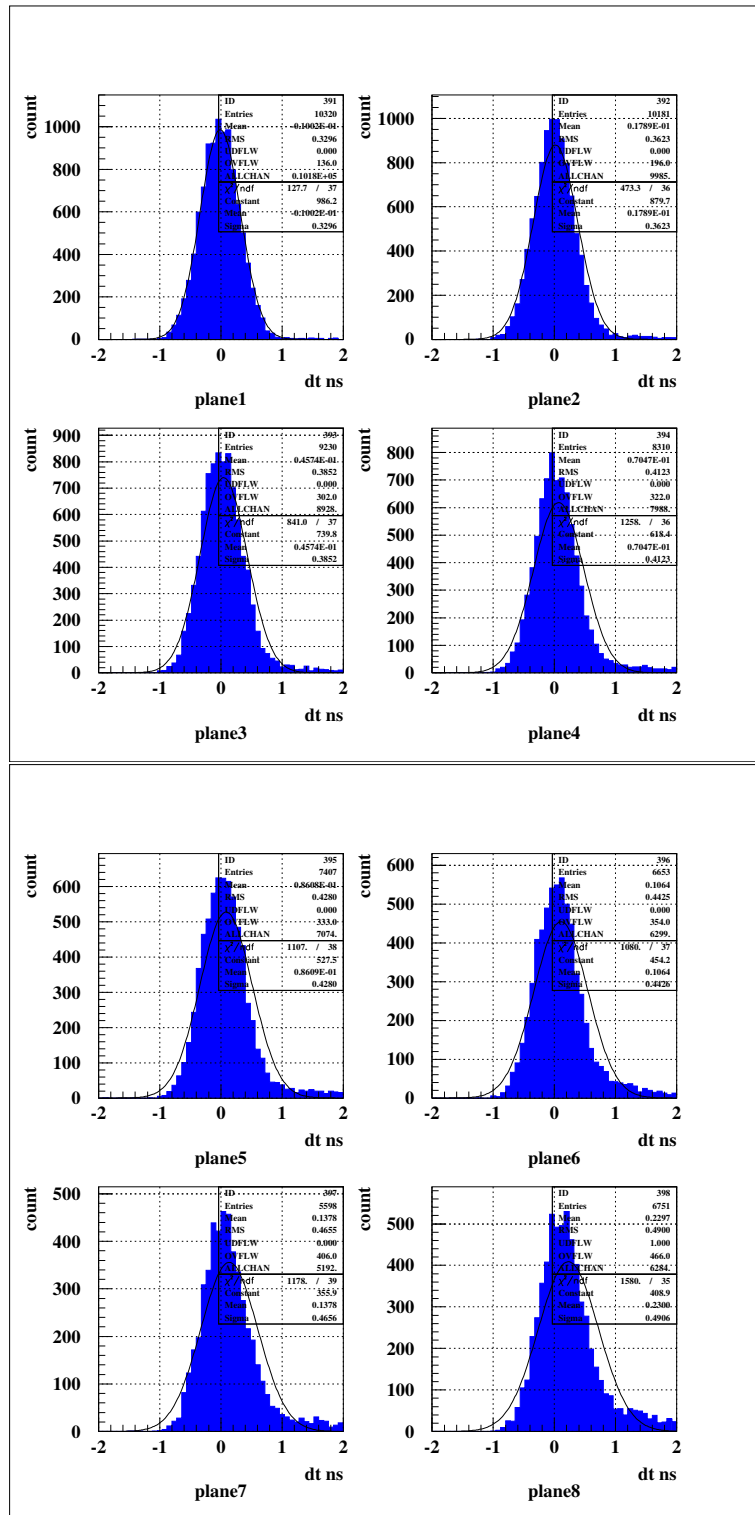


図 5.13: 1 ~ 8 面の時間分解能 (eventC、12 × 12cm の場合)。後方の面ほど分布の幅に広がりがあがる。

前節と同様にガウス関数・式 (5.4) をフィットさせた時の $z[\text{cm}]$ に対する位置・時間分解能の σ の値を表 5.9、表 5.9 に示す。ただし、 $z[\text{cm}]$ は Veto 前面から各面の中心までの水平距離である。後方の面ほど位置・時間分解能の σ の値が大きくなる傾向にあり、分解能が低下することがわかる。また、これらの表 5.9、表 5.9 の値をまとめて図 5.14 に示す。位置分解能は後方の面ほど悪くなり、前方の面と後方の面で大きな違いが見られる。12 × 12cm の場合、1 面と 8 面の位置分解能は約 20% の違いが見られる。これは、後方の面で 1 回目の eventC が観測されるまでに、前方の面で鳴らない eventA が多く存在していたためと考えられる。一方、時間分解能は前方の面と後方の面でさほど違いが見られない。12 × 12cm の場合、1 面と 8 面の時間分解能の違いは 10% 以内である。また、シンチレータ一つの厚さ D による位置分解能の違いはほとんど見られない一方で、時間分解能は関しては厚さ 12cm のものと 6cm のもので 10% 程度の違いが見られることがわかった。

| 面 | $z[\text{cm}]$ | 12 × 12cm | | 12 × 6cm | |
|---|----------------|-----------|----------|----------|----------|
| | | dy | dt | dy | dt |
| 1 | 10 | 3.61546 | 0.313922 | 3.62307 | 0.312661 |
| 2 | 22 | 3.88015 | 0.321032 | 3.84409 | 0.321171 |
| 3 | 34 | 4.11246 | 0.325481 | 4.04545 | 0.328976 |
| 4 | 46 | 4.27867 | 0.328358 | 4.25787 | 0.336619 |
| 5 | 58 | 4.53201 | 0.339834 | 4.66302 | 0.340224 |
| 6 | 70 | 4.807 | 0.345302 | 4.86415 | 0.345457 |
| 7 | 82 | 5.47907 | 0.355076 | 5.53861 | 0.360123 |
| 8 | 94 | 6.48667 | 0.366047 | 6.17841 | 0.375792 |

表 5.9: eventC、case1 と 4 における中性子検出器の厚さと位置・時間分解能の σ の値。後方の面ほど σ の値が大きくなる傾向にあり、分解能が低下することがわかる。

| 面 | z[cm] | 6 × 12cm | | 6 × 6cm | |
|----|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | <i>dy</i> | <i>dt</i> | <i>dy</i> | <i>dt</i> |
| 1 | 7 | 3.523767 | 0.2613023 | 3.576783 | 0.2612060 |
| 2 | 13 | 3.584064 | 0.2643708 | 3.635726 | 0.2618434 |
| 3 | 19 | 3.702814 | 0.2695030 | 3.682942 | 0.2634295 |
| 4 | 25 | 3.807802 | 0.2735283 | 3.750407 | 0.2682142 |
| 5 | 31 | 3.944166 | 0.2711370 | 3.924893 | 0.2730331 |
| 6 | 37 | 4.028110 | 0.2768946 | 3.956443 | 0.2761940 |
| 7 | 43 | 4.109528 | 0.2760567 | 4.170222 | 0.2793240 |
| 8 | 49 | 4.322705 | 0.2820964 | 4.243647 | 0.2784356 |
| 9 | 55 | 4.432729 | 0.2755296 | 4.512946 | 0.2818094 |
| 10 | 61 | 4.502603 | 0.2783297 | 4.518323 | 0.2792943 |
| 11 | 67 | 4.785606 | 0.2830901 | 4.758420 | 0.2816061 |
| 12 | 73 | 4.696115 | 0.2967834 | 4.860262 | 0.2847169 |
| 13 | 79 | 4.936713 | 0.2993004 | 5.082312 | 0.2910553 |
| 14 | 85 | 5.339818 | 0.2971709 | 5.426247 | 0.2982489 |
| 15 | 91 | 5.923115 | 0.3066920 | 5.669313 | 0.3081141 |
| 16 | 97 | 5.950004 | 0.3039098 | 5.911576 | 0.3060797 |

表 5.10: eventC、case2 と 3 における中性子検出器の厚さと位置・時間分解能の σ の値。後方の面ほど σ の値が大きくなる傾向にあり、分解能が低下することがわかる。

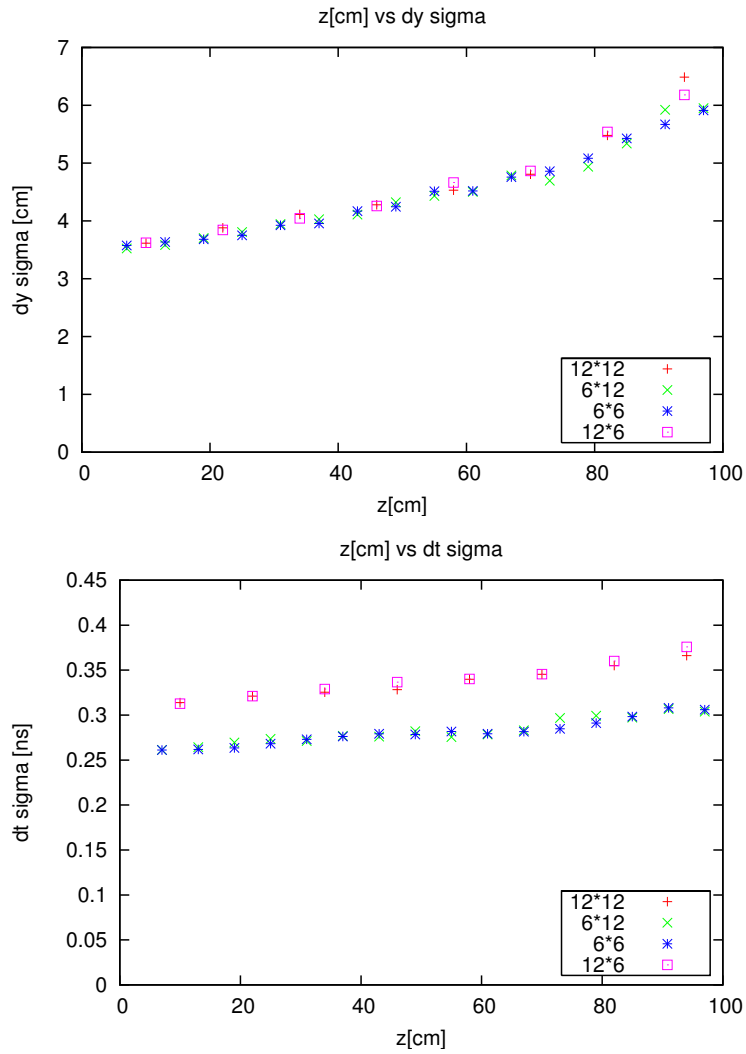


図 5.14: eventC、厚さ $D \times$ 高さ H の異なる 4 つのシンチレータ case1~4 における Veto 前面からの水平距離 z [cm] と位置・時間分解能の σ の値の関係。後方の面ほど σ の値が大きくなり、分解能が低下することがわかる。また、位置分解能に関しては形状による違いはほとんどない一方で、時間分解能は 10% 程度の違いが見られた。

第6章 まとめと今後の展望

DEMONS によるシミュレーションは、中性子過剰核の分解反応によって1個の中性子が放出される $1n$ 反応として、検出器に1個の中性子が入射する場合を考えている。しかし、実際の実験では、2個以上の中性子が同時に放出される $2n$ 反応もあり、 $1n$ 反応と $2n$ 反応によって放出される中性子を区別して検出することが必要となる。そのためには、クロストーク現象を区別することが重要となる。今後はシミュレーションを行うジオメトリーを変化させ、8面の中性子検出器を離して置くことで、クロストーク現象に関する考察を行う予定である。

また位置分解能から相対エネルギー分解能の算出を行いたいと考えている。

さらに、実際に1本のシンチレータを用いて中性子検出器を製作し、減衰長や位置・時間分解能のテストを行う予定である。

第7章 付録

7.1 中性子検出に関与する反応と粒子

図7.1は中性子の入射エネルギー $T_0=250$ [MeV]、シンチレータ一つの大きさを厚さ $D12$ [cm] × 高さ $H12$ [cm] × 幅 $W180$ [cm] とした時、シンチレータ中で起こる全 eventA、左右のフォトマルの発光量がディスクリ 0.5 [MeVee] を超えて検出される1回目の eventB、シンチレータ内の発光量がスレッシュヨルド 6.0 [MeVee] を超えて検出される1回目の eventC の反応と粒子とイベント数の関係である。ただし、横軸・縦軸はそれぞれ表4.1に示した反応番号・粒子番号であり、青の四角の大きさがイベント数の多さを表している。

A から B において、バックグラウンドを排除するためのディスクリ 0.5 [MeVee] をかけたことにより、発光量の少ない反応3番(中性子と炭素との弾性散乱)によるイベント数が極端に少なくなることがわかる。このため、中性子検出の検出効率の低下や分解能の低下に影響を及ぼしていると考えられる。また、B から C において、 γ 線を排除するためにかけたスレッシュヨルドをかけたことにより、確かに反応2番(励起した炭素から放出される γ 線)の検出数は少なくなることがわかる。しかし、全体としてさほど大きな違いは見られず、ディスクリ 0.5 [MeVee] の場合はスレッシュヨルドによるイベント数の有無はほとんど見られない(5.3節参照、検出効率・分解能の違いは5.4節参照)。

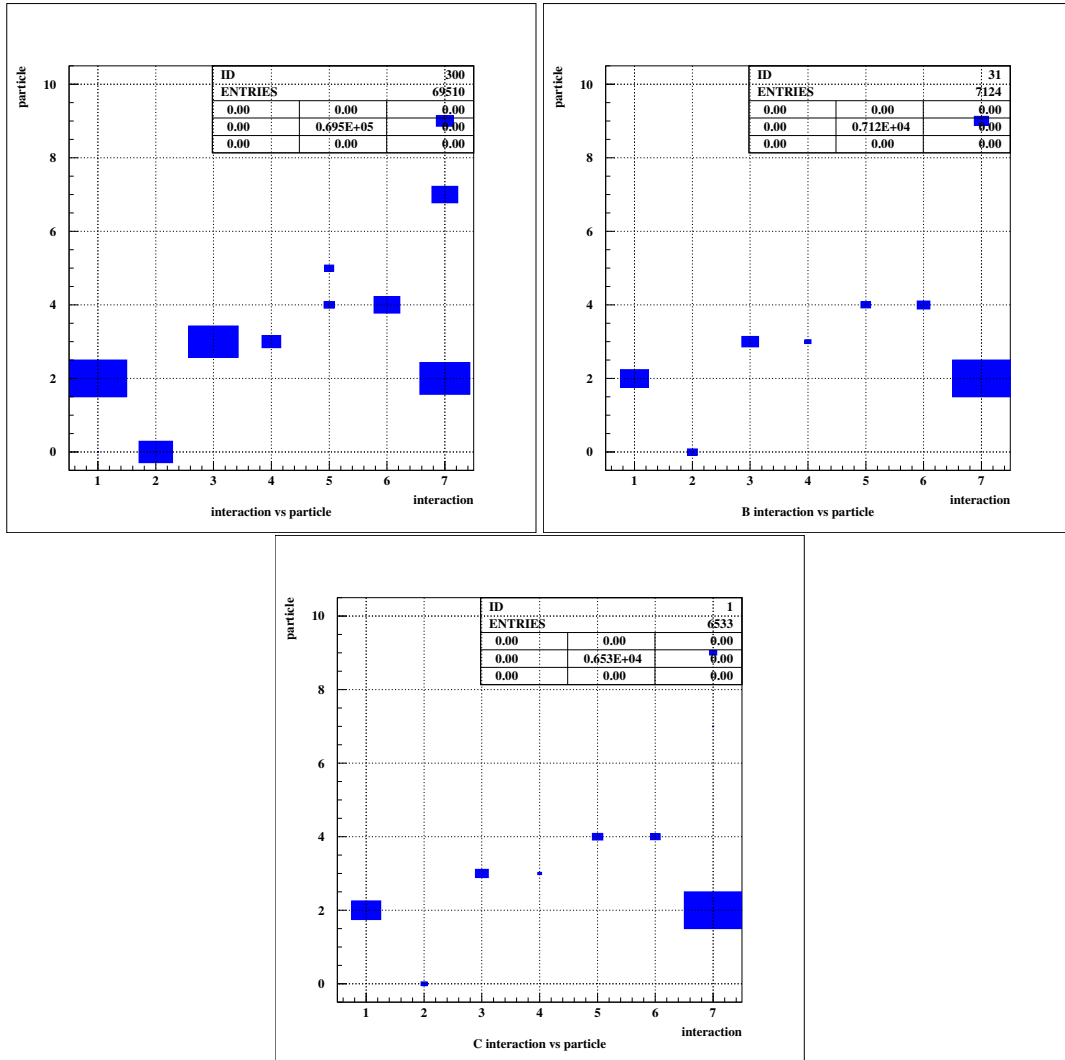


図 7.1: $T_0=250\text{MeV}, D12\text{cm}, H12\text{cm}$ の時の eventA,B,C における反応と放出粒子とイベント数の関係 (横軸が反応番号、縦軸が粒子番号、四角の大きさがイベント数)(左上: eventA、右上: eventB、下: eventC)

関連図書

- [1] T.Sugimoto et al., Phys.Lett.B654, 160(2007)
- [2] R.C.Byrd et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A313(1992)

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導と助言を頂きました。指導教官である中村隆司准教授には、シミュレーション方法、議題提起をはじめ、分析的な視点から結果を考察することの大切さ、物理的な思考の基礎を教えて頂きました。また、助手の佐藤義輝氏には、解析方法や物理の詳細についてより具体的な指導や提案をして頂きました。南日卓氏を始めとする研究室の先輩方には、解析環境の整備や解析を効率良く行う上で重要な計算機の使い方、論文の書き進め方などに関する身近なアドバイスをして頂きました。心より深く感謝致します。