



Spin polarization of tau leptons produced in neutrino-nucleon scattering

馬渡, 健太郎

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2005-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3260

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003260>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 2 4 6 】

氏 名・(本 籍) 馬渡 健太郎 (長崎県)

博士の専攻分野の名称 博士(理学)

学 位 記 番 号 博い第283号

学位授与の 要 件 学位規則第5条第1項該当

学位授与の 日 付 平成17年3月25日

【 学位論文題目 】

Spin Polarization of Tau Leptons Produced in Neutrino-
Nucleon Scattering
(ニュートリノー核子散乱で生成するタウレプトンのスピン偏極)

審 査 委 員

主 査 教 授 森井 俊行
教 授 林 青司
教 授 蛭名 邦禎
助教授 青木 茂樹

1998年、スーパーカミオカンデにおいて大気ニュートリノ中のミューオンニュートリノの減少が観測され、その異常がニュートリノ振動 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) によって引き起こされていることが明らかになり、ニュートリノが有限の質量を持つことが示唆された。その後、太陽ニュートリノ、原子炉ニュートリノ、加速器を用いた長基線ニュートリノ実験などにおいて、次々とニュートリノ振動を示す実験結果が得られ、ニュートリノが有限の質量を持つことは強く支持されている。

今後、ニュートリノ振動により生成されるタウニュートリノを直接観測することにより、その振動を確実なものとして確認することが必要不可欠である。ヨーロッパで2006年に始まる CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso) プロジェクトの ICARUS、OPERA グループによる長基線ニュートリノ振動実験で、その観測が期待されている。また、その実験では、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の精密測定も計画されており、そのバックグラウンド事象としての $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動の解析が急がれている。

タウニュートリノは、タウニュートリノ核子(または原子核)散乱で生成されるタウレプトンを観測することで確認される。しかし、タウレプトンはその質量が重いためにすぐにいくつかの粒子に崩壊してしまい、実際にはその崩壊粒子を観測することでタウレプトンの生成を確認する。一方、その崩壊粒子分布はタウレプトンのスピン偏極に強く依存することが知られており、タウレプトンを観測するためには、その生成断面積のみならず、生成するタウレプトンのスピン偏極の情報が必要となる。また、崩壊粒子の中には電子ニュートリノも含まれるため、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動のバックグラウンド事象としての詳しい解析も重要である。

これまで、ニュートリノ核子散乱におけるタウレプトン生成の断面積を計算した研究は行われていたが、タウレプトンがどういったスピン偏極で生成するかという研究はなされてこなかった。そこで、本論文では、生成するタウレプトンのスピン偏極に着目し、その生成過程のスピン密度行列を正確に取り扱うことで、生成断面積に加えタウレプトンのスピン偏極の詳しい数値計算とその分析を行った。そして、得られたスピン偏極の情報をもとに最終的に実験で得られるタウレプトンからの崩壊粒子の角度、エネルギー分布の解析を行った。

まず第2章では、ニュートリノ核子散乱におけるタウレプトン生成の際のそのスピン偏極を取り上げた。ここでは、長基線ニュートリノ振動実験でのエネルギー領域を考慮に入れ、生成過程として、その領域で主となる準弾性散乱、共鳴状態生成、深非弾性散乱の3つの過程を正しい運動学的領域に分けてそれぞれを体系的に取り扱った。さらに、あらゆる可能な運動学的領域における生成したタウレプトンのスピン偏極ベクトルの視覚化も行い、理論家のみならず実験家にも有益な研究であるように努めた。計算の結果、ニュートリノ核子散乱で生成するタウレプトンのスピン偏極は、タウレプトンのエネルギーと散乱角に強く依存することが分かった。特に、高い偏極度を持つが、その偏極の方向は、タウレプトンのエネルギーの小さなところでタウレプトンの質量を無視した極限から大きくずれていることが分かった。この偏極ベクトルの振る舞いは、散乱粒子の重心系でのヘリシティ振幅と、重心系から実験室系へのローレンツ変換の効果を考慮することで説明できる。

また、ニュートリノ核子散乱でのタウレプトン生成過程の中で重要な役割を果たす核子の擬スカラー形状因子に注目しその現象論的分析を第3章で行った。この形状因子の寄与はレプトンの質量に比例するため、これまで詳細に研究が行われてきた電子やミューオン生成過程では無視されており、理論的にも実験的にもその知識は乏しい。また、この形状因子は粒子のスピンを反転する効果を持ち、生成するタウレプトンのスピン偏極に大きな作用を及ぼす。この研究で我々は、ニュートリノ核子散乱におけるタウレプトン生成過程からその形状因子の情報を引き出すことを初めて提案した。この擬スカラー形状因子に関する研究では、いくつかその形状因子のモデルを提案し、タウレプトン生成過程では、そのモデルの違いが生成断面積に非常に大きく反映されることを示した。

第4章では、生成したタウレプトンのスピン偏極を考慮した崩壊粒子分布について CNGS 実験で用いられる入射ニュートリノフラックス、3世代ニュートリノモデルを用いて実質的な解析を行った。ここでは、特に、タウレプトンからの崩壊粒子としてパイオンと電子を取り上げた。その結果、崩壊粒子のエネルギーと角度分布はタウレプトンの偏極に強く影響を受けることが分かった。特に、パイオンのタウレプトンの運動軸に対しての方位角分布は非常に強くタウレプトンの偏極に依存しており、統計が少ない実験でも観測が期待できることを明らかにした。

最後に、第5章では、ニュートリノ核子散乱におけるタウレプトン生成とその崩壊という、この一連の研究を要約し、タウレプトンのスピン偏極を考慮することの重要性を指摘した。

氏名	馬渡 健太郎		
論文 題目	Spin Polarization of Tau Leptons Produced in Neutrino-Nucleon Scattering (ニュートリノ-核子散乱で生成するタウレプトンのスピン偏極)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	森井 俊行
	副 査	教授	林 青司
	副 査	教授	蛭名 邦禎
	副 査	助教授	青木 茂樹
	副 査		
要 旨			
素粒子の標準模型は、現存する殆んど全ての素粒子反応の実験を説明し、大きく成功しているが、模型の枠内では決めることのできない多くのパラメータを含むなど、標準模型を超える新しい物理の可能性が求められている。1998年にスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ中のミューオンニュートリノの減少が報告され、これがニュートリノ振動($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$)によるものであり、従って、ニュートリノが有限の質量をもつことが強く示唆され、標準模型を超える初めての証拠として注目を集めている。 また、以前からの太陽ニュートリノ実験に加えて、その後の原子炉ニュートリノ実験、加速器からの長基線ニュートリノ実験などでもニュートリノ振動を支持する結果が得られ、今やニュートリノが質量を持つことは強く示唆されているが、これを最終的に確立するためには、更に高いエネルギーでのニュートリノ反応によるタウニュートリノ(ν_τ)の生成を調べることが不可欠であり、現在、日本、アメリカ、ヨーロッパで、加速器によるより高いエネルギーでの新しい長基線ニュートリノ振動実験の計画が進んでいる。 本論文は、ニュートリノの荷電カレント反応によるタウレプトン生成反応の散乱断面積とともに、特に、生成タウレプトンのスピン偏極について詳細に分析したものである。生成したタウレプトンはその質量が大きいために、生成後すぐに軽い粒子に崩壊するが、その際、タウレプトンのスピン偏極が生成粒子の角分布に大きく影響することが予想される。このように、タウレプトンのスピン偏極についての分析は重要であるにも拘らず、これまでそのスピン偏極を調べた研究はなく、本研究が初めてのものとなっている。 第1章では、本研究の背景と動機、および、研究の概要が述べられている。 第2章では、タウレプトンの生成断面積、および、そのスピン偏極を詳しく分析している。実際の計算では、今後の長基線ニュートリノ振動実験でのエネルギー領域を考慮して、生成過程として、1. 準弾性散乱、2. 共鳴状態散乱、3. 深非弾性散乱、の3つの運動学的領域での生成断面積と共に、各生成領域でのタウレプトンの密度行列を正しく取り扱い、タウレプトンのスピン偏極を計算している。この計算の結果、ニュートリノ-核子散乱で生成するタウレプトンのスピン偏極は、タウレプトンのエネルギーと散乱角に強く依存することを明らかにしている。特に、タウレプトンの偏極度が高くても、その偏極の方向は、タウレプトンのエネルギーの小さい領域で、タウレプトンの質量を無視した極限から大きくズレていることを明らかにしたことは興味深い。この偏極ベクトルの振る舞いは、散乱粒子の重心系でのタウレプトンのヘリシティと、重心系から実験室系へのローレンツ変換を考慮することによって理解できるものである。更に、結果を実験室系にもわかりやすくするために、偏極ベクトルの視覚化を行うなど結果の表現にも工夫を凝らしている。 第3章では、ニュートリノ-核子散乱でのタウレプトン生成過程の中で重要な役割を果たす核子の形状因子、特に、擬スカラー形状因子に注目し、この形状因子によるタウレプトン生成の断面積、および、そのスピン偏極への影響を詳しく分析している。擬スカラー形状因			

氏名 馬渡 健太郎

子によるタウレプトン生成の断面積、および、そのスピン偏極への影響を詳しく分析している。擬スカラー形状因子は、生成するレプトンの質量に直接比例するため、従来行われてきた質量の小さい電子およびミューオン生成過程の研究では無視されてきた。更に、この形状因子には γ_5 が掛かるため、スピン反転効果を持ち、生成するタウレプトンのスピン偏極に大きな影響を与える。本研究では、タウレプトンの生成過程の分析において、初めて擬スカラー形状因子の影響を調べている。実際の分析では、この形状因子についていくつかのモデルを仮定し、そのモデルの違いが生成断面積に大きく影響することを明らかにしている。

第4章では、2006年にヨーロッパで始まる CNGS(CERN Neutrino to Gran Sasso)プロジェクトの ICARUS および OPERA グループによる長基線ニュートリノ振動実験を予想して、この実験で用いられる入射ニュートリノフラックスを用いて、また、3世代ニュートリノ振動モデルを考慮して、今後の実験に対する理論的予言を行っている。具体的には、タウレプトンが電子($\tau \rightarrow e \nu \bar{\nu}$)またはパイ中間子($\tau \rightarrow \pi \nu$)に崩壊する過程を分析し、これらの崩壊粒子のエネルギー分布と角分布がタウレプトンのスピン偏極に強く影響されることを明らかにしている。特に、タウレプトンの運動軸に対するパイ中間子の方位角分布は、タウレプトンの偏極に強く依存し、そのため、統計の少ない実験でも観測が期待できることを明らかにしている。

以上のように、本論文は、ニュートリノ振動現象を確認し、ニュートリノが有限の質量を持つことを最終的に確立することを目指して計画されている今後のニュートリノ振動実験で決定的に重要な役割を演じる、ニュートリノによる荷電カレント反応でのタウレプトン生成の生成断面積とタウレプトンのスピン偏極を始めて研究し、更に、タウレプトンからの崩壊生成粒子のスピン偏極依存性を詳細に研究したものであり、ニュートリノによるタウレプトン生成反応について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者の馬渡健太郎は博士(理学)の学位を得る資格があるものと認める。