

中性子の酸素原子核との反応によるガンマ線に関する研究

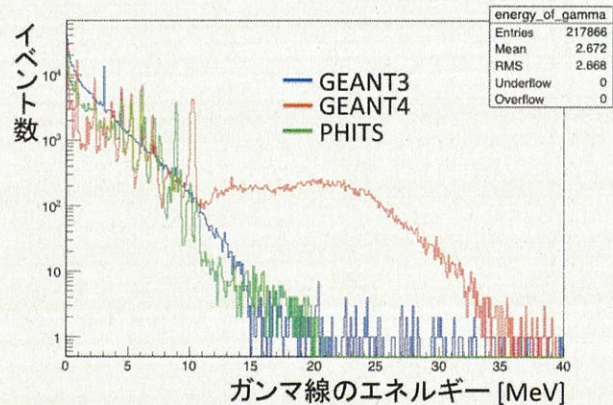
素粒子物理学研究室 学籍番号：41426208 白髭哲也

【研究背景】

T2K (Tokai to Kamioka)実験は、茨城県那珂郡東海村の大強度陽子加速器 J-PARC で発射したニュートリノを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデ(SK)で捉える素粒子実験である。T2K 実験において、スーパーカミオカンデでニュートリノ・酸素相互作用に従う核脱励起ガンマ線を観測することによって、ニュートリノ・酸素中性カレント弾性(NCQE)反応断面積が得られた。この NCQE 反応における脱励起ガンマ線測定の見込みとして、反応により発生する中性子が水中の酸素原子核と反応して発生する二次ガンマ線の不定性がある。この二次ガンマ線のエネルギーや数を精度よく測定できれば、その系統誤差を減らすことが期待できる。

【シミュレーション】

T2K 実験では、検出器シミュレーションとして GEANT3 と呼ばれるツールが使用されている。本論文ではさらに GEANT4、PHITS についても水中での中性子反応により発生するガンマ線のシミュレーションを行い、比較した。例えば右図のエネルギー分布ではそれぞれで形が異なり、特に GEANT3 では脱励



起に特徴的なピークが見られない。他にもシミュレーションによって異なる結果がいくつか見られたことから、実際に中性子ビームを使用してガンマ線を測定する実験を提案した。

【実験 1】

予備実験として、大阪大学核物理研究センター(RCNP)の中性子ビームラインに直径 30cm、高さ 30cm の円柱形の水ターゲットと、その横 31cm の位置に NaI(Tl)検出器を設置し、80MeV 中性子を入射したときに発生するガンマ線を測定した。その結果、測定不可能になるほどのバックグラウンド事象は観測されなかった。

【実験 2】

RCNP の実験室内において、中性子ビームに相関するバックグラウンド事象を測定した。中性子ビームが直接当たらない場所ではバックグラウンドの頻度は 0.87Hz であり、これは予測される信号レートに比べ二桁程度低いことから、本実験では影響がないことを示した。

【学会発表】

日本物理学会(2014 年 9 月 19 日、2015 年 3 月 22 日、2016 年 3 月 19 日(予定))

O

O

素粒子物理学研究室

学籍番号 41426208

白髭哲也

連絡先

電話番号 090-3172-2513

e-mail アドレス shirahige@s.okayama-u.ac.jp

O

O

中性子の酸素原子核との反応による
ガンマ線に関する研究

岡山大学大学院 自然科学研究科
数理物理学専攻 素粒子物理学研究室

学籍番号 41426208

白髭 哲也

2016年2月9日

概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県那珂郡東海村の大強度陽子加速器 J-PARC で発射したニュートリノを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデ (SK) で捉える素粒子実験である。T2K 実験において、スーパーカミオカンデでニュートリノ - 酸素相互作用に従う核脱励起ガンマ線を観測することによって、ニュートリノ - 酸素中性カレント弾性 (NCQE) 反応断面積が得られた。この NCQE 反応における脱励起ガンマ線測定の系統誤差の 1 つとして、反応により発生する中性子が水中の酸素原子核と反応して発生する二次ガンマ線の不定性がある。この二次ガンマ線のエネルギーや数を精度よく測定できれば、その系統誤差を減らすことが期待できる。

T2K 実験では、検出器シミュレーションとして GEANT3 と呼ばれるツールが使用されている。本論文ではさらに GEANT4、PHITS についても水中での中性子反応により発生するガンマ線のシミュレーションを行い、比較した。例えばガンマ線のエネルギー分布がそれぞれで異なり、特に GEANT3 では脱励起に特徴的なピークが見られない。そのため実際に中性子ビームを使用してガンマ線を測定する実験を提案した。

将来の実験に向けた 2 つの予備実験の結果を報告する。1 つ目の予備実験は直径 30cm、高さ 30cm の円柱形の水ターゲットへ 80MeV 中性子を入射し、水ターゲットの横 31cm の位置に設置した NaI(Tl) 検出器でガンマ線を測定した。その結果、測定不可能になるほどのバックグラウンド事象は観測されなかった。2 つ目の予備実験は RCNP ToF トンネル内における中性子ビームに相関するバックグラウンド事象を測定した。中性子ビームが直接当たらない場所では、バックグラウンドは 0.87Hz であり、これは予測される信号レートに比べ二桁程度低いことから、本実験では影響がないことを示した。

目次

第1章 導入	3
1.1 序論	3
1.2 ニュートリノ	3
1.3 チェレンコフ光	4
1.4 スーパーカミオカンデ	6
1.5 T2K 実験	7
1.6 NCQE 反応断面積	10
第2章 水に中性子を入射するシミュレーション	15
2.1 GEANT3	15
2.2 GEANT4	17
2.3 PHITS	21
2.4 各シミュレーションでの比較	22
第3章 中性子ビームを用いた実験	25
3.1 中性子ビーム	25
3.2 実験1	27
3.2.1 実験1 概要	27
3.2.2 実験1 エネルギー較正	30
3.2.3 実験1 結果	32
3.3 実験2	33
3.3.1 実験2 概要	33
3.3.2 実験2 エネルギー較正	36
3.3.3 実験2 結果	39
第4章 まとめと今後の展望	47
4.1 まとめ	47
4.2 今後の展望	47

付 録 A GEANT4	49
A.1 GEANT4 の設計概念	49
A.1.1 GEANT4 のシミュレーション手法	49
A.1.2 GEANT4 における粒子と物質の相互作用過程の扱い	49
A.2 基本的なオブジェクト	49
A.2.1 基本的なオブジェクトとは？	49
A.2.2 Run とは？	50
A.2.3 Event とは？	50
A.2.4 Track とは？	50
A.2.5 Step とは？	51

第1章 導入

1.1 序論

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県那珂郡東海村の大強度陽子加速器 J-PARC で発射したニュートリノを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデ (SK) で捉える素粒子実験である。T2K 実験において、スーパーカミオカンデでニュートリノ - 酸素相互作用に従う核励起ガンマ線を観測することによって、ニュートリノ - 酸素中性カレント弾性 (NCQE) 反応断面積が得られた [1]。この NCQE 反応における励起ガンマ線測定の系統誤差の 1 つとして、発生する中性子が水中の酸素原子核と反応して発生する二次ガンマ線の不定性がある。この二次ガンマ線のエネルギーや数を精度よく測定できれば、その系統誤差を減らすことが期待できる。

ここでは、はじめに素粒子の一つであるニュートリノについての説明を行う。そして、そのニュートリノをとらえるスーパーカミオカンデについて説明する。次に、そのスーパーカミオカンデを使った T2K 実験について述べる。最後に T2K 実験から得られた NCQE 反応断面積との系統誤差の原因について記述する。

1.2 ニュートリノ

ニュートリノは原子核のベータ崩壊におけるエネルギー保存則を説明するために、パウリ (Pauli) によって 1930 年に導入された中性の素粒子である。

ベータ崩壊の際に電子が放出されることは当時知られていたが、その電子のエネルギースペクトルは単色のスペクトルではなく広がりを持ったスペクトルであった。崩壊前、崩壊後の原子核はそれぞれ固有のエネルギー状態であるはずであり、エネルギー保存則が成り立っているとすると、電氣的に中性な軽い粒子を仮定する必要があった。その粒子は後にフェルミによって「ニュートリノ」(以下、 ν という記号で記す) と名付けられた。

ニュートリノは強い相互作用と電磁相互作用がなく、弱い相互作用でしか反応しない。このため他の素粒子との反応がわずかで、透過性が非常に高い。

ニュートリノが起こす主な反応である弱い相互作用には、荷電カレント (CC : Charged Current) 反応と中性カレント (NC : Neutral Current) 反応がある。

1. 荷電カレント反応

荷電カレント反応は $W^\pm$ 粒子の交換を通して起こり、ニュートリノは同一タイプの荷電レプトンに転換する。荷電カレント反応の例を図 1.1 に示す。この図 1.1 において電子ニュートリノ ν_e が W^+ 粒子を出して電子 e^- に転換し、

$$\nu_e \rightarrow W^+ + e^- \quad (1.1)$$

となる。この時、中性子 n が W^+ 粒子を受け取って陽子 p に転換し、

$$n + W^+ \rightarrow p \quad (1.2)$$

となる。

2. 中性カレント反応

中性カレント反応は Z_0 粒子の交換を通して起こり、ニュートリノはそのまま残り、反応したものにエネルギーと運動量を受け渡す。中性カレント反応の例を図 1.2 に示す。図 1.2 において電子ニュートリノ ν_e が Z_0 粒子を出して

$$\nu_e \rightarrow Z_0 + \nu_e \quad (1.3)$$

となる。この時、中性子 n が Z_0 粒子を受け取り、

$$n + Z_0 \rightarrow n \quad (1.4)$$

となるか、または、陽子 p が Z_0 粒子を受け取り、

$$p + Z_0 \rightarrow p \quad (1.5)$$

となる。

1.3 チェレンコフ光

チェレンコフ光とは、荷電粒子が物質中を運動する時、荷電粒子の速度がその物質中の光速度よりも速い場合に放出される光である。

相対性理論は真空中の光速がどんな場合にも一定の $c=299,792,458$ m/s であると仮定しているが、物質中を伝播する光の速度は、屈折率のため c よりもかなり遅くなる。たとえば、

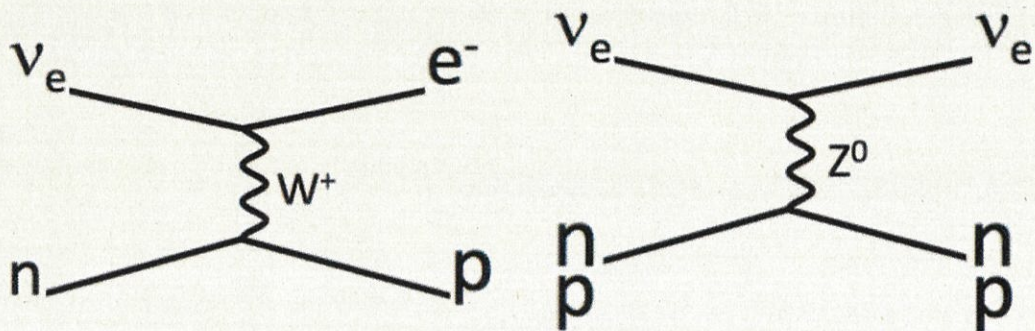


図 1.1: 荷電カレント反応

図 1.2: 中性カレント反応

水中の伝播速度は $0.75c$ にすぎない。粒子は、核反応や粒子加速器などによって加速され、この速度を超えることが可能である。チェレンコフ光は、荷電粒子が純水などの誘電体を、光よりも速い速度で通過するときに放出される。

チェレンコフ光の図解を図 1.3 に示す。

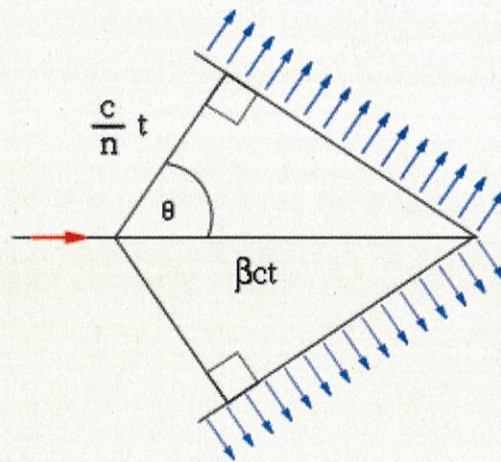


図 1.3: チェレンコフ光の図解

図 1.3 において、粒子（赤い矢印）は速度 $v_{particle}$ で物質中を通過する。ここでは、粒子の速度と真空中の光速との比を $\beta = v_{particle}/c$ と定義する。 n を物質の屈折率とすると、放出されるチェレンコフ光（青い矢印）の伝播速度は $v_{cherenkov} = c/n$ となる。

三角形の左の頂点は、ある初期時点 ($t=0$) における粒子の位置をあらわす。右の頂点は、ある時間 t における粒子の位置をあらわす。ある t が与えられた場合、粒子の移動距離は

$$x_{particle} = v_{particle} t = \beta ct \quad (1.6)$$

であり、放出されたチェレンコフ光の移動距離は

$$x_{cherenkov} = v_{cherenkov} t = \frac{c}{n} t \quad (1.7)$$

となる。ゆえに、チェレンコフ光の放出角度は

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (1.8)$$

となる。

1.4 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは5万トンの超純水を蓄えた直径 39.3 m、深さ 41.4 m のタンクと、その内部に設置した 11,200 本の光電子増倍管 (PMT) からなる水チェレンコフ検出器である [2]。スーパーカミオカンデの外観を図 1.4 に示す。検出器は岐阜県、神岡鉱山の地下 1000 m に位置する。鉱山地下に設置することで、バックグラウンドになる宇宙線の侵入を防ぐことができる。特に μ 粒子のフラックスは地上に比べて 10 万分の 1 に抑えられる。また水チェレンコフ装置に使う大量の水を調達できる。

スーパーカミオカンデにおけるニュートリノの観測とは、ニュートリノが検出器の純水中の荷電粒子により散乱し、結果放出される荷電粒子が水中で発するチェレンコフ光を光電子増倍管で観測することである。チェレンコフ光は図 1.3 から

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (1.9)$$

の関係になる。水の屈折率 n は約 1.34 なので、 β が最大値 ($\beta=1$) のときチェレンコフ光の放出角度 θ はおよそ 42 度になる。

また、ある荷電粒子がチェレンコフ光を放出するのに必要な最小のエネルギー $E_{threshold}$ は、

$$\begin{aligned} E_{threshold} &= \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \\ &= \frac{nmc^2}{\sqrt{n^2-1}} \end{aligned} \quad (1.10)$$

となる。ここで、 m は荷電粒子の静止質量である。この値をチェレンコフ閾値 $E_{threshold}$ と呼ぶ。水中での主な粒子のチェレンコフ閾値 $E_{threshold}$ は、表 1.1 の通りである。

表 1.1: 純水中での各荷電粒子のチェレンコフ閾値 $E_{threshold}$

荷電粒子	静止質量 (MeV/c ²)	チェレンコフ閾値 $E_{threshold}$ (MeV)
電子	0.511	0.767
μ 粒子	105.7	157.4
π 粒子	139.7	207.9
陽子	938.3	1413

一方、チェレンコフ光の強度は、荷電粒子がどれほどの光子を発生させるかで決まる。電子の場合、単位長さ dL あたりに放出されるチェレンコフ光の光子数 N_{photon} は

$$\frac{d^2 N_{photon}}{dL d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \quad (1.11)$$

から求められる。 α は微細構造定数 ($\simeq 1/137$)、 λ は光子の波長である。この式を積分することで

$$\begin{aligned} N_{photon} &= \int_0^l dL \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \\ &= 2\pi\alpha l \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

になる。スーパーカミオカンデの光電子増倍管が検出感度を持つ波長 $\lambda = 300nm \sim 600nm$ ($\lambda_1 = 300nm$, $\lambda_2 = 600nm$) での単位長さ ($l=1$ cm) あたりに放出される光子数は、およそ 340 個/cm となる。この電子が水中で失うエネルギーを考えると、チェレンコフ光の発生によるエネルギーの損失は小さく、ほとんどのエネルギーは周囲の原子とのクーロン散乱によるイオン化損失によるものである。10 MeV 程度の電子の場合、純水中を 1 cm 進むとおよそ 2 MeV のエネルギーを失うので、電子は数 cm しか走ることができない。その間放出されるチェレンコフ光子は 1000 個程度である。この微弱な光を検出するために光電子増倍管が使われている。チェレンコフ光は検出器タンクの内壁に輪の像 (リングイメージ) として射影される。このリングイメージをタンク内壁に張り巡らされた光電子増倍管により検出する。スーパーカミオカンデのモニターを図 1.5 に示す。

1.5 T2K 実験

T2K (Tokai to Kamioka) 長基線ニュートリノ振動実験は 2009 年 4 月に開始した実験で、茨城県那珂郡東海村にある J-PARC 大強度陽子加速器施設の 30 GeV 陽子シンクロトロンか

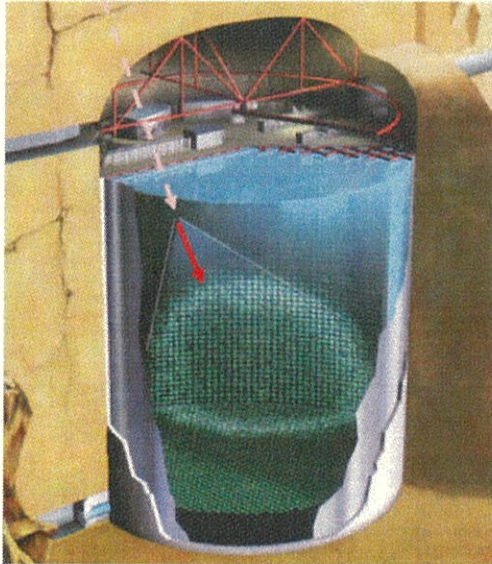


図 1.4: スーパーカミオカンデの外観

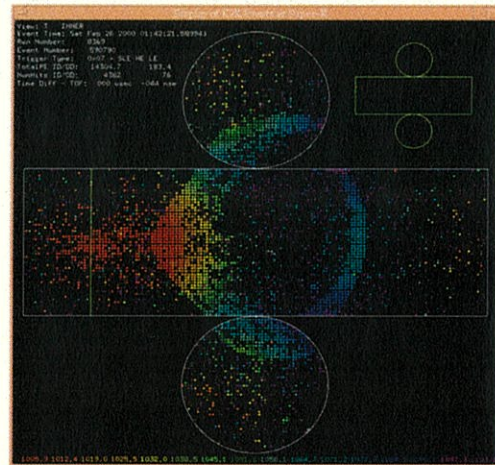


図 1.5: スーパーカミオカンデのモニター

らの大強度陽子ビームより生成したミューニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデ (SK) で観測する (図 1.6)[3]。

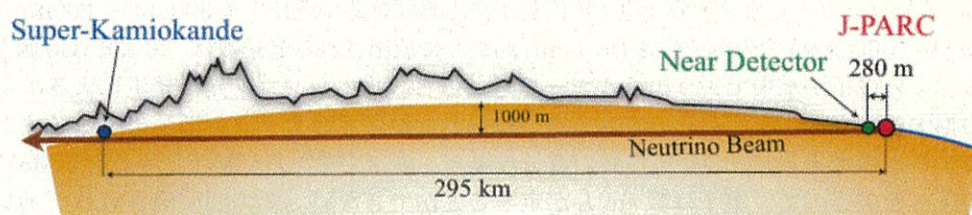


図 1.6: T2K 実験の概要図

T2K 実験では世界最大強度のニュートリノビームと世界最大の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデを用いて以下の目標を世界最高感度で実現することを目指している。

- 電子ニュートリノ出現モード探索による混合角 θ_{13} の精密測定
- ミューニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定

T2K 実験で使用される J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) の陽子加速器は 400 MeV 線形加速器 (LINAC : LINEar ACcelerator)、3 GeV 陽子シンクロトロン (RCS : Rapid Cycling Synchrotron)、30 GeV 陽子シンクロトロン (MR : Main Ring) から構成される。LINAC で生成、加速された陽子は RCS、MR で順に加速され、最終的にビームエネルギー 30 GeV、ビーム強度 750 kW まで到達し、ニュートリノビームラインへ輸送される。1 スピルあたり 8 バンチ、1 バンチの幅は 58 ns、バンチ間隔 581 ns のビーム構造になっている (図 1.7)。

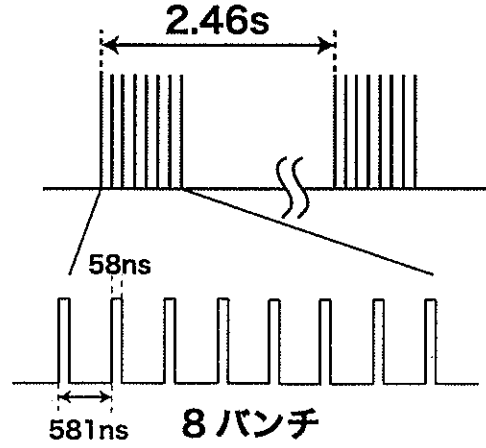


図 1.7: MR の陽子ビームの時間構造

T2K 実験では MR において 30 GeV まで加速された陽子ビームが直径 26 mm、長さ 900 mm のグラフィイト標的に照射され、ハドロン反応により π 中間子を含む多数のハドロンが生成される。この π 中間子は電磁ホーンにより並行に収束され下流の崩壊領域において以下のように崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.13)$$

この崩壊により生成されたミューニュートリノを用いる。ビームに含まれるその他の粒子 (陽子や崩壊せずに残った π 中間子などのハドロン、低エネルギーの μ 粒子) は崩壊領域の終端にあるビームダンプに吸収されるため、ニュートリノのみがスーパーカミオカンデに向かって飛んでいくことができる。この時のミューニュートリノのエネルギー E_ν は π の方向からの角度のズレを θ とすると以下のように表せる。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (1.14)$$

ここで E_π 、 p_π 、 m_π はそれぞれ π 中間子のエネルギー、運動量、質量を表し、 m_μ はミューオンの質量である。この式を用いて p_π と E_ν の関係をプロットすると図 1.8 になる。これを

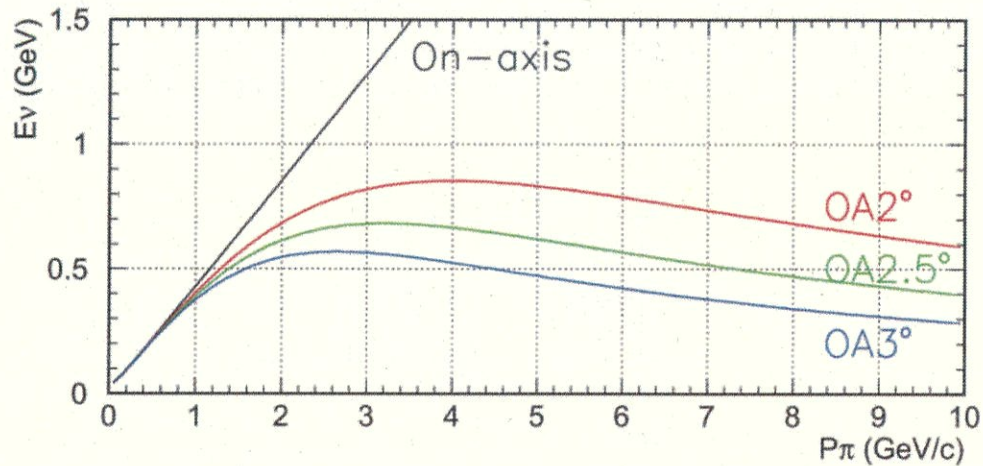


図 1.8: π 中間子の運動量とニュートリノエネルギーの関係

見ると $\theta=0$ ではニュートリノエネルギーは π の運動量に比例するが、 $\theta=2.0, 2.5, 3.0$ では比例していない。T2K 実験ではこの効果を利用するために世界で初めて Off-axis 法を採用した。この方法はニュートリノのビーム軸を検出器方向からずらすことでエネルギー分布幅の狭いニュートリノスペクトルを得ることができる方法である。これによりスーパーカミオカンデにおいてニュートリノの振動確率が最大 (0.5-0.7 GeV 付近) となるようなエネルギー分布幅の狭いニュートリノスペクトルが得られ、バックグラウンド事象を起こす高いエネルギーのニュートリノの数を抑えることができる。(図 1.9)

この T2K 実験において、スーパーカミオカンデでニュートリノ - 酸素相互作用に従う核脱励起ガンマ線を観測することによって、ニュートリノ - 酸素中性カレント準弾性 (NCQE) 反応断面積が得られた。

1.6 NCQE 反応断面積

T2K 実験では、ニュートリノと酸素原子核との中性カレント準弾性散乱 (NCQE: Neutral Current Quasi-Elastic scattering) による反応断面積が測られている。スーパーカミオカンデの水タンク内でニュートリノと水中の酸素原子核の核子 N (中性子または陽子) が NCQE 反

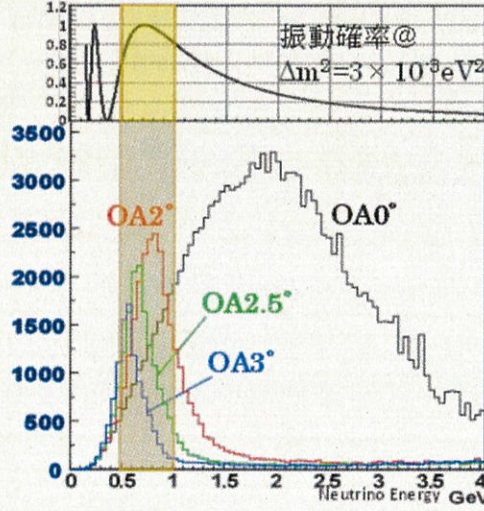


図 1.9: ニュートリノ振動確率 (上) と Off-axis 法によるニュートリノエネルギー分布 (下)

応をすると

$$\nu + N \rightarrow \nu + N + \gamma \quad (1.15)$$

となり、この時に出的ガンマ線が水中の荷電粒子にエネルギーを与え、チェレンコフ光として観測される。ニュートリノと酸素原子核との NCQE 反応は T2K RUN1-3 (15ヶ月間) では 43 イベント観測された。RUN1 は 2010 年 1 月 ~ 2010 年 6 月、RUN2 は 2010 年 11 月 ~ 2011 年 3 月、RUN3 は 2012 年 3 月 ~ 2012 年 6 月である。ニュートリノと酸素原子核との NCQE 反応断面積の測定値 $\langle \sigma_{\nu, NCQE}^{obs} \rangle$ は

$$\langle \sigma_{\nu, NCQE}^{obs} \rangle = \frac{N^{obs} - N_{bkg}^{exp}}{N^{exp} - N_{bkg}^{exp}} \langle \sigma_{\nu, NCQE}^{theory} \rangle \quad (1.16)$$

で決まる。ここで、観測されたイベント数 $N^{obs} = 43$ 、期待されたイベント数 $N^{exp} = 51.0$ 、期待されたバックグラウンドのイベント数 $N_{bkg}^{exp} = 16.2$ 、理論予想値 $\langle \sigma_{\nu, NCQE}^{theory} \rangle = 2.01 \times 10^{-38} \text{cm}^2$ [4] であり、

$$\langle \sigma_{\nu, NCQE}^{obs} \rangle = (1.55 \pm 0.395(stat.)_{-0.33}^{+0.65}(syst.)) \times 10^{-38} \text{cm}^2 \quad (1.17)$$

となる。今後、統計をためて統計誤差は小さくできるが系統誤差が支配的になる。系統誤差の主な原因は、二次ガンマ線の放出の不確実性である。二次ガンマ線の概略図を図 1.10 に示す。まず、ニュートリノと酸素原子核が反応し、核子 (中性子 n または陽子 p) と脱励起によ

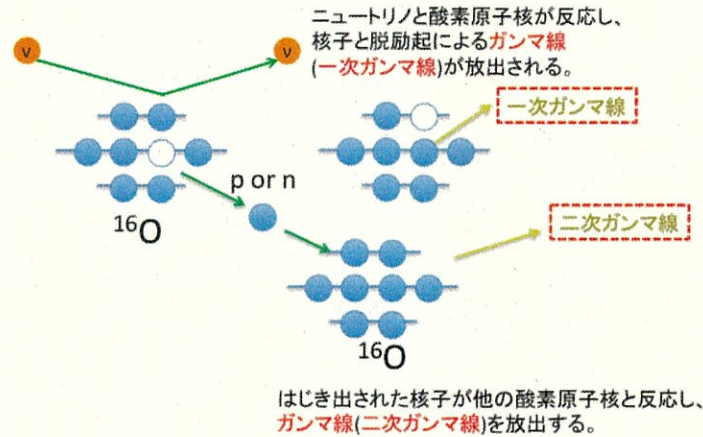


図 1.10: 二次ガンマ線

る一次ガンマ線 (Primary Gamma) が放出され、



または



となる。次に、はじき出された核子 N(中性子 n または陽子 p) が他の酸素原子核と反応し、二次ガンマ線 (Secondary Gamma) が放出される。この二次ガンマ線の放出の不確実性がチェレンコフ光の放出角度に影響する。スーパーカミオカンデにおいてチェレンコフ光の放出角度は 3-hit-pmt 角度から決定される。まず、ヒット PMT の 3 本 1 セットの組を作り、バーテックスから一意な円錐が描けるので、そこから 3-hit-pmt 角度を計算する。そして、これを全ての組に対して行い、最大の 3-hit-pmt 角度がチェレンコフ光の放出角度 (Cherenkov Angle) として選ばれる (図 1.11)。チェレンコフ光の放出角度は 42 度になるか、もし複数のガンマ線が出た場合は大角度 (～90 度) になる (図 1.12)。チェレンコフ光の放出角度が大きいところでは、データのイベント数はシミュレーションより少ない (図 1.13)。二次ガンマ線が電磁シャワーを起こして、チェレンコフ光として観測されるが、スーパーカミオカンデでは一次ガンマ線と二次ガンマ線の時間的な区別が困難であり、一次ガンマ線と二次ガンマ線が一つのイベントとして観測される。複数の二次ガンマ線は広く分布し、チェレンコフ光の放出角度が大角度になりやすい。この二次ガンマ線を正確に計測することで系統誤差を減らすことができる。

本論文では、この二次ガンマ線起源の系統誤差を抑えるための研究を行った。まず、様々

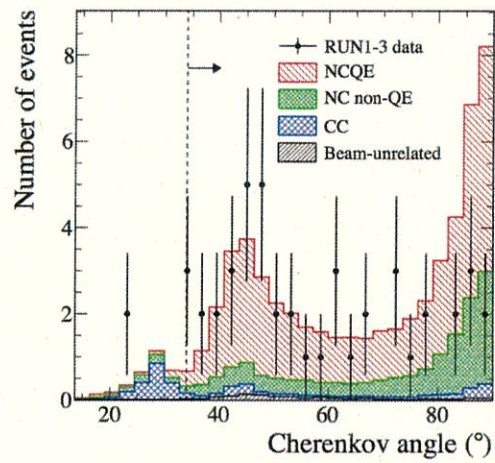


図 1.13: チェレンコフ光の放出角度

なシミュレーションでのガンマ線のエネルギーの比較を行う。次に、将来の実験に向けた 2 つの予備実験の結果を報告する。

第2章 水に中性子を入射するシミュレーション

2.1 GEANT3

GEANT はシミュレーションソフトウェアのシリーズ名である。物質中を通過する素粒子の輸送を扱うために設計された。モンテカルロ法を使っている。名前の由来は「GEometry ANd Tracking」の頭文字である。本来は高エネルギー物理学実験のために CERN で開発されたが、GEANT3 は他の多くの分野で使用されてきた。

T2K 実験の SK シミュレーションは GEANT3 (GCALOR) が使われている。GCALOR は GEANT3 のパッケージの 1 つで、20 MeV 以上は NMTC、20 MeV 以下は MICAP というシミュレータが使われている。MICAP は 20 MeV 以下の低エネルギーの中性子輸送を高精度で扱うことができる。まずは、GEANT3 (GCALOR) でシミュレーションを行った。シミュレーションで設定した条件を図 2.1 に示す。Z 軸を中心に半径 20 m、高さ 40 m の円筒を水

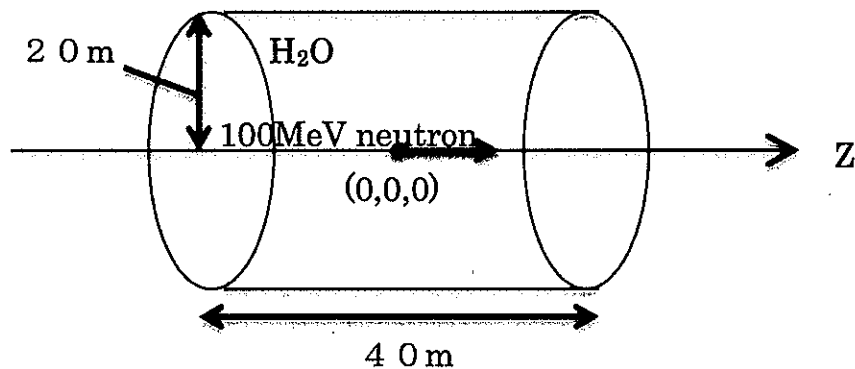


図 2.1: シミュレーションで設定した条件

で満たし、その中心 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ から Z 軸方向に 100 MeV の中性子を 10 万発入射した。これは仮想スーパーカミオカンデの形状であり、全ての中性子の反応が十分に水タンクの中で起こるサイズである。以下のシミュレーションは同じ条件である。

まず、一次ガンマ線放出から二次ガンマ線放出までの時間を図 2.2 に示す。二次ガンマ線放

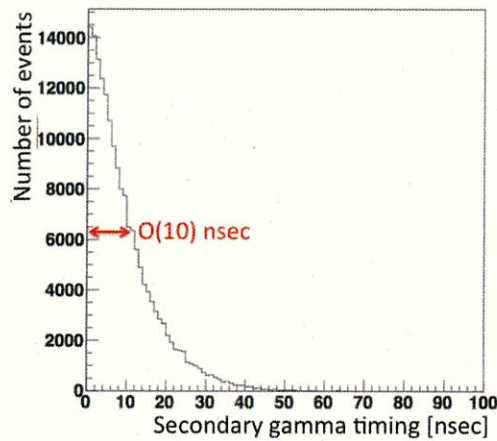


図 2.2: 一次ガンマ線放出から二次ガンマ線放出までの時間

出は一次ガンマ線放出の $O(10)\text{nsec}$ のオーダー以内で起こることが分かる。一方、スーパーカミオカンデでは、チェレンコフ光を捉えた光電子増倍管からエネルギーを再構成するが、その時間分解能も $O(10)\text{nsec}$ のオーダーである。よって、再構成される1つのイベントに一次ガンマ線と二次ガンマ線が両方入る。そのため、スーパーカミオカンデでは一次ガンマ線と二次ガンマ線を時間的に区別することは困難である。

次に、二次ガンマ線のエネルギー分布を図 2.3 に示す。脱励起ガンマ線は特徴的なピーク

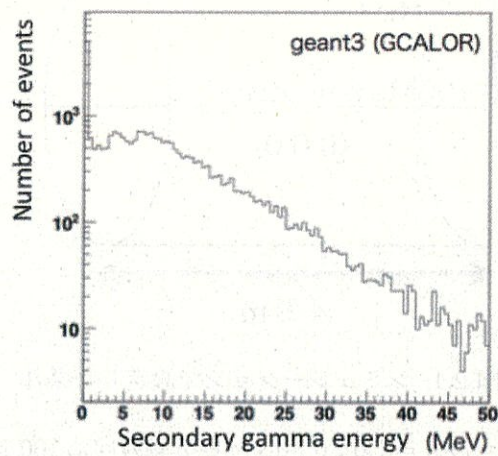


図 2.3: 二次ガンマ線のエネルギー分布

が現れるはずだが、ピークがない。二次ガンマ線には脱励起ガンマ線も含まれるので、ある

一定のエネルギーピークがあるはずである。GEANT3 (GCALEOR) では二次ガンマ線の脱励起ピークを十分に再現できていない可能性がある。

最後に、中性子と中性子起源のガンマ線のエネルギー分布を図 2.4 に示す。2つのモデルが

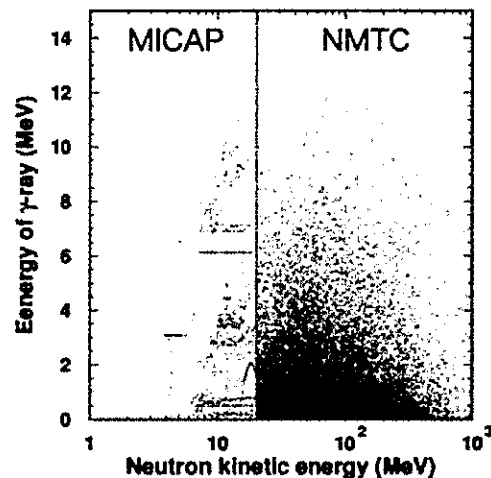


図 2.4: 中性子と中性子起源のガンマ線のエネルギー分布

組み合わされて使われているので境界ができています。その境界の前後で分布が顕著に異なっているなのでこのシミュレーションは正確とは言えない。よって、正確かどうかを確かめるために、他のシミュレーションツールを使って比較する必要があります。GEANTシリーズでは、GEANT3の開発が終わり、後続のシミュレーションソフトウェアとして GEANT4 が開発されている。次は、GEANT4 でシミュレーションを行う。

2.2 GEANT4

GEANT4 は、ガンマ線・陽子・中性子・電子などの素粒子が物質中で起こす複雑な振る舞いや反応を正確にシミュレートする大規模ソフトウェアである。高エネルギー物理学や宇宙線、原子核の実験などで結果を出すのに不可欠なものである。例えば、理論が予測する事象が実験装置によりどの様に観測されるかをシミュレートし、実験での観測結果と比較して最終結果を出すために用いられている。さらに、放射線医学治療、宇宙工学などの分野でのシミュレーションにも応用されている。

GEANT4 (QGSP_BIC_HP) でシミュレーションを行った。QGSP_BIC_HP は高エネルギー物理分野で使用が推奨されているパッケージの 1 つである。また、20 MeV 以下の中性子に対して高精度の中性子輸送モデルが用いられている。シミュレーションで設定した条件は

GEANT3で図2.1に示した条件と同様である。Z軸を中心に半径20 m、高さ40 mの円筒を水で満たし、その中心 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ からZ軸方向に100 MeVの中性子を10万発入射した。以下のシミュレーションは同じ条件である。

まず、中性子起源のガンマ線のエネルギー分布を図2.5に示す。脱励起ガンマ線は特徴的な

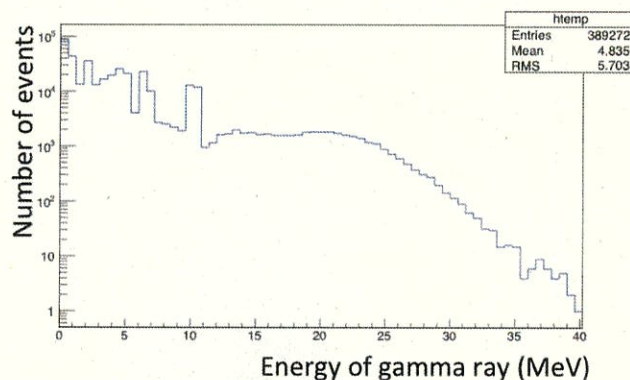


図 2.5: 中性子起源のガンマ線のエネルギー分布

ピークが現れるはずである。GEANT3 (GCALOR) の場合と異なり、GEANT4 (QGSP_BIC_HP) は脱励起のエネルギーピークがより考慮されていることが分かる。

次に、中性子と中性子起源のガンマ線のエネルギー分布を図2.6に示す。GEANT3 (GCALOR)

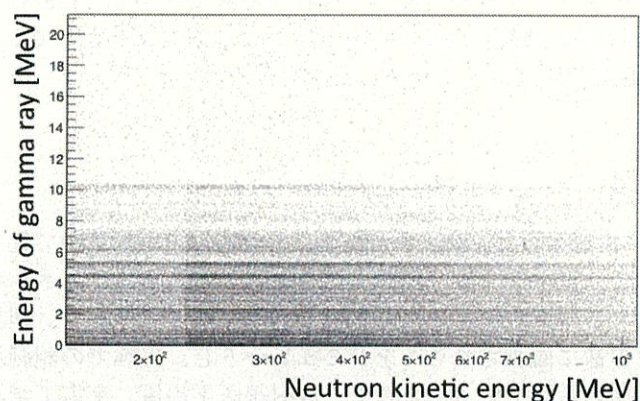


図 2.6: 中性子と中性子起源のガンマ線のエネルギー分布

と同様に GEANT4 (QGSP_BIC_HP) もモデルの境界ができており、シミュレーションが不

正確である可能性がある。そこで、実際に中性子ビームによる水中でのガンマ線生成の測定を考えた。中性子ビームを用いた実験については次章で詳しく説明する。

また、入射粒子を中性子から陽子に変更してシミュレーションを行った。中性子入射と陽子入射 (100 MeV) を図 2.7 に示す。粒子 1 発入射ごとのガンマ線の数を表している。赤線が

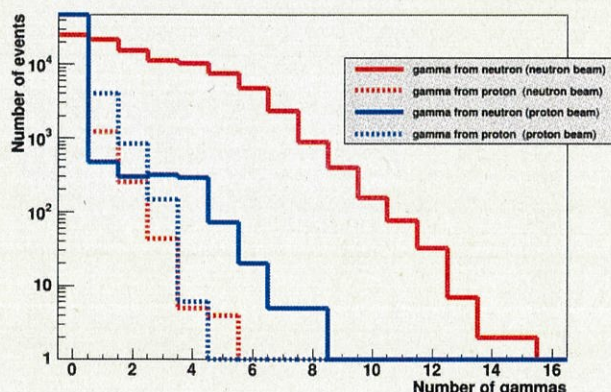


図 2.7: 中性子入射と陽子入射 (100MeV)

中性子入射で青線が陽子入射の場合である。そして、実線が中性子起源のイベント数で点線が陽子起源のイベント数である。ここまで、二次ガンマ線の数を知るために中性子を入射してきたが、二次ガンマ線は陽子または中性子が酸素原子核と反応することにより発生する。つまり、陽子を入射しても二次ガンマ線の数を知ることができる。しかし、図 2.7 にある通り、中性子と陽子のどちらを入射しても陽子起源よりも中性子起源のガンマ線のイベント数の方が多い。これは、陽子が電荷を持つために水中のイオンで散乱され、核子を叩き出す反応が起きる前にエネルギーを失うからである。よって、中性子が核子を叩き出すイベントの方が 10^2 のオーダーで多いので中性子ビームでの実験を考えた。

最後に、実際の実験環境を考慮した設定でのシミュレーションを行った。シミュレーションの設定を図 2.8 に示す。直径 30 cm、長さ 30 cm の円柱形の水に 100 MeV の中性子を 10 万発入射した。そして、水の外まで出てくるガンマ線をカウントした。水の外に出てくるガンマ線のエネルギー分布を図 2.9 に示す。水の外まで出てくるガンマ線のほとんどが中性子起源のガンマ線である。したがって、水標的の大きさを直径 30 cm、長さ 30 cm の円柱形にすれば、中性子起源のガンマ線を測定することができると考えられる。また、通常では、NCQE 反応の二次ガンマ線は複数放出されるので、複数のガンマ線を足しあげたエネルギーを観測してしまう。しかし、水標的の大きさが直径 30 cm、長さ 30 cm であれば二次ガンマ線 1 つあたりのエネルギーを測定することができる。よって、中性子ビーム実験の水標的の大きさとして直径 30 cm、長さ 30 cm の円柱を採用した。この実験については次章の実験 1

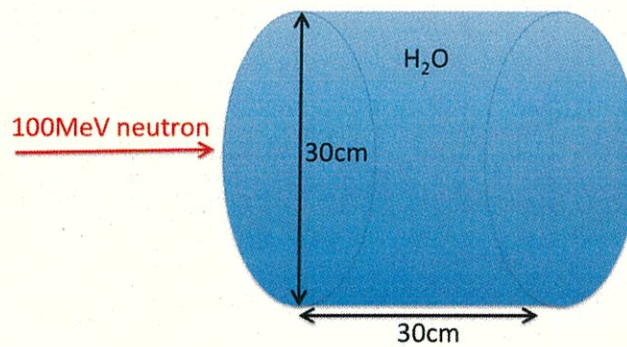


図 2.8: Geant4 シミュレーションの設定

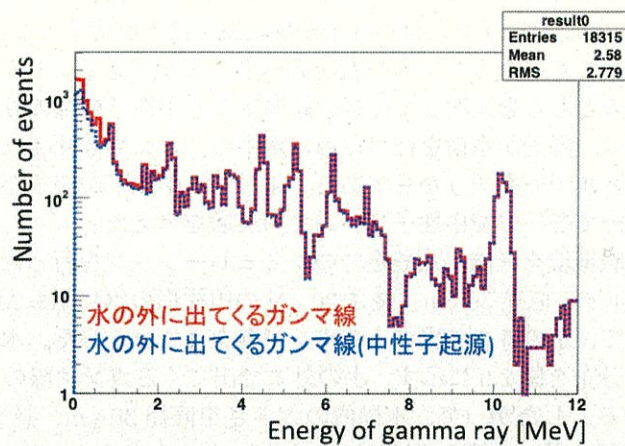


図 2.9: 水の外に出てくるガンマ線のエネルギー分布

で詳しく説明する。

2.3 PHITS

PHITS は、任意の体系における様々な放射線の挙動を、核反応モデルなどを用いてシミュレーションするモンテカルロ計算コードである。開発は日本原子力研究開発機構 (JAEA) 等で行われている。幅広いエネルギー範囲の全ての放射線の挙動を解析可能なことが特徴である。

前節の GEANT4 と同様の直径 30 cm、長さ 30 cm の円柱形の水ターゲットを設定し、PHITS を用いて水と中性子の散乱シミュレーションを行った。水ターゲットの周りを全て NaI で覆い、80 MeV の中性子を入射した時の中性子が水によって散乱される影響を調べた。シミュレーションの設定を図 2.10 に示す。ここに 80 MeV の中性子を $(x, z) = (0, -50)$

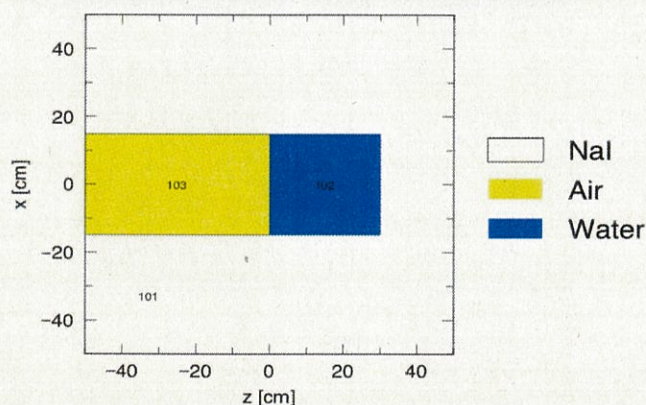


図 2.10: シミュレーションの設定

から +Z 軸方向に ± 15 cm のビーム幅で入射した。この時、NaI シンチレーターで検出できるスペクトルを図 2.11 に示す。水素原子核の中性子捕獲による 2.2 MeV と NaI シンチレーターに中性子が入ることによって発生する 6.8 MeV のガンマ線が検出されている。

ここで、中性子捕獲とは中性子が相手の原子核に吸収されてしまう反応である。熱中性子など、低速の中性子で重要な反応である。原子核の原子番号は変化せず、質量数が 1 増加する。その際、中性子の結合エネルギーに相当するガンマ線が放出される場合が多い。水素原子核 (^1H) に捕獲されると、重水素 (^2H) が生成されるとともに、2.2 MeV のガンマ線が放出される。

また、NaI シンチレーターに中性子が入射した場合、6.8 MeV に中性子によって生成されたガンマ線のピークが現れる。これは、 $^{22}\text{Ne}^*$ (6.852 MeV) の脱励起ガンマ線のピークだと

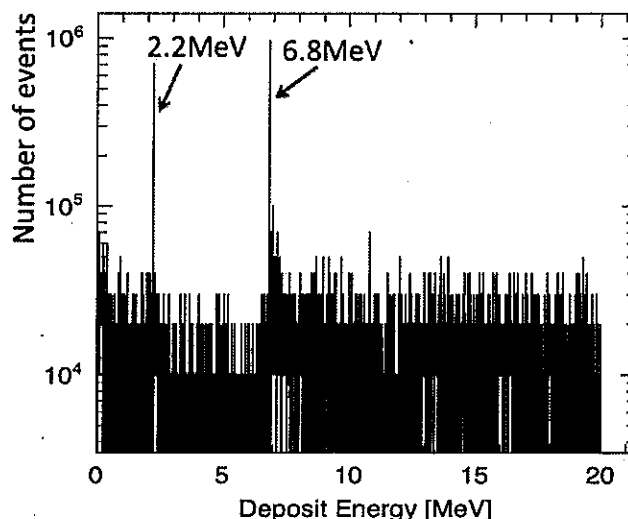
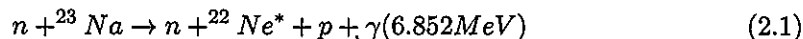


図 2.11: NaI シンチレーターで検出できるスペクトル

考えられる。



2.4 各シミュレーションでの比較

GEANT3、GEANT4、PHITS でシミュレーションの比較を行った。シミュレーションで設定した条件は GEANT3 で図 2.1 に示した条件と同様である。Z 軸を中心に半径 20 m、高さ 40 m の円筒を水で満たし、その中心 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ から Z 軸方向に 100 MeV の中性子を 10 万発入射した。

まず、各シミュレーションでのガンマ線の本数の比較を図 2.12 に示す。中性子ビーム 1 発あたり何本のガンマ線が発生したかを GEANT3、GEANT4、PHITS でそれぞれ数え上げ、比較した。GEANT3 では、ガンマ線を 1 本だけ出すイベントが極端に少ない。GEANT4 と PHITS では、そのような特徴はない。また、一度に 15 本以上ガンマ線を放出するイベント数は GEANT3 のみが多い。GEANT4 と PHITS はイベント数が近い。

次に、各イベントでのガンマ線のエネルギーの比較を図 2.13 に示す。発生したガンマ線のエネルギーは、GEANT4 と PHITS では、酸素原子核の脱励起による特徴的なピークが現れている。また、10 MeV 以上のガンマ線のイベント数は GEANT4 のみが多い。

シミュレーションの比較を中性子がエネルギーを落としきる十分な大きさの水を用いて行ったが、シミュレーションがすべて一致するわけではないことから、中性子の水中での反応を

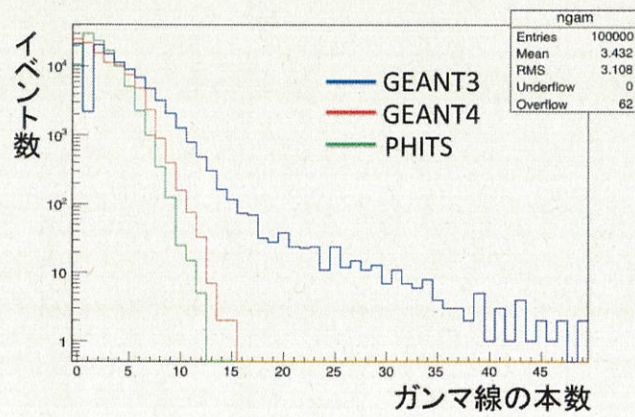


図 2.12: 各シミュレーションでのガンマ線の本数の比較

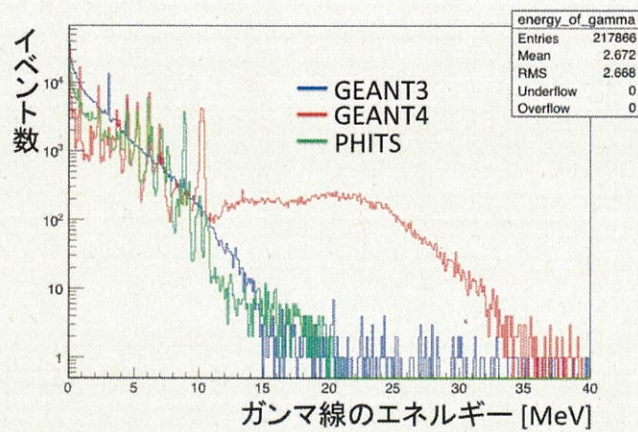


図 2.13: 各イベントでのガンマ線のエネルギーの比較

シミュレーションで理解するには限界がある。そこで、中性子ビームを用いた実験を考えた。
実験の詳細は次章で述べる。

O

O

第3章 中性子ビームを用いた実験

3.1 中性子ビーム

大阪大学核物理研究センター (RCNP: Research Center for Nuclear Physics) ではほぼ単色のエネルギーの中性子ビームを生成できる (図 3.1)。また、ターゲット回転装置を用いて 0 度から 25 度までの角度分布測定も可能である。図 3.1 は 392 MeV と 250 MeV の陽子を Li ターゲットに 0 度と 30 度の角度で照射した時のそれぞれの生成中性子のエネルギー分布である。

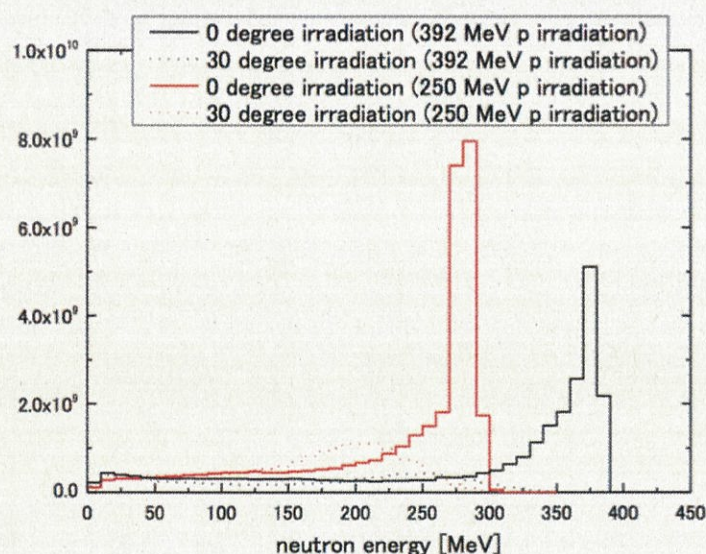


図 3.1: 生成中性子のエネルギー分布

大阪大学核物理研究センターの中性子ビームラインである N0 コースを図 3.2 に示す。N0 コースでは陽子ビームを Li ターゲットに当てて中性子ビームを作る。陽子ビームを Li ターゲットに照射した時に荷電粒子とガンマ線と中性子が発生する。この時に発生したガンマ線を Prompt Gamma と呼ぶ。荷電粒子は磁石で進路を曲げられビームダンプに送られるが、

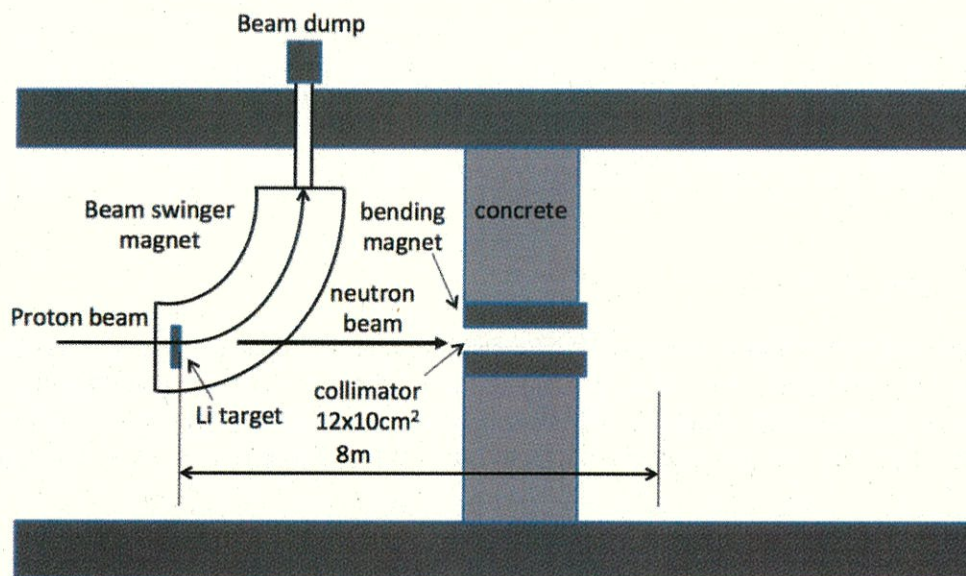


図 3.2: N0 コース

Prompt Gamma と中性子は直進し、コリメーターを通過する。コリメーターの後方には最大距離 100 m の ToF トンネルがあり、ここで測定を行うことができる。中性子ビームのエネルギーは Time Of Flight 法により計算される。Time Of Flight 法とは、ある速度 v を持った質量 m の粒子が一定の距離 (L) を移動した際、その飛行時間 (TOF) を計測することで、式 (3.1) により非相対論的な粒子のエネルギー (E) を求める方法である。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{L}{TOF}\right)^2 \quad (3.1)$$

N0 コースでは数 MeV から 400MeV までの中性子の放出・吸収を伴う原子核反応の精密測定が行われている。MeV 領域における準単色中性子源としては世界最高レベルの強度を誇り、中性子による原子核反応断面積、中性子遮蔽、中性子検出器の特性評価などの研究に利用されている。

このトンネル内に水標的とガンマ線検出器を設置して、中性子による水中で発生するガンマ線のエネルギー、数などを詳細に測定するのが本実験の最終目的である。しかし、その前にバックグラウンド測定や使用する検出器の選定など、予備実験を行う必要がある。次節以降で実際に中性子ビームを用いた実験についての結果を報告する。

3.2 実験 1

3.2.1 実験 1 概要

2015 年 1 月 22 日に E361 実験のパラサイト実験として RCNP ToF トンネル内での水ターゲット設置時の環境データを取得した。入射中性子として約 80 MeV の中性子ビームを用いた(図 3.3)。図 3.3 は E361 実験の液体シンチレータで取得した中性子ビームのエネルギー分布である。76 MeV あたりのほぼ単色なビームであることがわかる。

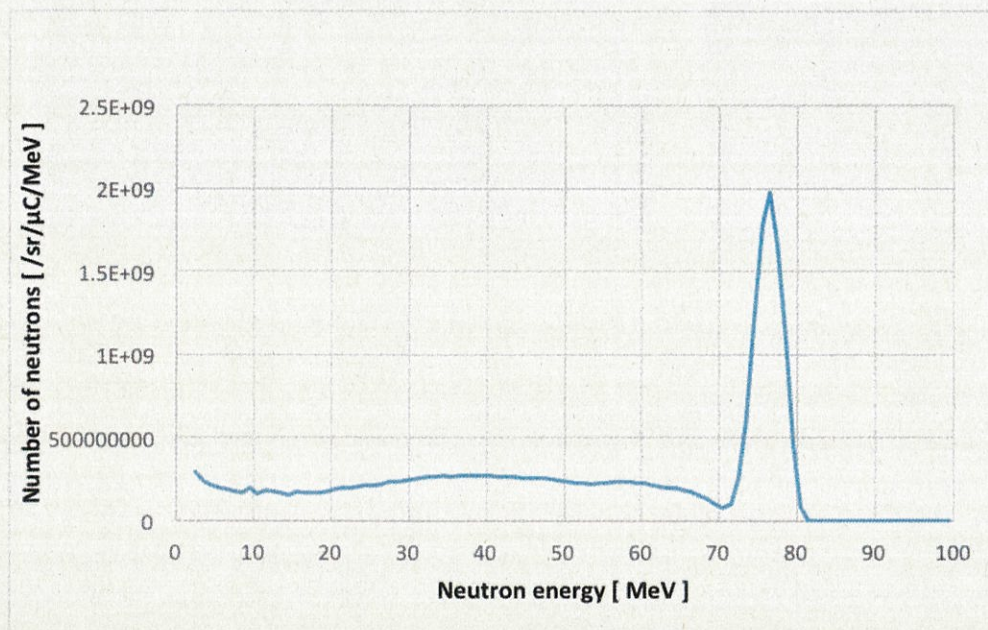


図 3.3: Neutron beam energy

水ターゲットとして直径 30 cm、高さ 30 cm のアクリル容器にスーパーカミオカンデの水を入れた (図 3.4)。セットアップは水ターゲットを中性子ビームラインの射線上に置き、その横に NaI(Tl) 検出器を置いた (図 3.5)。

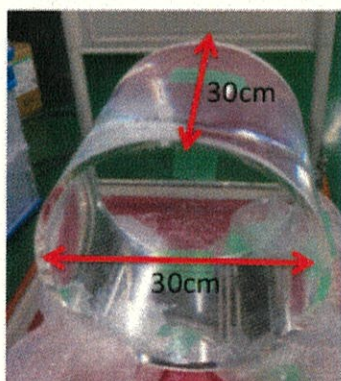


図 3.4: アクリル容器

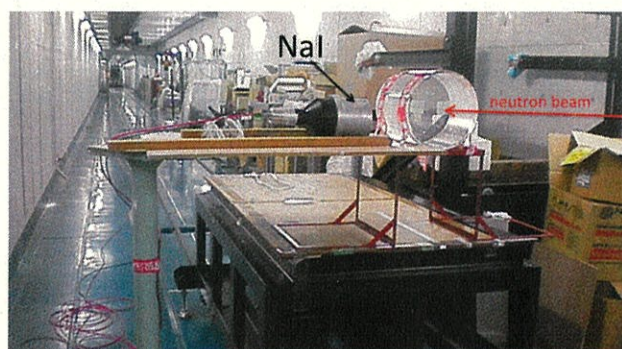


図 3.5: セットアップ

具体的なセットアップを図 3.6 と図 3.7 に示す。

アクリル容器と中性子の反応を見るために、水を抜いたアクリル容器をターゲットとした測定も行った。測定時間は水を入れたアクリル容器で 1248 sec、水を抜いたアクリル容器で 548 sec であった。この測定において、時間データ取得のためのセットアップができていなかったため、ビーム相関のデータはないが、中性子ビーム実験の環境データを取得できた。表 3.1 に各データの測定時間、入射中性子数、全イベント数をまとめる。エネルギー較正用のデータは ^{60}Co と $^{241}\text{Am/Be}$ 線源で取得した。

表 3.1: 測定情報

	測定時間	入射中性子数	全イベント数
水を入れたアクリル容器	1248 sec	2.77×10^7	632970
水を抜いたアクリル容器	548 sec	1.22×10^7	148827
^{60}Co	319 sec	0	234572
$^{241}\text{Am/Be}$	39 sec	0	536540

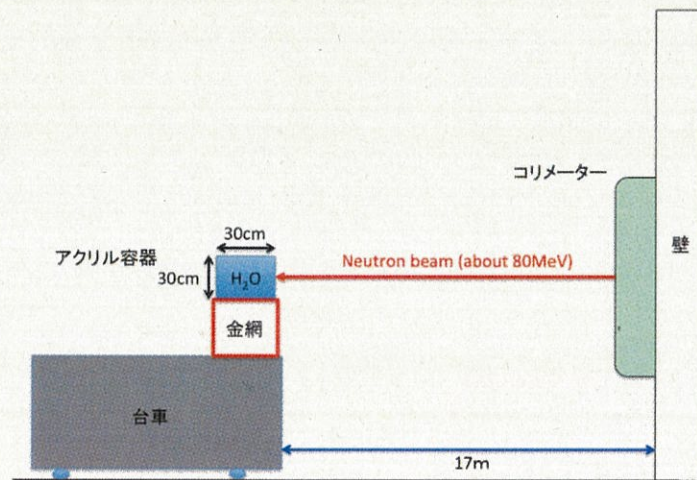


図 3.6: セットアップ (横から見た図)

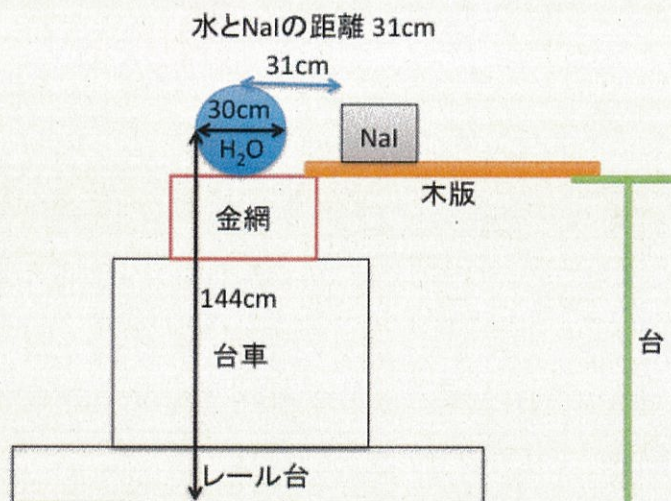


図 3.7: セットアップ (ビーム軸方向)

3.2.2 実験1 エネルギー較正

^{60}Co と $^{241}\text{Am/Be}$ はガンマ線源である。 ^{60}Co は 1.17 MeV と 1.33 MeV のガンマ線を放出し、1.17 MeV と 1.33 MeV が同時に検出器に入ると 2.5 MeV のエネルギーピークが検出される。 $^{241}\text{Am/Be}$ は 4.44 MeV のガンマ線を放出する。4.44 MeV のガンマ線は電子対生成を起こす。シングルエスケープピークは 3.93 MeV、ダブルエスケープピークは 3.42 MeV となる。 $^{241}\text{Am/Be}$ では 3.42 MeV と 3.93 MeV と 4.44 MeV のガンマ線のエネルギーピークが検出される。これらの検出ピークをエネルギー較正に使う。 ^{60}Co と $^{241}\text{Am/Be}$ のガンマ線検出結果を図 3.8 に示す。NaI(Tl) 検出器のエネルギー分解能が悪く、 ^{60}Co では 2.5 MeV 起

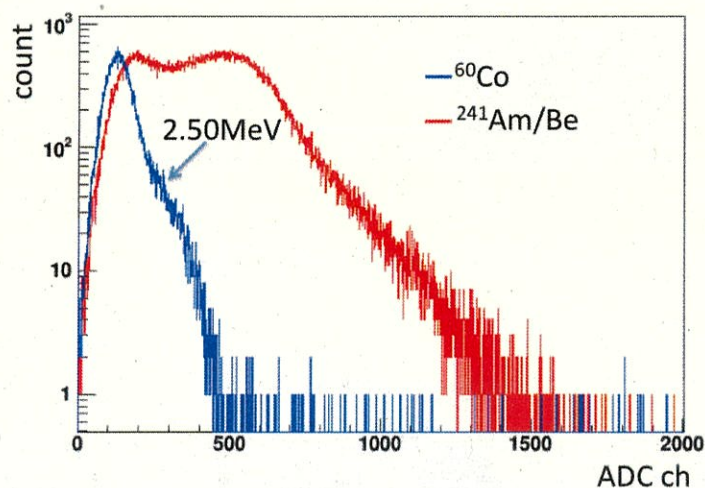


図 3.8: ^{60}Co と $^{241}\text{Am/Be}$

因のエネルギー分布の肩のみが見られ、 $^{241}\text{Am/Be}$ の 3 つのピークは 1 つにまとまっている。 $^{241}\text{Am/Be}$ のガンマ線エネルギーのフィッティング手法を図 3.9 に示す。まず始めに GEANT4 で NaI の結晶を定義し、そこに 4.4 MeV のガンマ線を入射するシミュレーションを行った (図 3.9 の緑色)。GEANT4 のシミュレーション結果のエネルギー [MeV] に、エネルギーと ADC チャンネルの変換ファクターおよびエネルギー分解能をフリーパラメータとして、GEANT4 のスペクトルが実際のデータスペクトルに合うようにフィットした。エネルギー較正の結果を図 3.10 に示す。これより $E[\text{MeV}] = 0.0063ch + 0.9328$ の変換ファクターが得られた。

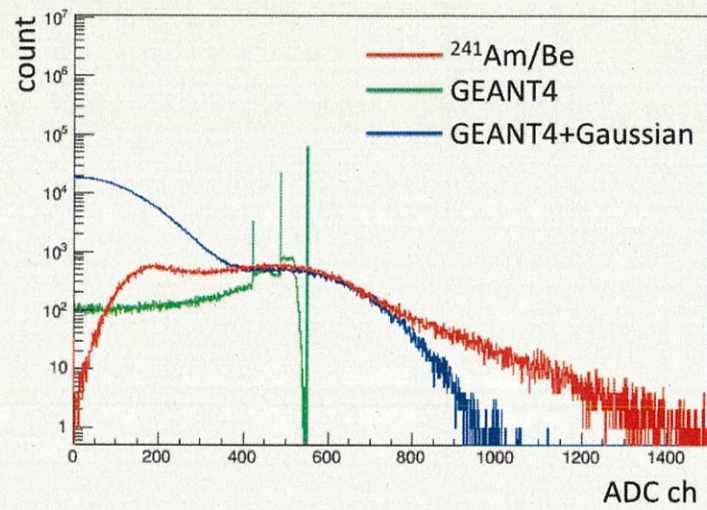


図 3.9: $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ のガンマ線エネルギーピークのフィッティング

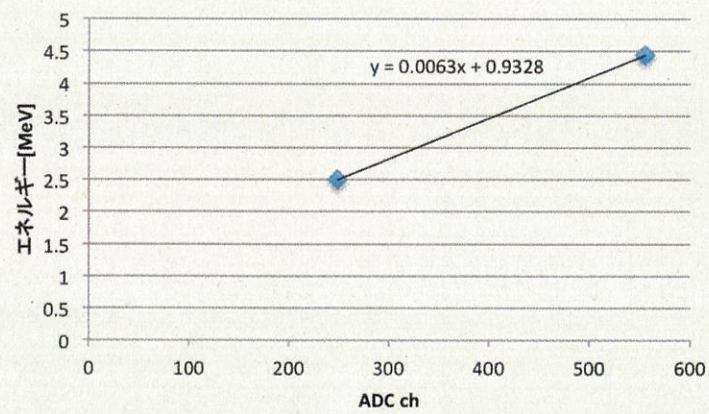


図 3.10: エネルギー較正

3.2.3 実験1 結果

水を入れたアクリル容器と空のアクリル容器を中性子ビームを照射するターゲットとして、発生するガンマ線を NaI(Tl) 検出器で測定した。水と中性子の反応から発生するガンマ線の測定において、水以外の物質の反応によるガンマ線の影響は除かなければならない。そのために、空のアクリル容器を中性子ビームのターゲットとしてガンマ線を測定した。水を入れたアクリル容器と空のアクリル容器の測定結果を比較することで、水と水以外の物質の反応を区別することができる。水を入れたアクリル容器と空のアクリル容器の比較を図 3.11 に示す。それぞれ測定時間 548 sec の時間で規格化している。図 3.11 より、まず、測定不可能になるような極端なバックグラウンドがないことがわかった。また、エネルギー分解能が非常に悪く、確実なことは言えないが 6 MeV 付近にガンマ線イベントがあることも示唆している。

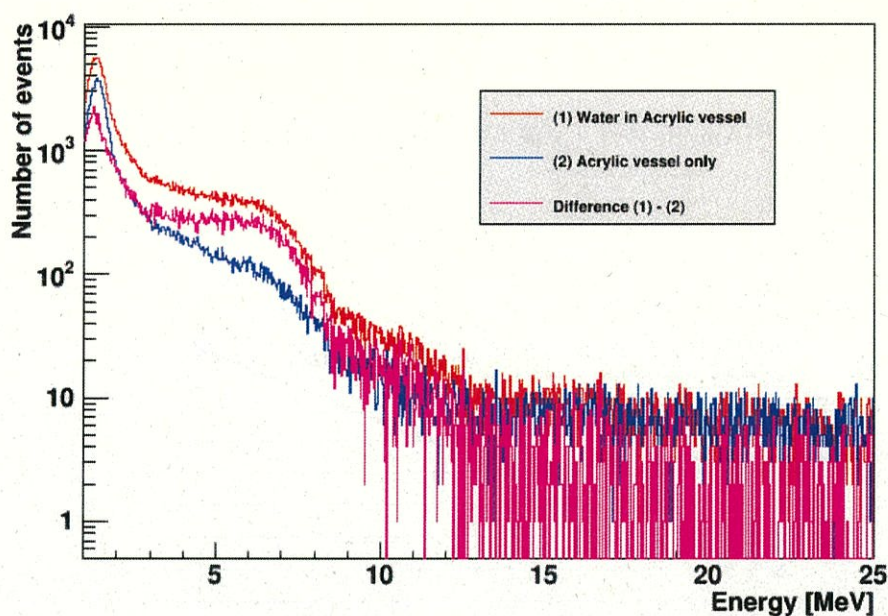


図 3.11: 水を入れたアクリル容器と空のアクリル容器の比較

3.3 実験2

3.3.1 実験2 概要

2015年6月16日から2015年6月18日にE400実験のパラサイト実験として、中性子ビームによるイベントとToFトンネル内のビームに相関するバックグラウンドを測定した。ADCとTDCを用いてエネルギー、時間の両データを取得した。キャリブレーションデータは ^{60}Co と $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ で取得した。Liターゲットへの照射角度とビーム電流を変更してイベントを測定した。また、中性子ビームが発生していない時にToFトンネル内環境バックグラウンドを測定した。表3.2に各データのビーム電流、照射角度、測定時間をまとめる。

表 3.2: 測定情報

	ビーム電流	照射角度	測定時間
ビーム	5 nA	0 度	790.2 sec
ビーム	10 nA	10 度	904.0 sec
ビーム	20 nA	20 度	895.1 sec
バックグラウンド	0	-	34610.5 sec

この実験におけるセットアップを図3.12に示す。コリメータから38 m 地点に実験装置を置いた。ビームラインから異なる距離で3箇所にNaIシンチレータを設置した。

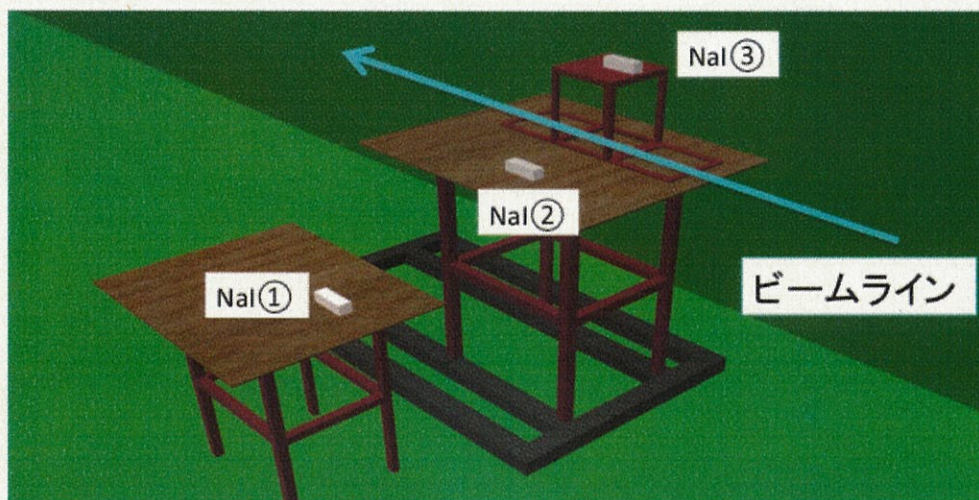


図 3.12: セットアップ

回路図を図 3.13 に示す。AVF(Azimuthally Varying Field) サイクロトロンの RF 信号と NaI シンチレータからの信号のコインシデンスをとり、それを TDC START とした。NaI シンチレータからの信号の 900 ns 後を TDC STOP とした。ADC のゲート幅は $1\ \mu\text{s}$ に設定し、Output Register から ADC 変換の終了信号が出力されるまでは次の信号を積分しない。これにより、ビーム相関のあるデータを取得できる。

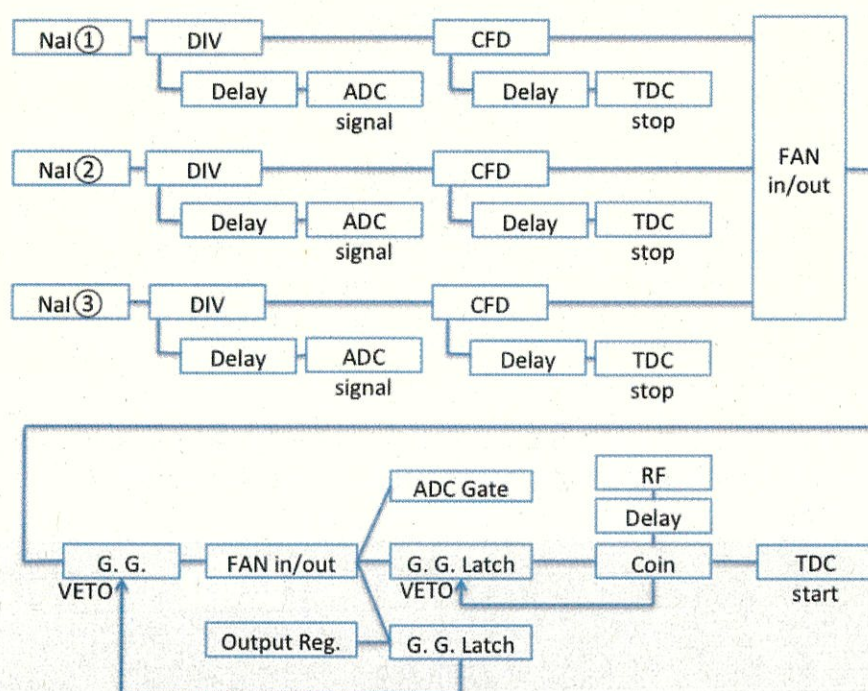


図 3.13: 回路図

RCNP の中性子ビームは距離に応じた広がりを持つ。コリメータから 38 m の地点では、図 3.14 のような広がりを持つ。照射角度 0 度の場合に NaI① を中性子ビームの当たらない位置、NaI② を中性子ビームの広がりの方の端の位置、NaI③ を中性子ビームが当たる位置に配置した。

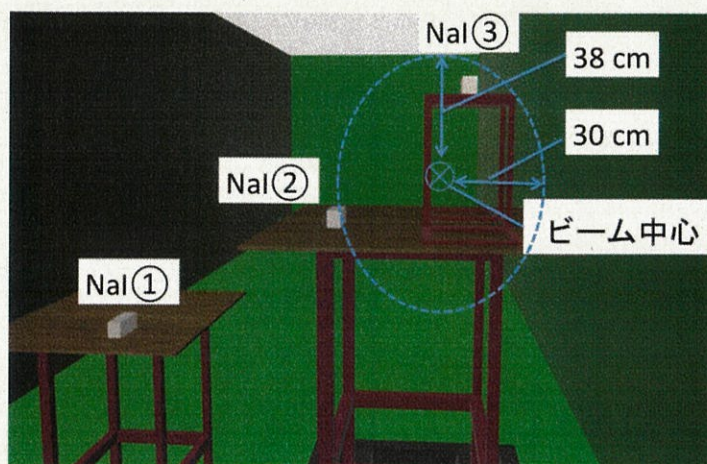


図 3.14: NaI の配置とビームの広がり

また、表 3.2 に示したように、この実験では Li ターゲットへのビーム照射角度を変更している。照射角度を変更すると、コリメータとビームラインが移動する (図 3.15)。このため、NaI② に角度 0 度で検出されなかった中性子イベントが角度 10 度と 20 度では検出されることが予想される。

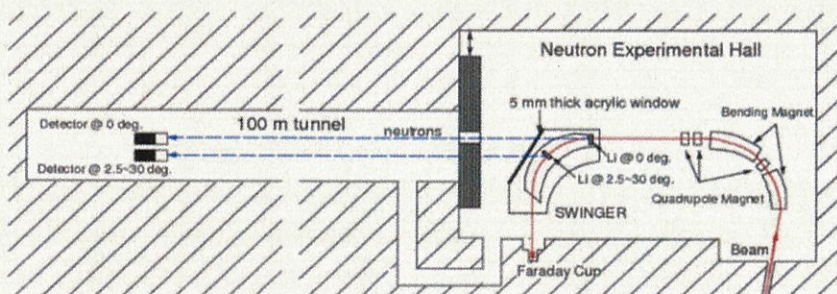


図 3.15: 角度の変更によるビームラインの移動

3.3.2 実験2エネルギー較正

^{60}Co と $^{241}\text{Am/Be}$ を用いた NaI① のエネルギー較正

まず、線源 ^{60}Co を用いた NaI① でのガンマ線測定結果を図 3.16 に示す。NaI① では ^{60}Co の 1.17 MeV と 1.33 MeV、それらを足した 2.5 MeV のエネルギーピークが確認できる。次に、線源 $^{241}\text{Am/Be}$ を用いた結果を図 3.17 に示す。3.42 MeV と 3.93 MeV と 4.44 MeV のガンマ線のエネルギーピークを検出した。エネルギー較正の結果を図 3.18 に示す。これより $E[\text{MeV}] = 0.0034ch - 1.0604$ となった。

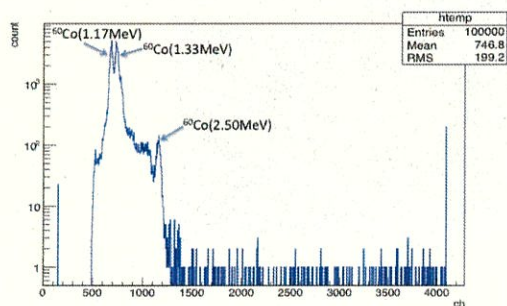


図 3.16: ^{60}Co NaI①

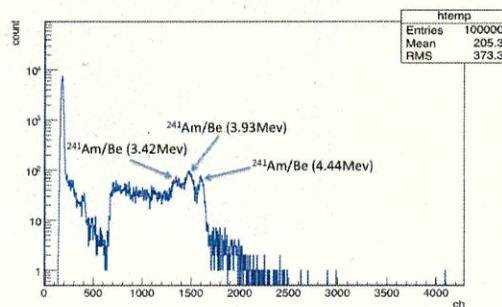


図 3.17: $^{241}\text{Am/Be}$ NaI①

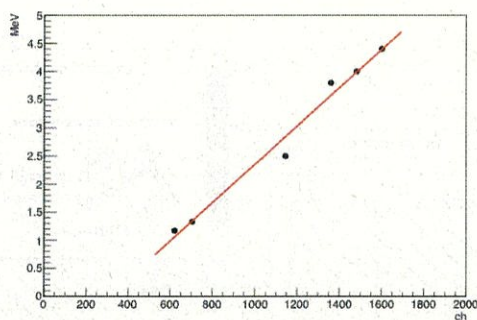


図 3.18: NaI① のエネルギー較正

^{60}Co と $^{241}\text{Am/Be}$ を用いた NaI② のエネルギー較正

まず、線源 ^{60}Co を用いた NaI② でのガンマ線測定結果を図 3.19 に示す。NaI② では ^{60}Co の 1.17 MeV と 1.33 MeV のピークがある。2.5 MeV のピークも確認できる。次に、線源 $^{241}\text{Am/Be}$ を用いた結果を図 3.20 に示す。3.42 MeV と 3.93 MeV と 4.44 MeV のピークが確認できる。エネルギー較正の結果を図 3.21 に示す。これより $E[\text{MeV}] = 0.0031ch - 1.0038$ となった。

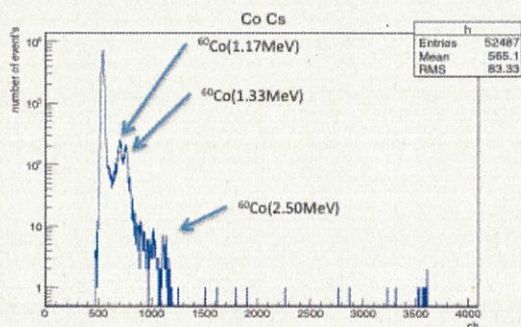


図 3.19: ^{60}Co NaI②

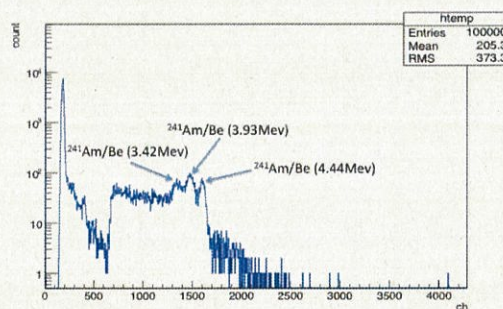


図 3.20: $^{241}\text{Am/Be}$ NaI②

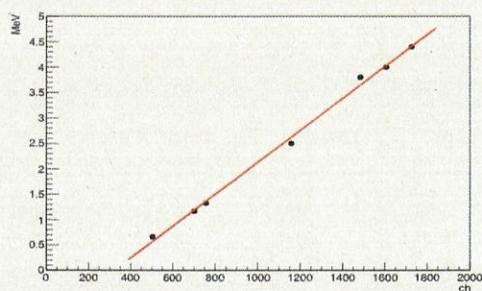


図 3.21: NaI② のエネルギー較正

^{60}Co と $^{241}\text{Am/Be}$ を用いた NaI③ のエネルギー較正

まず、線源 ^{60}Co を用いた NaI③ でのガンマ線測定結果を図 3.22 に示す。NaI③ では ^{60}Co の 1.17 MeV と 1.33 MeV と 2.5 MeV のピークがある。次に、線源 $^{241}\text{Am/Be}$ を用いた結果を図 3.23 に示す。3.42 MeV と 3.93 MeV と 4.44 MeV のピークが確認できる。エネルギー較正の結果を図 3.24 に示す。これより $E[\text{MeV}] = 0.0037ch - 1.2925$ となった。

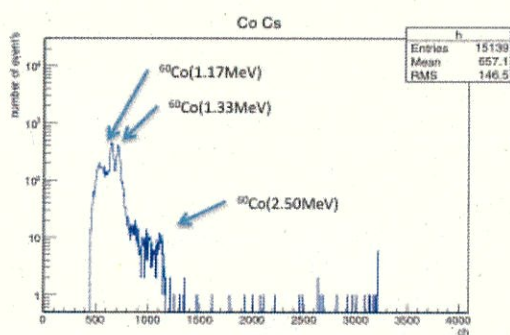


図 3.22: ^{60}Co NaI③

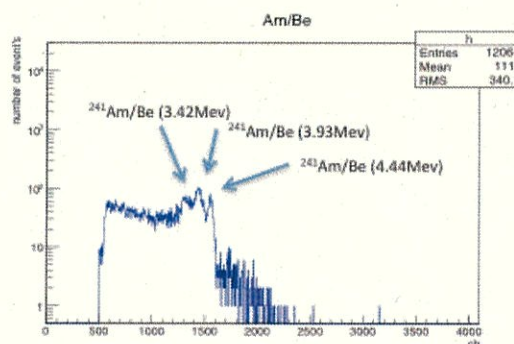


図 3.23: $^{241}\text{Am/Be}$ NaI③

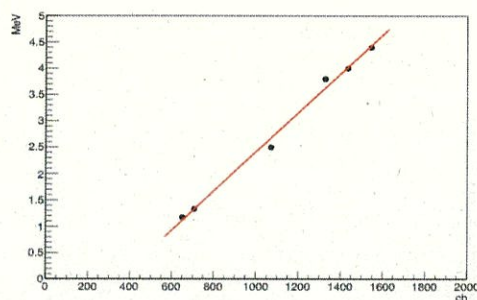


図 3.24: NaI③ のエネルギー較正

3.3.3 実験2結果

照射角度0度、10度、20度の中性子ビームでの時間分布、各 NaI とバックグラウンド比較を示す。

照射角度0度の中性子ビームでの時間分布

照射角度0度の中性子ビームでの TDC で測定した時間分布を図 3.25 に示す。照射角度0度の中性子ビームの場合、ビーム射線上の NaI③ に中性子があたっている(時間300 nsecあたりの広い分布)。しかし、ビームから離れた NaI① ではそのような広い分布がないことから、中性子がほとんど入射していない。図 3.25 の TDC の時間分布より、NaI③ では Prompt Gamma が 56.3 nsec に、中性子のピークが 319.4 nsec にある。このことから、中性子のエネルギーは 63.8 MeV と計算できる(計算方法の詳細は後述する)。

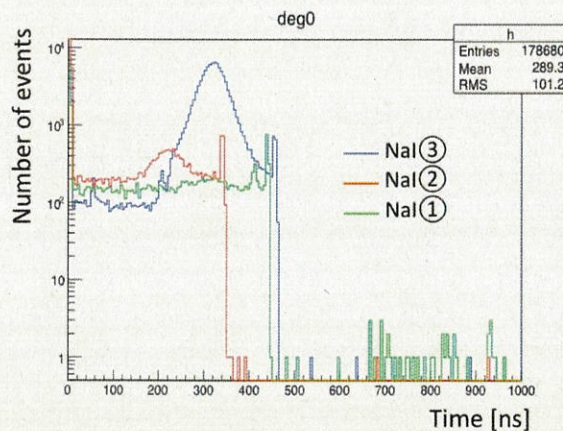


図 3.25: TDC の時間分布 (照射角度0度)

照射角度10度の中性子ビームでの時間分布

照射角度10度の中性子ビームでの TDC で測定した時間分布を図 3.26 に示す。照射角度10度の中性子ビームの場合、照射角度0度に比べ、NaI③ の中性子のピークがなまっている。また、NaI② に入射する中性子が増えている。そして、照射角度0度の中性子ビームと同様に、ビームから離れた NaI① では中性子は入射していない。図 3.26 の TDC の時間分布より、NaI③ では Prompt Gamma が 59.4 nsec に、中性子のピークが 316.4 nsec にある。このことから、中性子のエネルギーは 65.7 MeV と計算できる(計算方法の詳細は後述する)。

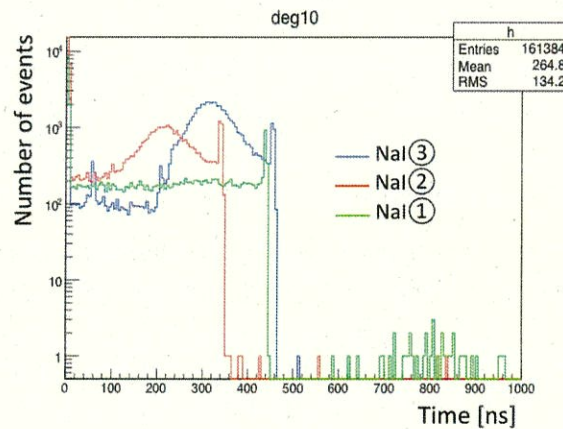


図 3.26: TDC の時間分布 (照射角度 10 度)

照射角度 20 度の中性子ビームでの時間分布

照射角度 20 度の中性子ビームでの TDC で測定した時間分布を図 3.27 に示す。照射角度 20 度の中性子ビームの場合、NaI②、NaI②の両方に中性子があたっているが、NaI③の中性子のピークが照射角度 10 度の場合よりもさらになまっている。そして、照射角度 0 度と 10 度の中性子ビームと同様に、ビームから離れた NaI①では中性子は入射していない。図 3.27 の TCD の時間分布より、NaI③では Prompt Gamma が 61.5 nsec に、中性子のピークが 332.4 nsec にある。このことから、中性子のエネルギーは 61.5 MeV と計算できる (計算方法の詳細は後述する)。

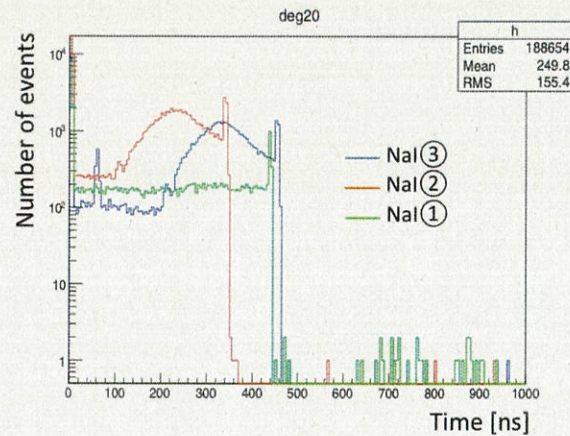


図 3.27: TDC の時間分布 (照射角度 20 度)

Prompt Gamma は中性子と同時に発生するが、中性子は光速ではないので Prompt Gammaの方がToFトンネル内で先に検出される。中性子ビームが入射するNaI③での時間情報を表3.3にまとめる。

表 3.3: TDC の時間分布と中性子のピークのエネルギー

照射角度	Prompt Gamma	中性子のピーク	中性子のピークのエネルギー
0 度	56.3 sec	319.4 sec	63.8 MeV
10 度	59.4 sec	316.4 sec	65.7 MeV
20 度	61.5 sec	332.4 sec	61.5 MeV

Prompt Gamma が NaI の位置 (Li からの距離 46 m) に到達する時間は、光速 $0.3 \times 10^9 m/sec$ なので、 $46m \div (0.3 \times 10^9 m/sec) = 153nsec$ である。中性子の飛行時間は表 3.3 の Prompt Gamma と中性子のピークの時間差に 153 nsec を足すと求められる。Time Of Flight 法の式 (3.1) より中性子のピークのエネルギーが分かるので表 3.3 にまとめる。この結果、全ての照射角度で中性子のエネルギーは約 60 MeV であることが分かった。

各 NaI とバックグラウンド比較 (照射角度 0 度)

・ 照射角度 0 度の中性子ビームにおいて、各 NaI のエネルギー分布とバックグラウンド比較する。NaI① の比較を図 3.28 に、NaI② の比較を図 3.29 に、NaI③ の比較を図 3.30 に示す。ここで、T2K 実験の SK イベントにおいてエネルギー再構成可能な下限の閾値は 3.5 MeV なので、3.5 MeV 以上のイベントの数が重要となる。よって、照射角度 0 度の各 NaI の 3.5 MeV 以上のイベントレートを表 3.4 に示す。図 3.25 の時間分布より NaI① は中性子ビーム

表 3.4: 各 NaI の 3.5 MeV 以上のイベントレート

	イベントレート
NaI①	0.87 event/sec
NaI②	1.98 event/sec
NaI③	60.26 event/sec

由来のイベントはなく、そのエネルギー分布は図 3.28 のようにほとんど環境バックグラウンドである。それに対し、時間分布より NaI② は、中性子ビームの端があたっていて、そのエネルギー分布は図 3.29 のようになる。また、時間分布より NaI③ は中性子ビームが直接あたっていて、そのエネルギー分布は図 3.30 のようになる。中性子が NaI(Tl) 検出器に直接当たると、広いエネルギー範囲に渡って中性子ビーム起源のイベントが観測される。表 3.4 の通り、3.5 MeV 以上のイベントレートは中性子ビームの当たり方に応じて高くなっている。

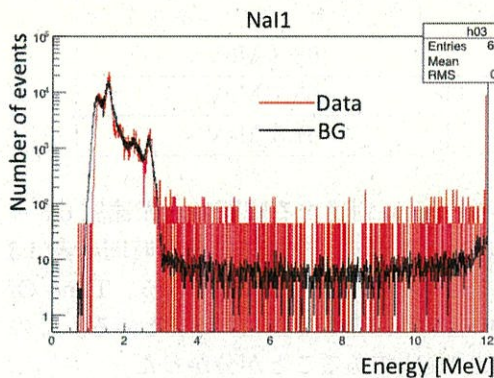


図 3.28: NaI① とバックグラウンド

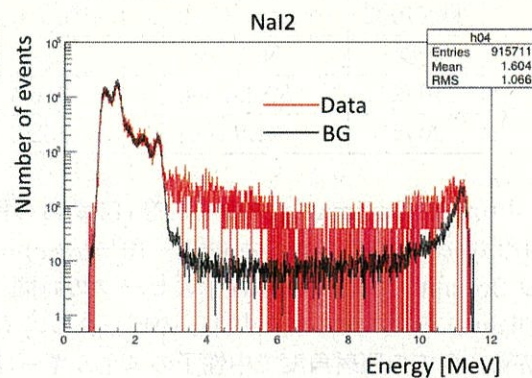


図 3.29: NaI② とバックグラウンド

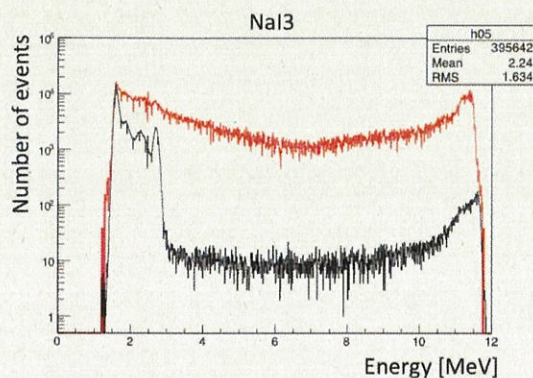


図 3.30: NaI③ とバックグラウンド

各 NaI とバックグラウンド比較 (照射角度 10 度)

照射角度 10 度の中性子ビームにおいて、各 NaI のエネルギー分布とバックグラウンド比較する。NaI① の比較を図 3.31 に、NaI② の比較を図 3.32 に、NaI③ の比較を図 3.33 に示す。また、照射角度 10 度の各 NaI の 3.5 MeV 以上のイベントレートを表 3.5 示す。図 3.26

表 3.5: 各 NaI の 3.5 MeV 以上のイベントレート

	イベントレート
NaI①	0.61 event/sec
NaI②	8.28 event/sec
NaI③	29.99 event/sec

の時間分布より NaI① は中性子ビーム由来のイベントはなく、そのエネルギー分布は図 3.31 のようにほとんど環境バックグラウンドである。それに対し、時間分布より NaI② は、中性子ビームが直接あたっていて、そのエネルギー分布は図 3.32 のようになる。また、時間分布より NaI③ は中性子ビームが直接あたっていて、そのエネルギー分布は図 3.33 のようになる。表 3.5 の通り、3.5 MeV 以上のイベントレートは中性子ビームの当たり方に応じて高くなっている。

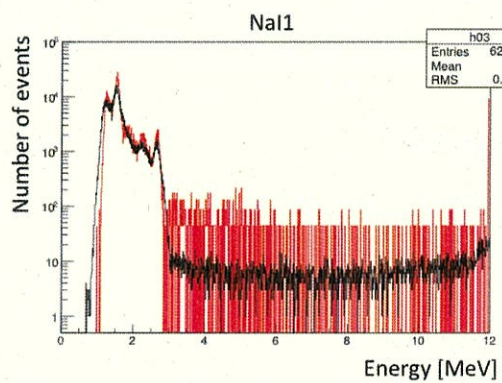


図 3.31: NaI① とバックグラウンド

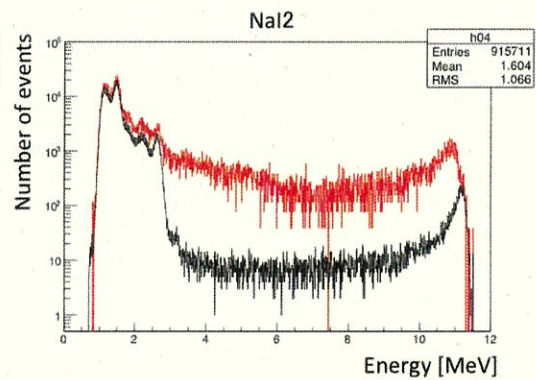


図 3.32: NaI② とバックグラウンド

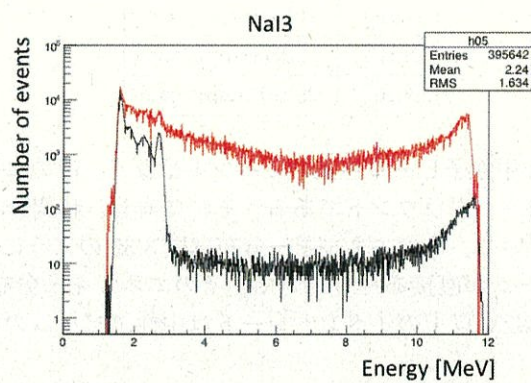


図 3.33: NaI③ とバックグラウンド

各 NaI とバックグラウンド比較 (照射角度 20 度)

照射角度 20 度の中性子ビームにおいて、各 NaI のエネルギー分布とバックグラウンド比較する。NaI① の比較を図 3.34 に、NaI② の比較を図 3.35 に、NaI③ の比較を図 3.36 に示す。また、照射角度 20 度の各 NaI の 3.5 MeV 以上のイベントレートを表 3.6 示す。図 3.27 の時

表 3.6: 各 NaI の 3.5 MeV 以上のイベントレート

	イベントレート
NaI①	0.62 event/sec
NaI②	22.11 event/sec
NaI③	22.02 event/sec

間分布より NaI① は中性子ビーム由来のイベントはなく、そのエネルギー分布は図 3.34 のようにほとんど環境バックグラウンドである。それに対し、時間分布より NaI② は、中性子ビームが直接あたっていて、そのエネルギー分布は図 3.35 のようになる。また、時間分布より NaI③ は中性子ビームが直接あたっていて、そのエネルギー分布は図 3.36 のようになる。表 3.6 の通り、3.5 MeV 以上のイベントレートは NaI② と NaI③ が同程度になっている。

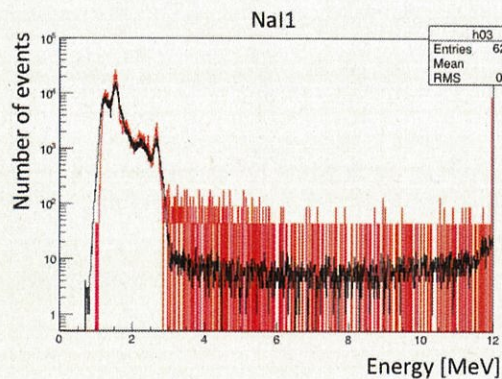


図 3.34: NaI① とバックグラウンド

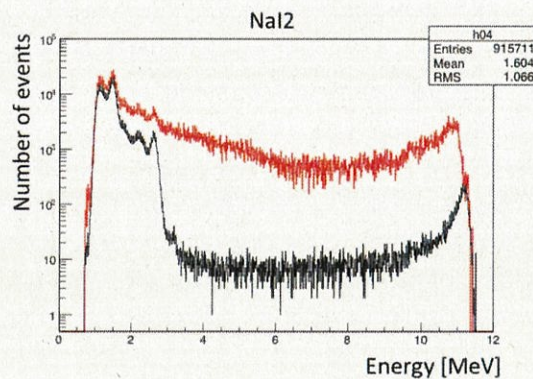


図 3.35: NaI② とバックグラウンド

バックグラウンド比較のまとめ

RCNP ToF トンネル内におけるバックグラウンドを測定した。この測定により、中性子ビームが直接当たらない場所 (NaI① の位置) では、ビームによるバックグラウンドは 0.6 ~ 0.8 Hz 程度であることが分かった。

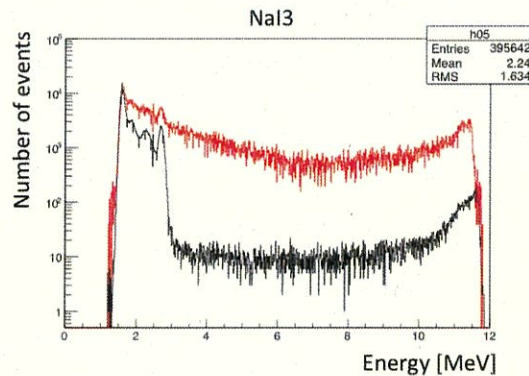


図 3.36: NaI③ とバックグラウンド

この実験は予備実験であるが、本番の実験では中性子ビームは Li ターゲットの照射角度 0 度で実験を行うので、照射角度 0 度の NaI① の 3.5 MeV 以上のイベントレート 8.7×10^{-1} Hz がバックグラウンドレートである。

一方、予測される中性子反応による信号数の見積もりは現時点では大きな不定性があるが、以下のように計算される。まず中性子ビームが水標的に当たるレートは E361 実験の結果から 2.22×10^4 neutrons/second と測定されている。これに中性子と酸素原子核の反応確率と NaI の検出効率をかければよい。前者はモデルにより大きく違うが、およそ数 10% と見積もられている。後者は簡単な検出器シミュレーションによるとこちらも約数% と見積もられた。その結果、予測される事象数は $O(10^1)$ Hz のオーダーとなる。これとバックグラウンドレートを比較すると、S/N 比はおおよそ二桁のオーダーになり、バックグラウンドレートは信号に比べ十分に小さいことが分かった。今後は、今年予定されている中性子ビーム実験によるテスト実験でさらに精度の高い見積もりを行なう予定である。

第4章 まとめと今後の展望

4.1 まとめ

T2K 実験では中性カレント弾性反応を脱励起ガンマ線の観測により測定できる。現時点での最大の系統誤差は二次ガンマ線のシミュレーションとデータの違いである。SK シミュレーションでは複数の二次ガンマ線を足し上げるので大角度チェレンコフイベントを出しやすい。この二次ガンマ線のエネルギーや数を精度よく測定できれば、その系統誤差を減らすことが期待できる。

そこで、GEANT3 と GEANT4 と PHITS で水への中性子入射シミュレーションの比較を行った。様々なシミュレーションの結果が大きく異なり、どのシミュレーションが正しいか判断できなかった。そのため実際に中性子ビームを使用してガンマ線を測定する実験を提案した。

将来の実験に向けた2つの予備実験を行った。1つ目の予備実験は直径 30cm、高さ 30cm の円柱形の水ターゲットへ 80MeV 中性子を入射し、水ターゲットの横 31cm の位置に設置した NaI(Tl) 検出器でガンマ線を測定した。測定不可能になるほどのバックグラウンド事象は観測されなかった。2つ目の予備実験は RCNP ToF トンネル内における中性子ビームに相関するバックグラウンド事象を測定した。中性子ビームが直接当たらない場所では、バックグラウンドは 0.87Hz であり、これは予測される信号レートに比べ桁程度低いことから、本実験では影響がない。

4.2 今後の展望

中性子ビームを水標的に当て、周囲をガンマ線検出器で覆い、十分なイベント数(数十万のイベント)のデータ取得を計画している。今年、すでにテスト実験が承認されており、ここではバックグラウンドの精密な見積もり、検出器の選定、水標的のサイズの決定などを行う予定である。さらにその結果をもとに、本実験を提案する予定である。

また、RCNP N0 コースの最大エネルギーである 392 MeV 中性子ビームを用いてデータを取得したい。T2K 実験におけるニュートリノのエネルギーは約 600 MeV である。このニュートリノと反応して放出される中性子のエネルギーは最大で数百 MeV 程度であり、このエネ

ルギー領域での測定は重要である。様々なエネルギーの中性子に対して実験を行うことで、発生ガンマ線の入射中性子エネルギー依存性も測定する計画である。

付 録 A GEANT4

A.1 GEANT4の設計概念

A.1.1 GEANT4のシミュレーション手法

シミュレーションは粒子進路に沿ったステップ (step) 単位で進行する。
ステップ単位で粒子と物質の相互作用 (物理:physics) が考慮される。
各々のステップ長は、相互作用の反応断面積を考慮し自動的に決定される。
粒子が構造物の境界面を通過すれば、通過点で一つのステップは終了する。
粒子の1ステップ長だけの時空間移動 (transportation) も相互作用として扱う。
粒子は運動エネルギーがゼロになれば停止し、ステップの進行は終了する。
一つの粒子を発生から停止まで進行させることを tracking と呼ぶ。

A.1.2 GEANT4における粒子と物質の相互作用過程の扱い

粒子は種類に応じて一連の相互作用過程 (processes) をリストとして持つ。
ユーザはリストの中の相互作用過程を取捨選択できる。
粒子の次の step 長を決定する際に、このリストにあるすべての過程を考慮する。
すべての過程の中で最短長で起こる過程が次の step 長を決める。

A.2 基本的なオブジェクト

A.2.1 基本的なオブジェクトとは？

Geant4 はオブジェクト指向言語である C++ で書かれたツールキットである。
シミュレーションを記述する際に必要となる「要素」はオブジェクト/クラスで表現される。
ユーザはユーティリティとして用意されたオブジェクト/クラスを用いてシミュレーションを作成する。
従って、ユーザは Geant4 で使われている基本的なオブジェクト/クラスの意味を知っておくことは重要である。

以下では基本的となるオブジェクト/クラスの意味をまとめる。また、必要に応じて新たなオブジェクト/クラスを説明する。

A.2.2 Run とは？

同一測定器、同一物理過程のもとで行ったシミュレーション事象の集まりである。

Run はプログラムにおける複数事象の処理ループとして表現される。

一つの Run の間はユーザは、測定器のセットアップや、シミュレーションで考慮される物理過程の変更は不可である。

Run という言葉は、粒子加速器実験で、粒子ビームの照射開始から終わりまでの一連の測定に対して名付けられたもの。Run は BeamOn(ビーム照射開始) で始まる。

A.2.3 Event とは？

Event(事象) の基本的な意味は、入射粒子 (一次粒子:複数可) が物質中を通過した際に生じる物理現象のすべてを指し、シミュレーションにおける表現の基本単位である。

一つの Event のシミュレーションが開始するにあたり、一次粒子を発生させる。これらの一次粒子 (Primary Particles) はプログラムのスタックに保持される。

一次粒子が一つ一つスタックから取り出され、粒子輸送 (Tracking) が実行される。

Tracking 中に生成される二次粒子は上記のプログラムのスタックに保持される。

Tracking はスタックが空になるまで続けられる。

A.2.4 Track とは？

Track とは粒子飛跡のスナップショットである。

Track は Tracking されている粒子の現時点での物理情報を保持する。過去の情報は保持しない。

Step(後述) は Tracking の最小単位である。Track の物理情報は Step として表現されている。[注]Track は複数の Step を記述しない。

Track は対象粒子が以下の条件になると廃棄される。粒子がワールドボリュームから出た時。粒子が崩壊、非弾性散乱等で消滅した時。粒子の運動エネルギーがゼロになり (すなわち静止状態)、さらに静止状態で相互作用 (例えば、崩壊) が生じない場合。ユーザが強制的に粒子の Tracking を停止した時。

Track の保持する情報は事象 (Event) 処理の終了時に破棄される。

A.2.5 Step とは？

Step は Tracking の最小単位である。Step の始点 (PreStepPoint) と終点 (PostStepPoint) の間で粒子の物理量の変化 (エネルギー損失、経過時間等) の情報を保持する。粒子を一つだけ進めることを Stepping と呼ぶ。

Step はの始点と終点はそれが属する物体・物質情報を保持する。Step の終点が物質境界面にある場合、終点は境界面の先にある物体の中に入ったと解釈される。

関連図書

- [1] K. Abe et al. (T2K collaboration), Phys. Rev. D90 072012 (2014).
- [2] S. Fukuda, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 501 (2003) 418-462.
- [3] Y. Itow, et al. "The JHF-Kamioka neutrino project" arXiv:hep-ex/0106019 (2001).
- [4] A. M. Ankowski, O. Benhar, T. Mori, R. Yamaguchi, and M. Sakuda, Phys. Rev. Lett. 108, 052505 (2012).