

氏名・(本籍)	すず き はじめ 鈴木 肇
学位の種類	博士 (理 学)
学位記番号	理博第1293号
学位授与年月日	平成5年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究論文題目	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 原子核理学専攻
学位論文題目	ホログラフィ泡箱によるタウニュートリノ振動の研究
論文審査委員	(主査) 教 授 田 中 昌 教 授 湯 田 春 雄 助 教 授 山 口 晃

論 文 目 次

序章

第1章 ニュートリノ振動に関する物理

第2章 実験装置

第3章 データ収集

第4章 ニュートリノ反応の解析

第5章 タウ粒子の探索方法

第6章 結果と補正

第7章 結論

論文内容要旨

序章

ニュートリノの質量は、大統一理論の検証や、宇宙の構造に関わる重要なパラメータであるにも関わらず、1992年現在で、その上限値しかわかっていない。ニュートリノは中性で弱い相互作用しか行わず、しかも質量を持つとしても非常に軽いという性質が、ニュートリノ質量の直接測定を極めて困難なものとしている。

このような状況で、ニュートリノ質量の測定で、現在期待されているのがニュートリノ振動を用いた探索方法である。これはニュートリノが質量を持ち、かつ世代間の混合があれば起こると予想される現象で、二つのニュートリノの質量の差とその混合角の関係しか決定できないという欠点がある。しかながら、ニュートリノ質量の測定範囲はニュートリノの飛距離、エネルギーと統計量で決まるので、測定器自体の分解能には強く依存せず、原理的にはいくらでも小さな質量までも調べることが出来るという大きな利点がある。

本論文は、米国フェルミ研究所で行われたニュートリノ実験データを用いて、ミューオンニュートリノ (ν_μ) がタウニュートリノ (ν_τ) に変化するニュートリノ振動の探索結果をまとめたものである。本実験の最大の特長はホログラフィ光学系を備えた大型泡箱を用いたことである。これによって、タウレプトンやチャーム粒子のような単寿命粒子の崩壊反応を、直接観測することが可能となった。大型泡箱とホログラフィを組み合わせた実験では、本実験が世界で最も大量のホログラフィ写真を得ている。

第1章 ニュートリノ振動に関する物理

二つのニュートリノ ν_μ , ν_τ が混合角 θ を使って

$$\nu_\mu = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta$$

$$\nu_\tau = -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta$$

と書けるとき、 ν_μ が ν_τ に変化する確率は、二つの質量固有値 $\Delta m^2 (= m_2^2 - m_1^2) (\text{eV}/c^2)^2$ 、ニュートリノの運動量 $p (\text{MeV}/c)$ 、ニュートリノの飛距離 $l (\text{m})$ を用いて

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos 2\pi l \frac{\Delta m^2}{2.5p} \right)$$

と書き表すことが出来る。ニュートリノ振動は、太陽ニュートリノや大気ニュートリノ問題の一つの解釈として考えられているが、加速器を用いた実験では、その存在は立証されていない。 ν_μ と ν_τ の区別は、荷電カレント反応後に出てきたレプトンがタウレプトンかミューオンであるかで行うことができる。

第2章 実験装置

ν_μ は、フェルミ研究所のテバトロン加速器の800GeVの陽子から生成され、 ν_μ のピークエネ

ルギーはほぼ100GeVである。検出装置は東北泡箱ハイブリッド系と呼ばれホログラフィ泡箱と後方に置かれたトラッキングカウンター、2 mの鉄からなるトロイド磁石から成り立っている。泡箱中で発生したニュートリノ反応は、三つの通常写真装置で記録される。更にトリガー信号があった場所は、レーザーが発射されてホログラフィ写真が記録され、同時に後方のトラッキングカウンターが荷電粒子の軌跡を記録する。泡箱中には約16Kガウスの磁場があり、これによって、粒子の電荷と運動量がきまる。トロイド磁石を貫通した粒子を調べることで、ミューオンを同定することが出来る。

第3章 データ収集

得られた通常写真の中発見された反応は、粒子の軌跡が測定され、立体再構成され、運動量が求められた。ホログラフィ写真は再生器で再生され、ハードコピーがとられ、反応点から2 cm以内の二次反応が調べられ、記録された。カウンターデータは、コンピュータから自由に取り出せるような形式に整理された。

第4章 ニュートリノ反応の解析

荷電カレント反応と中性カレント反応の区別は、カウンターによるミューオンの有無を使う以外に、Fmax法と呼ばれる方法がしばしば用いられる。またニュートリノのエネルギーの推定には、Bonn法が用いられた。

第5章 タウ粒子の探索方法

ホログラフィ光学系の分解能は100 μm 以下である。インパクトパラメータという量を定義する(図2)。インパクトパラメータ100 μm 以上の二次反応を、調査する。探索するチャンネルは、 $\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$ と、 $\tau \rightarrow \text{ハドロン} + \nu_\tau$ である。

$\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$ の主なバックグラウンドは、チャーム粒子のミューオンへの崩壊である。しかし中性子カレント反応でのチャームの生成率は小さく、荷電カレント反応の場合は、終状態にミューオンを二個含むことになる。従って、

1. キンクの先がミューオンである。
2. ミューオンは一個だけ同定された。
3. $P_t > 0.24 \text{ GeV}/c$ を充たす。

このようなイベントを探索することとする。

$\tau \rightarrow \text{ハドロン} + \nu_\tau$ の探索は、タウレプトンが、他の一次反応点から出ているハドロンより大きな運動量を持つという性質を利用する。これから、二次反応点からのハドロンが、一次反応点からのハドロンより速く可能性が、タウレプトンの崩壊の場合、他のバックグラウンドに比べて、大きくなる。” $R = (\text{市場反応点からのハドロンの最大運動量}) / (\text{最大インパクトパラメータをもつ二次反応点からのハドロンの運動量})$ ” という量を用いて、

1. $R < 1$
2. 終状態にミューオンは含まない
3. 1 プロングの場合は, $P_t > 240 \text{ GeV}/c$
 3 プロングの場合は, 計算される静止質量 $< 1.8 \text{ GeV}/c^2$

電荷の合計が + 1 または - 1

を満たすものを探索する。以上二つの反応について, コンピュータシミュレーションを作り, この探索方法の場合, 検出効率は合計で 7.1% を得た。

第 6 章 結果と補正

得られたデータの内, ホログラフィ, カウンターデータいずれも使用可能のものが, 4413 反応得られた。トロイド磁石によるミューオンの検出効率は, モンテカルロ計算から 90% である。得られたデータにこの補正を考慮して, 荷電カレント反応は 3382, 中性カレント反応は 1031 反応であった。これは過去の他の実験とも一致する。 ν , $\bar{\nu}$ の比もフェルミ研究所の計算値と一致した。

$\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$ の探索は, 上記の探索条件を全て通過した反応が, 一つ残った。図 3 にこの反応のホログラフィ写真を示す。この反応に対するバックグラウンドは, 中性カレントのチャーム粒子のミューオンへの崩壊, 荷電カレント反応のチャーム粒子生成と一つのミューオンの検出ミス, トロイド磁石の判定ミス等が検討され, 出現確率 0.46% を得た。しかし, タウレプトンとすると, 飛距離が長すぎるといった不自然さがあり, 再度検討した結果, 泡が揺らいでいる可能性が 0.86% の確率で考えられることがわかった。最終的に, この反応は, タウレプトンの崩壊候補には含めないこととした。

$\tau \rightarrow \text{ハドロン} + \nu_\tau$ の探索は, やはり上記の探索条件を全て通過した反応が一つ残った。図 4 にこの反応のホログラフィ写真を示す。この反応に対するバックグラウンドは, 荷電カレント反応でミューオン検出が出来なかった場合のチャーム粒子, 非弾性散乱, Diffraction, 中性カレント反応のチャーム粒子, 非弾性散乱, Diffraction が考えられる。バックグラウンド出現確率は, 合計で 1.3% である。またこのイベントのもの, 飛距離 4.1mm, インパクトパラメータ $-139.9 \mu\text{m}$, $R=0.52$, 質量 $0.639 \text{ GeV}/c$ というものが, タウレプトンと仮定したときに, 不自然さがなにか, 他のバックグラウンドとの比較で検討した。このようなパラメータを持つ確率は, タウレプトン, 中性カレントのチャーム粒子, 荷電カレント反応のチャーム粒子がほぼ等しく, 衝突反応である場合は, それより 2 桁以上小さいことが, コンピュータシミュレーションから求められた。

テバトロンが, B 粒子や Ds 粒子を作り, その崩壊による ν_τ が検出される可能性を求めた。このようにして作られた ν_τ を検出する確率は 1.8% であることがわかった。

第 7 章 結論

東北泡箱ハイブリッド系を用いて, ν_τ 反応を探索した。 $\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$ と, $\tau \rightarrow \text{ハドロン} + \nu_\tau$

のチャンネルを探し、 $\tau \rightarrow$ ハドロン+ ν_τ 反応候補を一例発見した。これに対するバックグラウンド出現確率は、1.3%である。テバトロンが直接作る ν_τ の検出の可能性は1.8%なので、これが ν_τ 反応であるならば、ニュートリノ振動の可能性が議論できる。ポアソン分布を仮定し、検出効率を考慮に入れると、使用した4413イベント中に、 ν_τ 反応が6以上66以下であることが90%信頼度でいえる。図5にこれから決まるニュートリノ振動のパラメータ領域を示す。既に右上の部分にはE531によって、禁止領域とされているので、発見された反応が、ニュートリノ振動の結果検出された ν_τ であるならば、灰色の部分にパラメータが存在する。

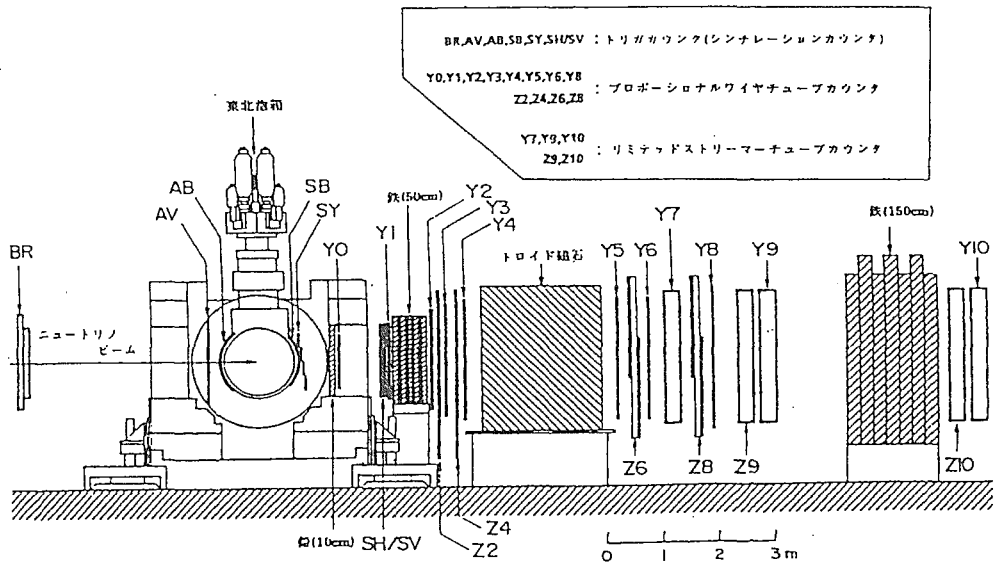


図1. 東北泡箱ハイブリッド系

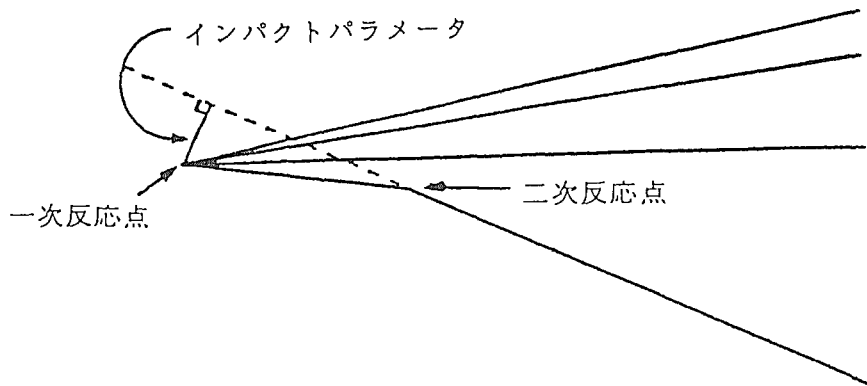


図2. インパクトパラメータ

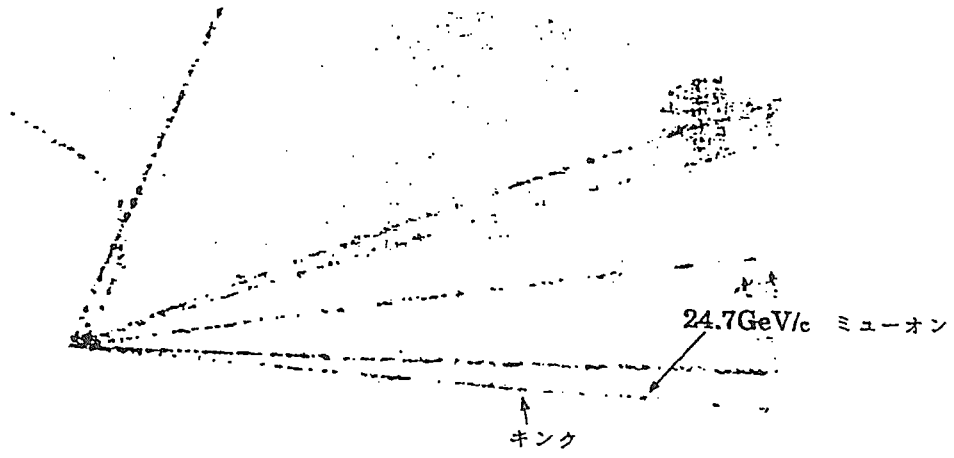


図3. $\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$ 候補

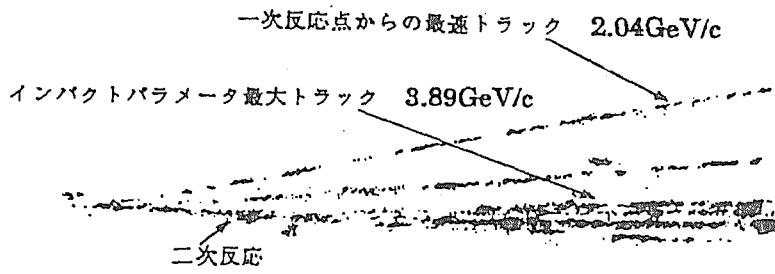


図4. $\tau \rightarrow$ ハドロン + ν_τ 候補

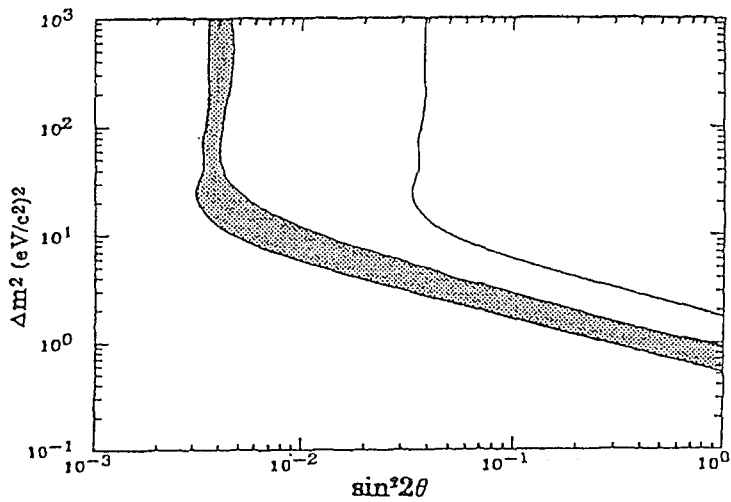


図5. ニュートリノ振動のパラメータ領域

論文審査の結果の要旨

鈴木肇提出の論文は高分解能ホログラフィ泡箱を用いたタウニュートリノ振動の探索研究である。本研究は1.4m 東北泡箱におけるホログラフィ光学系の空間分解能を利用した短寿命粒子探索であり、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動で実験的に検証し論じたものである。

論文は7章よりなり、第1章ではニュートリノ及びニュートリノ振動に関する基礎的物理について概説している。

第2章及び第3章は実験装置及び泡箱実験で記録された写真からのデータ収集についての概要である。実験装置の構成要素に並びに泡箱・ホログラフィ写真の測定・解析の手続きについて記述がある。また、第4章にはニュートリノ反応の物理解析に関する基本的事項が要約されている。

第5章は高分解ホログラフィ写真によるタウ粒子探索の方法についての詳述である。タウ粒子探索に対するバックグラウンドとしてチャーム粒子の崩壊、弾性散乱などの混入を避けるためミューオンの同定の他に、インパクトパラメータ、横運動量 P_T などの制限をつける。これらの制限はシミュレーションにより適値が設定された。

第6章では、ニュートリノ反応4413例に上記の制限条件を要求し、チャンネル(I) $\tau \rightarrow \nu_\tau \nu_\mu \mu$ 及び(II) $\tau \rightarrow \nu_\tau + \text{ハドロン}$ の候補としてそれぞれ1例の反応例を得た。まず、(I) $\tau \rightarrow \nu_\tau \nu_\mu \mu$ の候補について詳しく調べられ、シミュレーションによってバックグラウンドを求めている。しかしながらタウレプトン崩壊点付近の泡のゆらぎが調べられ、その影響の無視出来ないことが指摘され、この反応はタウレプトンの崩壊候補から除かれた。次に(II) $\tau \rightarrow \nu_\tau + \text{ハドロン}$ の反応例についても詳細な検討が行われている。この反応について、インパクトパラメータ、飛距離、質量などの運動学的考察を行い、このイベントはタウレプトン又はチャーム粒子の可能性が確率的に同程度と判断された。これらの結果を得て、ニュートリノ振動のパラメータの新しい許容領域について論じている。

本研究は高分解能ホログラフィ泡箱の特色を生かした短寿命粒子探索により、タウニュートリノ振動のパラメータを示したもので、価値の高い研究である。即ち、本論文は著者が自立して研究活動を行うに足る高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、鈴木肇提出の論文は博士（理学）の論文として合格と認める。