

平成22年 6月 8日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19740127  
 研究課題名 (和文) 汎用ニュートリノ核子散乱シミュレーションプログラムの研究開発  
 研究課題名 (英文) Development of the neutrino-nucleus interaction simulation program  
 研究代表者  
 早戸 良成 (HAYATO YOSHINARI)  
 東京大学・宇宙線研究所・准教授  
 研究者番号：60321535

## 研究成果の概要 (和文)：

これまでスーパー神岡実験用に開発されてきたニュートリノ・核子散乱シミュレーションプログラム NEUT をさらに発展させ、ニュートリノ散乱標的として酸素や水素以外の核種でも用いることが可能なライブラリを完成させた。また、スーパー神岡実験専用の他のプログラムとの依存性をなくすことで、他の実験でも容易に利用することを可能とした。同時に、近年得られた新たな実験データを用いることでシミュレーションプログラムの評価・改良・最適化も行った。

## 研究成果の概要 (英文)：

The neutrino-nucleus interaction simulation program library NEUT has been developed for the Super-Kamiokande experiment. This time, we have added the capability to simulate neutrino interactions with various nuclear targets other than Oxygen and Hydrogen. Simultaneously, we have separated this program library from the other internal program libraries used in the Super-Kamiokande experiment. As a result, NEUT can be used independently and it is possible to be used in the new experiments quite easily. Also, we have checked and optimized the simulation program using the latest experimental results.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,500,000	450,000	2,950,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物

キーワード：ニュートリノ、 $\nu$ 核子散乱、シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

1998年にニュートリノ振動が、スーパー神岡実験における大気ニュートリノ観測によって発見された。その後太陽ニュートリノ

観測、原子炉や加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験によって、ニュートリノの性質があきらかになってきた。しかしこれらの実験でも全てのニュートリノ振動のパラメ

ータは測定できておらず、また、測定精度も満足のできるものとはなっていない。このため、ニュートリノの性質をより正確に理解するため、複数の新たなニュートリノ振動実験が提案された。これらの実験のうち、未測定 of 混合角  $\theta_{13}$  を測定するため、また、これまで測定されてきた質量差パラメータ  $\Delta m_{23}^2$  および混合角  $\theta_{23}$  の測定を行うため、大強度陽子加速器をもちいた長基線ニュートリノ振動実験が開始されることとなった。この実験では数百 MeV から数 GeV 程度のエネルギーを持つニュートリノを用いる。よって、このエネルギー領域のニュートリノが検出器中でおこす反応を正確に理解することが、振動パラメータの精密測定に不可欠となる。すなわち次世代のニュートリノ振動実験においては、これまで以上に精密で、かつ複雑な検出器にも対応することが可能な汎用性のあるニュートリノ・原子核反応シミュレーションが必要となった。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでスーパーカミオカンデ実験ならびに K 2 K 実験で用いられてきたニュートリノ・原子核反応シミュレーションプログラムライブラリ (NEUT) を改良、シミュレーションの精度を向上させ、また、汎用化することで今後開始される新たな実験においても利用できるライブラリとすることを目的とする。NEUT は、当初カミオカンデ実験のために開発され、その後継続的に改良を加えながらスーパーカミオカンデ実験に用いられてきた。このため、スーパーカミオカンデ検出器のニュートリノ散乱標的である水 (酸素および水素) とニュートリノの反応のシミュレーションは良い精度で行うことができたが、他の原子核への対応は簡易的なものであった。また、その利用にはスーパー神岡実験に用いられる他のソフトウェアが必要となっており、単独で利用することはできなかった。一方、次世代の長基線ニュートリノ振動実験やニュートリノ散乱実験では、検出器は水標的とは限らず、さまざまな物質が用いられる。よって、これらの実験においても利用するためには、酸素以外の原子核とニュートリノの反応のシミュレーションを可能にすること、ならびに、スーパー神岡実験専用ソフトウェアへの依存性を排除し、単独で用いることを可能にすることが必要となった。本研究では、これらの問題点を解消することが一つの目的となる。同時に、新たな理論モデルの導入、近年の実験データの利用、また、新たに行われるニュートリノ・原子核散乱実験において本シミュレーションプログラムを実際に用いることなどを通し、その精度評価ならびにさらなる改

良も行う。そして最終的には、東海一神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) で用いるにたる精度をもつものとするを目的とする。

## 3. 研究の方法

まず、米国フェルミ研において行われるニュートリノ・原子核散乱実験である SciBooNE 実験用に準備したニュートリノシミュレーションプログラムライブラリ NEUT を整理し SK 実験専用のソフトウェアライブラリとの依存関係を解消、単独で利用可能なライブラリとして完成することを最初に行う。また、これまでではひとつの原子核と水素の同時シミュレーションは可能であったが、複数の原子核を同時に扱うことができなかつたため、これを可能とする改良をおこない、多様な実験に対応できるようにする。

次に、SciBooNE 実験において取得されたニュートリノ核子散乱データの解析結果とシミュレーション結果の比較を行い、その一致度・不一致度を評価する。SciBooNE 実験は開始当初に反ニュートリノのデータ収集を行うが、当初はその後に収集したニュートリノ散乱のデータ解析に注力しているため、こちらについてまずシミュレーションと実験データの比較を行う。シミュレーションは、過去の実験結果の比較から、運動量移行の小さい領域、すなわち、核子が原子核中に束縛されている影響が大きい領域においてデータの再現性が悪いことがわかってきている。よって、この領域について特に注意深く実験データと比較を行い、使用しているモデルの問題点追求やパラメータの最適化を行う。また、必要に応じて新たなモデルの利用可能性も探る。これらを調べるにあたって、ニュートリノ核子散乱反応だけでなく、散乱により生成した  $\pi$  粒子の核内反応が正確にシミュレーションされている必要がある。この点についても、実際に観測された  $\pi$  粒子の方向分布・運動量分布を用いることで、プログラム中で利用しているモデルの評価、パラメータ調整を行う。次に SciBooNE 実験の反ニュートリノデータを用いてシミュレーションプログラムの評価・改良を行う。

平行して、鉄やアルゴンなど今後のニュートリノ実験で重要となる標的核種について、特に標的原子核内で生成したハドロン ( $\pi$  粒子、核子など) の再散乱の影響評価・改良のため、原子核散乱実験や光子や電子を用いた  $\pi$  粒子生成反応の結果と比較、モデルパラメータの最適化ならびに系統誤差の評価を行う。

また、国際会議に参加し、他の研究者によって開発されているシミュレーションプログラムとの比較を行い、改良の方向性などを

それらの開発者たちと議論する。この議論を通して、シミュレーションへの新たなモデル導入などについて改良の方針を検討し、可能な限りとりいれられるようにする。

これらシミュレーションプログラムの改良と平行して、プログラムライブラリとして、他の実験でより使いやすくなるようなアプリケーションインターフェースの開発を行うなど、他の実験グループなどへ将来プログラムを配布するために必要なライブラリ開発環境の整備なども行う。最終的にこれらの成果を発表し、今後のプログラムライブラリ公開への道筋をつけることを目指す。

#### 4. 研究成果

研究初年度は SciBooNE 実験において本課題で研究中のシミュレーションプログラム (NEUT) を用い、データとの比較をおこなった。SciBooNE 実験の検出器は炭素と水素を主成分とするシンチレータである。その結果、ニュートリノと炭素の反応について、実験データとシミュレーションは、これまで考えていた系統誤差の範囲内でよく一致していることがわかった。また、K2K 実験において反応の存在が確認できなかった、荷電コヒーレント  $\pi$  粒子生成反応については、今回も明らかかな当初確認できず、本反応の散乱断面積は低エネルギーのニュートリノの場合、これまでに提案されてきた理論モデルよりも大幅に小さいことが明確になった。この結果をもとに、荷電コヒーレント  $\pi$  粒子生成反応の散乱断面積の上限値を与える論文を発表した。また、特に T2K 実験に向けて必要となる、複数の標的核種とニュートリノの反応をシミュレーションすることが可能とするようにプログラムライブラリの改良をおこなった。特に酸素より軽い標的については、核内での生成  $\pi$  粒子の再散乱パラメータについて、密度・運動量依存性を正しく考慮してシミュレートできるものとした。酸素より重い標的については、原子核中心付近の高密度な部分については近似的パラメータを用いることで対応した。最終的に、T2K 実験の前置ニュートリノ検出器用シミュレーションプログラムとして用いることが可能な形にし、実験グループへ提供を行った。この過程で、プログラムライブラリの実行環境が容易に構築できるような整備も行い、ユーザが自分でライブラリを他の実験に用いることも可能とする汎用化を進めた。平成 21 年 2 月に開催された国際会議において、NEUT の詳細について報告し、また、他の同様なシミュレーションプログラムとの比較・評価などをおこなった。この会議においては、参加者が実際にシミュレーションプログラムを試用してみる機会も設け、NEUT ライブラリを非常に限定的では

あるが、初めて実験関係者以外に提供、試用する機会をつくることができた。研究二年度目は、まず既存の  $\pi$  粒子-原子核散乱実験のデータやガンマ線による  $\pi$  粒子生成について、新たなデータの探索を行い、これらと現在のシミュレーションの一致について調べた。低運動量 (約 500 MeV/c 以下) については、現状のパラメータの一つである非弾性散乱の平均自由行程を 30% 程度修正することで、酸素や炭素などの軽い原子核について、実験データとの一致がさらに改善することがわかった。また、これより上の運動量領域については、これまで単純な弾性散乱と、荷電交換もしくは粒子生成を伴う非弾性散乱だけを考慮していたものを変更し、電荷変化のない非弾性散乱についてもシミュレーションをおこなうこととし、より連続的に低運動領域と接続できる改良を加え、これまでもより全体の整合性が高いものとした。その後、これらの修正を導入したことによる SK 大気ニュートリノ観測に対する影響を評価、これまでの解析で用いていた系統誤差の範囲内に収まっていることが確認された。また、今年度は  $\pi$  粒子が原子核に吸収された場合に、核子が放出される過程について、 $\pi$  原子核散乱実験の専門家と協力してシミュレーションプログラムに試験的に導入した。この反応過程によって放出される粒子は、水チェレンコフ型検出器では観測されないことや、高運動量の粒子のみに着目する解析を行う場合にはあまり影響がないことからシミュレーションをおこなっていなかったが、SciBooNE 実験において事象を詳細に調べてゆくと、本過程によると考えられる信号が観測されたため、考慮することとした。シミュレーションプログラムへの実装は完了し、今後この解釈・モデルが実験結果と一致するか、違いがあるのかななどを SciBooNE 実験や T2K 実験のデータを用いて確認してゆくことが可能となった。ニュートリノ散乱実験データとシミュレーションプログラムの直接比較としては、SciBooNE 実験のデータを用いた中性  $\pi$  粒子生成について結果がまとめ、中性  $\pi$  粒子の生成数、運動量分布や角度分布が現在のシミュレーションでよく再現できることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Measurement of Inclusive Neutral Current Neutral  $\pi^0$  Production on Carbon in a Few-GeV Neutrino Beam, SciBooNE Collaboration, Y. Kurimoto

et al. (64 名中 16 番目), Phys. Rev. D81(2009) 033004 (査読あり)

- ② A neutrino interaction simulation program library NEUT, Yoshinari Hayato, Acta Phy. Pol. B40(2009) 2477 (査読あり)
- ③ The Path Forward: Monte Carlo convergence discussion, C. Andreopoulos et al. (6 名中 3 番目), AIP Conf. Proceedings 1189(2009) 312 (査読なし)
- ④ Search for Charged Current Coherent Pion Production on Carbon in a Few-GeV Neutrino Beam, SciBooNE Collaboration, K. Hiraide et al. (64 名中 16 番目). Phys. Rev. D78(2008) 112004 (査読あり)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Summary of Working group 2 ( Neutrino interactions ), 11<sup>th</sup> International Workshop on Neutrino Factories, Super Beams, and Beta Beams, 米国・シカゴ, 2009/7/25, 早戸 良成
- ② The neutrino interaction simulation program library NEUT 45th Karpacz Winter School in Theoretical Physics Neutrino interactions: from theory to Monte Carlo simulations, ポーランド・ロンデク, 2009/2/2, 早戸 良成
- ③ Summary of Working group 2 ( neutrino interaction ), 10th International Workshop on Neutrino Factories, Super beams and Beta beams, スペイン・バレンシア, 2008/7/5, 早戸 良成

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早戸 良成 (HAYATO YOSHINARI)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号 : 60321535

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし