

原子炉ニュートリノ実験における宇宙線ミュオン粒子の研究

粒子物理研究室 0573122S 原田卓也

2009/3/13

目次

第一章 ニュートリノとは

- 1.1 ニュートリノ
- 1.2 ニュートリノ振動

第二章 Double Chooz 実験とは

- 2.1 Double Chooz 実験
- 2.2 検出するニュートリノ反応

第三章 原子炉ニュートリノ実験におけるバックグラウンド宇宙線ミュオン粒子

- 3.1 ミュオン粒子
- 3.2 ミュオン粒子によるバックグラウンドの可能性
- 3.3 研究目的
- 3.4 研究方法、及び使用するもの
- 3.5 各種設定
- 3.6 結果
- 3.7 比較・考察

第四章 まとめ

第一章 ニュートリノとは

1.1 ニュートリノ

ニュートリノとは、ライネス・コーワンの実験によって観測された粒子である。素粒子のうちの中性レプトンの名称。 μ 、 τ 、 e ニュートリノの3種+その反粒子で合計6種類あるとされる。ニュートリノは弱い相互作用しかしないので、長い間質量がわからず、質量は無いものとして扱われてきたが、1998年のスーパーカミオカンデでの観測によってニュートリノ振動が観測された。ニュートリノ振動はニュートリノに質量があることを示している。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノに質量がある場合、飛行中にニュートリノのフレーバーが変化する事をニュートリノ振動という。2種類の場合、エネルギー E_ν 、飛行距離を L として、

$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = 1 - \sin^2 2\theta_{ij} \sin^2 \frac{(\Delta m_{ij}^2) L}{4E_\nu}$$

で表される。

以下に導出を示す。

簡単のため、ニュートリノの種類を2種類として、

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

より

$$|\nu_e(0,0)\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle - \sin\theta|\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\mu(0,0)\rangle = \sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle \quad \text{ここで、質量の固有状態を時間発展させて、}$$

$$|\nu_e(\vec{x},t)\rangle = \cos\theta e^{-iEt_1 + i\vec{p}_1\vec{x}}|\nu_1\rangle - \sin\theta e^{-iEt_2 + i\vec{p}_2\vec{x}}|\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\mu(\vec{x},t)\rangle = \sin\theta e^{-iEt_1 + i\vec{p}_1\vec{x}}|\nu_1\rangle + \cos\theta e^{-iEt_2 + i\vec{p}_2\vec{x}}|\nu_2\rangle \quad \text{と導かれる。}$$

ここで以下の近似を行う。

$$|\vec{x}| \simeq t = L$$

$$E_i - p_i \simeq \frac{1}{2} \frac{m_i^2}{p_i}$$

Lはニュートリノが飛行した距離であるとした。ここで $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ である確率は、

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e(0,0) | \nu_e(\vec{x}, L) \rangle|^2 = |\cos^2 \theta e^{-i \frac{m_1^2 L}{2p}} + \sin^2 \theta e^{-i \frac{m_2^2 L}{2p}}|^2$$

$$= 1 - 2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E}$$

ただし、 $\Delta m^2 = |m_2^2 - m_1^2|$ である。これを3種類のニュートリノに拡張すると、

$$\left. \begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \\ P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) \end{aligned} \right\} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j < k} \text{Re}(U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha k}^* U_{\beta k}) \times \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{jk}^2 L}{4E} \right)$$

$$\mp 2 \sum_{j < k} \text{Im}(U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha k}^* U_{\beta k}) \times \sin \left(\frac{\Delta m_{jk}^2 L}{2E} \right),$$

ここで $\alpha, \beta = e, \mu, \gamma$ であり、マイナスとプラスはそれぞれ粒子反粒子に対応しているため、

$$1 - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 4 \sum_{j < k} |U_{ej}|^2 |U_{ek}|^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{jk}^2 L}{4E} \right)$$

$$= \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}$$

$$+ \frac{1}{2} \cos^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}$$

$$+ \left(\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} + \cos^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \cos \frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E} \right)$$

$$\times \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}$$

ここで、第二項第三項は微小により無視できるので、上記の式が導かれる。

第二章 Double Chooz 実験とは

2.1 Double Chooz 実験

DoubleChooz 実験とは、残された混合角、 θ_{13} の精密測定を目的とした実験である。原子炉から発生した反電子ニュートリノの変化を観測することにより θ_{13} を測定する。現在様々な θ_{13} の測定実験が進められているが、その中でもフランスの CHOOZ 原子炉の設備をそのまま利用し、いち早く実験を開始できる本実験は世界の注目を集めている。2つのディテクターにより観測を行うが、2008年に Far Detector が稼動を始め、2009年に Near Detector も稼動する予定である。その後3年間の測定を経て、2011年に θ_{13} の測定を完了させる予定である。

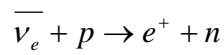


(図はフランスの CHOOZ 原子炉)

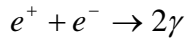
2.2 検出するニュートリノ反応

DoubleChooz 実験では、2基の原子炉内の崩壊により発生した反電子ニュートリノを2基のディテクターで観測する。

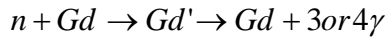
i)反電子ニュートリノは、検出器のターゲットエリア内で逆崩壊を起こし、陽電子と中性子を発生させる。



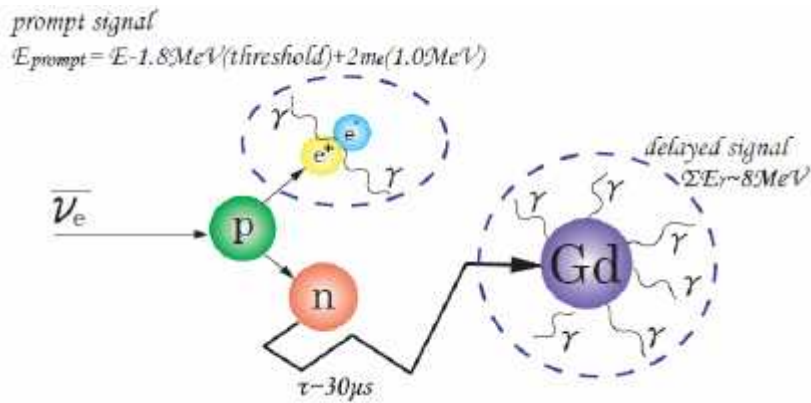
ii-A)発生した陽電子は、検出器中の電子と反応する事によって線を放射する。



ii-B)発生した中性子はしばらく走った後に、Gd原子核に捕らえられて線を放出する。



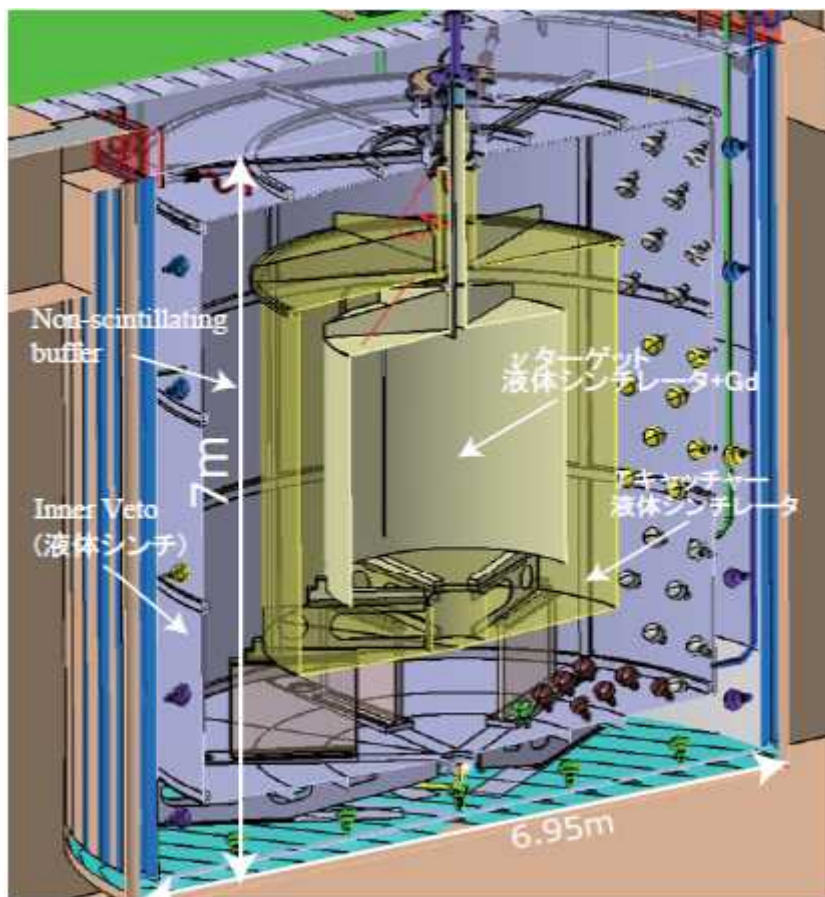
ii-A),ii-B)のそれぞれの反応はおよそ 30 μ sec の時間差があり、ii-A)を即時信号、ii-B)を遅延信号とし、この2つの信号を観測する事によりニュートリノ反応を観測する。



2.3 検出器について

原子炉より約 280m の位置(45mwe)に NearDetector、約 1050m の位置(300mwe)に FarDetector が設置されている。この検出器には主に液体シンチレーターが用いられており、下図の様な円筒形であり、ターゲットエリア、 キャッチャーエリア、バッファーエリア、ベトーエリアに別れる。このバッファーエリアに PMT が配置されており、ターゲットエリア、 キャッチャーエリアからのシンチレーション光を観測する。

液体シンチレーターの成分は、dodecane(80%)、PXE(20%)であり、密度は $0.83(\text{g}/\text{cm}^3)$ であり、ターゲットエリアには 0.1%の Gd が混入されている。



第三章 原子炉ニュートリノ実験におけるバックグラウンド宇宙線ミュオン粒子

3.1 ミュオン粒子

ミュオン粒子とは、素粒子のうちのレプトン的一种であり、標準模型では第二世代の荷電レプトンとして扱われている。地表に降り注ぐ宇宙線の主要な構成要素はこのミュオン粒子である。

3.2 ミュオン粒子によるバックグラウンドの可能性

反電子ニュートリノを観測する本実験では、以下のミュオン粒子によるバックグラウンドが観測される可能性がある。

ミュオン粒子がディテクター内で落とすエネルギーは、仮にミュオン粒子が相対論的な運動を行ったとした場合、ディテクターの通過距離に比例する。もし地上に降り注ぐミュオン粒子が偶然、ディテクター内に、反電子ニュートリノ反応の即時信号と同じぐらいのエネルギーを落とし、その後およそ $30\ \mu\text{sec}$ 後に、遅延信号と同じぐらいのエネルギーを落とした場合、反電子ニュートリノイベントと間違えてしまう。これがバックグラウンドとなる。

3.3 研究の目的

上記の様なバックグラウンドが本実験にどれ程影響を及ぼすか、即ち、観測する反電子ニュートリノに比べてミュオン粒子のバックグラウンドが無視できるかどうかを調べる。また、無視できない場合は、検出器外部の2重の宇宙線除外システム(outer veto, inner veto)への要求検出効率を見積もる。

3.4 研究方法、及び使用するもの

本研究は、コンピューターを用いたコンピューターシミュレーションにより行う。検出器の形状は円筒形であるので、プログラミング言語の C++ を用いて自分でコードを書きシミュレーションを行う。

3.5 各種設定

- まずターゲットとなるディテクターの大きさは、半径が 1.8m、高さが 4.0m の円筒形であり、その内部の構成は、80%の dodecane、20%の PXE の混合液体(密度 0.83 g/cm^3) で満たされているとした。
- ミュー粒子がディテクター内を通過したときに落とすエネルギーは、 $0.83(\text{g/cm}^3) \times 2.0(\text{MeV/g/cm}^2) = 166(\text{MeV/m})$ であるとした。
- ミューオン入射部分として、円筒形のディテクターの上方 1.0m の距離に、 $30\text{m} \times 30\text{m}$ の広さをもつ正方形の平面を定義した。
- ミューオンの flux は、Far ディテクターに対しては、CHOOZ での実測値である、 $0.62(\text{/sec} \cdot \text{m}^2)$ を用いた。Near ディテクターについての flux の実測値はまだ測られていないので、深さを考えてその 10 倍であるとし、 $6.2(\text{/sec} \cdot \text{m}^2)$ とした。
(FarDetector:300mwe NearDetector:45mwe)
- ミューオンは以上を踏まえて発生させる。つまりこの時、Near ディテクターに対しては 5580(event/sec)、Far ディテクターに対しては秒間 558(event/sec)のミューオンが発生する事となる。それぞれのミューオンについて、発生する位置は入射部分として定義した平面内で一様にランダムな点、平面上での角度 も $0 \sim 360$ 度のランダムな値とし、平面に対する入射角 については、地表に降り注ぐ宇宙線の理論上の角度分布 ($N \propto \cos^2 \theta$) に添うようにランダムイズしている。また、それぞれのミューオンの発生間隔 dt は flux を考慮して、
$$dt = -(1/T) \times \text{Log}(\text{rand}) \quad (\text{T:1sec の入射粒子数、rand:0} \sim 1)$$
 と設定している。
- 反電子ニュートリノ反応のバックグラウンドであるとして抜き出すイベントは、
即時信号：0.7~9.0(MeV)
遅延信号：5.0~12.0(MeV)
即時信号から遅延信号までの時間幅：5 μsec ~100 μsec
とした。

3.6 結果

Near デテクターについて：

シミュレーション内の事象を、現実の時間に換算して合計 5×10^5 (sec) ぶんのシミュレーションを行った。

39event のバックグラウンド反応

Far デテクターについて：

同じく今度は、 5×10^6 (sec) ぶんのシミュレーションを行った。

4event のバックグラウンド反応

以上のような結果が得られた。

1日当たりのバックグラウンド数に直すと、

<NearDetector> 6.7 ± 1.1 (events/day)

<FarDetector> 0.07 ± 0.03 (events/day)

3.7 比較・考察

DChooz の予想では、年間観測される反電子ニュートリノの個数は、

NearDetector: $\sim 150,000$ (events/year)

FarDetector: $\sim 15,000$ (events/year)

1日当たりに直すと、

NearDetector: ~ 410 (events/day)

FarDetector: ~ 41 (events/day)

今回のシミュレーションの結果と比較すると、

<Near> 410:6.7 (events/day) ニュートリノイベントの 1.63%

<Far> 41:0.07 (events/day) ニュートリノイベントの 0.17%

Veto を考えない場合、Near デテクターではバックグラウンドの可能性が無視できない。

以上の結果を踏まえると、Near デテクターに対し、
バックグラウンドを、

0.1%以下に抑える場合：93.9%

0.01%以下に抑える場合：99.4%

の検出効率が必要であるとの結果を得た。

第四章 まとめ

NearDetector については、veto を考慮しない限りバックグラウンドが無視できないという結論が出たが、現在建造中の NearDetector の veto の検出効率はおよそ 99%以上であるので、ミュー粒子によるバックグラウンドはほぼ無視できる範囲内におさまると言える。

< 謝辞 >

この卒業研究を行うにあたって、たくさんの方々に助けて頂きました。皆様のご支援が無ければこの卒業論文は書くことが出来ませんでした。ここに感謝に意を表します。

まずなにより、ニュートリノグループのリーダーである原准教授には、研究のための環境を与えて頂いたことはもとより、さまざまな面にかんするご助言を頂きました。また、日本の DChooz グループのミーティング等にも連れて行って頂いたり、シミュレーションの講習会にも参加の機会を与えて頂いたり、色々な文献を貸していただいたり、ここに書ききれないほどお世話になりました。本当にありがとうございました。

そして、新潟大学の川崎教授には、シミュレーションのテーマをご提案していただいただけでなく、この研究の中核であるプログラムの事に関するご助言をたくさん頂きました。本研究を進めるにあたり、たくさんコードに関するトラブルがありましたが、その解決方法等、川崎教授のご助言なしでは卒業することが出来なかったといっても過言ではありません。本当にありがとうございました。

また、神戸大学のニュートリノグループの先輩である矢野さん、鈴木助教授、青木教授にもご協力して頂きました。皆様ありがとうございました。