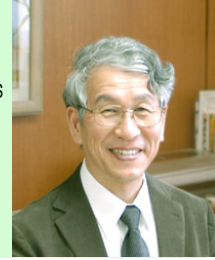


科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料  
〔事後評価用〕

平成16年度採択分

平成21年 3月31日現在

研究課題名（和文） 原子炉起源、地球起源反電子ニュートリノと  
太陽起源電子ニュートリノの高精度精密測定  
研究課題名（英文） High Precision and High Sensitivity Measurements of Electron Anti-Neutrinos  
from Reactors and inside the Earth, and Electron Neutrinos from the Sun  
研究代表者  
鈴木 厚人（SUZUKI ATSUTO）  
東北大学・大学院理学研究科・名誉教授



研究の概要：原子炉起源反電子ニュートリノを用いてニュートリノ振動の精密測定を行う。また、地球内部起源反電子ニュートリノの観測によってニュートリノ地球科学を創出・展開するとともに低エネルギーの太陽起源ニュートリノ観測によって標準太陽模型を検証する。

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・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) カムランドでの原子炉反電子ニュートリノ消失減少の発見は、太陽ニュートリノ問題を解決したが、ニュートリノ振動の直接証拠や質量情報の精密測定は未達であった。
- (2) 地球内部起源ニュートリノや低エネルギー太陽ニュートリノの実時間観測も実現されていなかった。

### 2. 研究の目的

- (1) ニュートリノ振動の直接証拠を取得し、ニュートリノ振動パラメータを精密に決定する。
- (2) 地球内部起源のニュートリノを初検出しニュートリノ地球科学を創出する。
- (3) 低エネルギー太陽ニュートリノを観測し、標準太陽模型を検証する。

### 3. 研究の方法

- (1) 時間、位置、エネルギー較正精度を向上し、安定的にデータを蓄積する。また、原子炉起源、地球起源反電子ニュートリノを網羅する広いエネルギー範囲での統合解析により、それぞれの高精度精密測定を実現する。
- (2) 低エネルギー太陽ニュートリノのバックグラウンドとなる、液体シンチレータ中にごく微量含まれる放射性希ガス・放射性重元素を除去するための装置を開発し、液体シンチレータを高度に純化する。また、宇宙線起源のバックグラウンドを識別するためデッドタイムフリー電子回路を開発・導入する。

### 4. 研究の主な成果

- (1) 原子炉起源反電子ニュートリノ  
ニュートリノ振動現象の直接証拠となる原子炉反電子ニュートリノのエネルギースペクトルの歪みを検出した。さらに、データ蓄積、系統誤差の改善、解析手法の改良などによって大幅に観測精度を向上し、ニュートリノ振動によるニュートリノの減少・復元を2サイクルにわたって観測した。図1では、ニュートリノの生存確率を（距離180km÷エネルギー）の関数として表示しており、赤点がカムランドの観測結果、青線はニュートリノ振動でのフィット、黒破線は原子炉が全て180kmの距離にあるとした場合のニュートリノ振動の様子を示している。

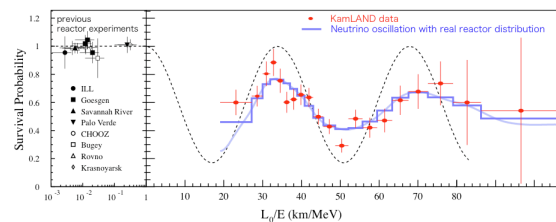


図1、ニュートリノの生存確率

さらに、明確なニュートリノ振動観測からニュートリノ振動パラメータの精密測定を実現した（図2）。質量2乗差では2.7%という高精度を実現し、混合角の下限も決定した。太陽ニュートリノ観測結果と統合して得られた振動パラメータは、以下の通りである。

$$\Delta m_{21}^2 = 7.59^{+0.21}_{-0.21} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47^{+0.06}_{-0.05}$$

#### [ 4. 研究の主な成果 (続き) ]

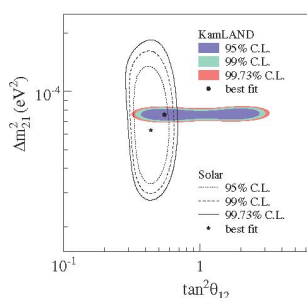


図2、ニュートリノ振動パラメータの測定結果

#### (2) 地球起源反電子ニュートリノ

地球内部に存在するウランやトリウムの崩壊に伴って生成される地球反電子ニュートリノの世界初検出に成功した。これらの崩壊起源の放射化熱は、地球内部の主要なエネルギー源であり、地球内部運動や地球形成・進化を理解する上で基本的な要素である。地球反電子ニュートリノの検出は、地球科学研究に新たな手段を提供しニュートリノ地球科学を創出した。さらに、ニュートリノ源としての地球モデルの構築も行い、地球ニュートリノ観測による地球モデルの検証方法を確立した。

データの安定的蓄積と解析手法の改善は、地球起源反電子ニュートリノ観測の高精度化も実現し、 $2.8\sigma$ 以上の有意性を得た。同時に、地球モデルが予測するウラン・トリウム崩壊からのニュートリノフラックス： $4.14 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (69.7 事象) に対し、一致する観測結果： $(4.4 \pm 1.6) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (73 ± 27 事象) を得ており、地球内部でのウラン・トリウムの崩壊による熱生成を実証し、現実的なモデル検証を実現した。ニュートリノ地球科学は、地球物理に残る大問題にたいし決定的な知見を与えると期待されており、将来の大いなる発展が見込まれる。

#### (3) 太陽起源電子ニュートリノ

放射性希ガス・重元素除去装置を完成させ、対流による新旧液体シンチレータ混合の防止手法を確立したことで、 ${}^7\text{Be}$  太陽ニュートリノ領域 (400-700keV) のバックグラウンドを1万分の1に低減した。これにより、特徴的なスペクトルを使い  ${}^7\text{Be}$  ニュートリノの観測が可能となった。また、800keV 以上で支配的な宇宙線起源バックグラウンドを識別除去するためのデッドタイムフリー電子回路を開発し、導入中である。これにより、CNO 太陽ニュートリノの観測が現実的になる。

#### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

(1) 長基線での原子炉反電子ニュートリノの観測は、世界で唯一カムランドのみが実現している。そこでニュートリノ振動パラメータの精密測定が達成されたことのインパクトは絶大である。

(2) 地球内部起源反電子ニュートリノもカムランドのみが実現しており、ニュートリノ地球科学の創出は革命的であると称される。

(3) 純化によって作られた極低放射能環境は世界屈指の希な現象の研究環境であり、世界中からの注目が集まっている。

これらの成果は、ニュートリノ研究における日本の地位を一段と高め、独走態勢をさらに顕著にしている。

#### 6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

(1) **A.Suzuki** (24/82), K.Inoue (8/82), J.Shirai (21/82), M.Koga (11/82), T.Mitsui (14/82), Y.Kishimoto (10/82), (KamLAND collaboration), “Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND”, Phys.Rev.Lett. 100: 221803, 2008.

(2) S.Enomoto, E.Ohtani, K.Inoue, **A.Suzuki**, “Neutrino Geophysics with KamLAND and Future Prospects”, Earth and Planetary Science Letters 258 (2007) 137-159.

(3) K.Nakajima, K.Inoue, K.Owada, F.Suekane, **A.Suzuki**, G.Hirano, S.Kosaka, T.Ohta, T.Tanaka, “A Simple Model of Reactor Cores for Reactor Neutrino Flux Calculations for the KamLAND Experiment”, Nucl. Instrum. Meth. A569: 837-844, 2006.

(4) **A.Suzuki** (24/89), K.Inoue (7/89), J.Shirai (22/89), M.Koga (10/89), T.Mitsui (13/89), Y.Kishimoto (8/89), (KamLAND collaboration), “Search for the Invisible Decay of Neutrons with KamLAND”, Phys.Rev.Lett. 96: 101802, 2006.

(5) **A.Suzuki** (23/87), K.Inoue (8/87), J.Shirai (21/87), M.Koga (11/87), T.Mitsui (14/87), Y.Kishimoto (10/87), (KamLAND collaboration), “Experimental Investigation of Geologically Produced Antrineutrinos with KamLAND”, Nature 436: 499-503, 2005.

(6) **A.Suzuki** (24/93), K.Inoue (7/93), J.Shirai (22/93), M.Koga (12/93), T.Mitsui (15/93), Y.Kishimoto (11/93), (KamLAND collaboration), “Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion”, Phys.Rev.Lett. 94: 081801, 2005.

(7) K.Inoue, “Reactor Neutrino Oscillation Studies with KamLAND”, New Journal of Physics 6: 147, 2004.

ホームページ等

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/RCNS/>