

# 論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	小原 脩平	提出年	平成 29 年度
学位論文の 題目	A Search for Supernova Relic Neutrinos with KamLAND during Reactor-Off Period		

## 論文目次

### 1 Introduction

#### 1.1 Overview

##### 1.1.1 Notation

#### 1.2 Supernova and Supernova Neutrinos

##### 1.2.1 The Birth of Neutrino Astronomy

##### 1.2.2 Stellar Evolution

##### 1.2.3 Supernova Classification

##### 1.2.4 Type-I Supernovae

##### 1.2.5 Type-II Supernovae: Core-Collapse Supernovae

#### 1.3 Supernova Relic Neutrinos

##### 1.3.1 SRN Search by Organic Liquid Scintillator Detectors

##### 1.3.2 Prediction Models

##### 1.3.3 SRN search experiments

#### 1.4 Other Astronomical Neutrino Sources

##### 1.4.1 Solar Neutrino Conversion

##### 1.4.2 Light Dark Matter Annihilation

##### 1.4.3 Gravitational Wave and Gamma-Ray-Burst

#### 1.5 Motivation

### 2 KamLAND Detector

#### 2.1 Detector Components

##### 2.1.1 Outer-Detector (OD)

##### 2.1.2 Inner-Detector(ID)

##### 2.1.3 Photo Multiplier Tubes (PMT)

##### 2.1.4 Electronics and Data Acquisition System

#### 2.2 Purification System

#### 2.3 Source Calibration Equipment

#### 2.4 KamLAND-Zen

##### 2.4.1 $\nu\beta\beta$ Search Motivation

- 2.4.2 KamLAND-Zen Experiment
- 2.4.3 Background Suppression and New Inner-Balloon Fabrication
- 2.4.4 Inner-Balloon Installation in 2016
- 2.4.5 Current Status of KamLAND-Zen 800
- 2.5 OD Refurbishment
  - 2.5.1 Motivation and Improvement
  - 2.5.2 Refurbishment Works
  - 2.5.3 External Gamma-Ray Detection with OD Water Level
- 3 Event Reconstruction and Detector Calibration
  - 3.1 Waveform Analysis
    - 3.1.1 Time Bin Width Calibration
  - 3.2 Time and Charge (TQ) Correction
    - 3.2.1 Laser Timing Calibration
    - 3.2.2 Cable Extension for BLR Installation
    - 3.2.3 Timing Calibration with  $^{60}\text{Co}$  Source Run
    - 3.2.4 Timing Calibration with  $^{40}\text{K}$  on PEEK
    - 3.2.5 Summarized Time Correction
  - 3.3 Gain Correction
  - 3.4 Bad Channel Selection
  - 3.5 Dark Charge Estimation
  - 3.6 Muon Track Reconstruction
    - 3.6.1 Muon Selection Criteria
    - 3.6.2 Algorithm on Muon Track Reconstruction
    - 3.6.3 Tracking Performance
  - 3.7 Event Reconstruction
    - 3.7.1 Vertex Reconstruction
    - 3.7.2 Energy Reconstruction
  - 3.8 Vertex and Energy Calibration
    - 3.8.1 Vertex Reconstruction Quality
    - 3.8.2 Energy Reconstruction Quality
    - 3.8.3 Overall Energy Parameters
    - 3.8.4 Run by run Energy Calibration
- 4 Detector Study
  - 4.1 Unphysical Event Cut
    - 4.1.1 Flasher Cut
    - 4.1.2 Ringing Event Cut
    - 4.1.3 Spallation Cut
  - 4.2 Energy Scale
    - 4.2.1 Selection Criteria of Spallation Products

- 4.2.2 Energy Stability
- 4.3 Fiducial Volume
- 4.4 Radioactive Impurities
  - 4.4.1  $^{238}\text{U}$  Series
  - 4.4.2  $^{232}\text{Th}$  Series
  - 4.4.3 Other Low Energy Radioactivities
- 5 AntiNeutrino Candidate
  - 5.1 Dataset and Run Selection
    - 5.1.1 Livetime Calculation
    - 5.1.2 Fiducial Volume Selection
  - 5.2 Anti-Neutrino Selection
    - 5.2.1 Overview of Inverse Beta Decay
    - 5.2.2  $\bar{\nu}_e$  Delayed Coincidence Selection in KamLAND
    - 5.2.3 Michel Election Cut
    - 5.2.4 Multiple Neutron Events
  - 5.3 Likelihood Selection
    - 5.3.1 Dataset for Likelihood Table
    - 5.3.2 PDF for Signal and Background
    - 5.3.3 Definition of Likelihood Function
    - 5.3.4 Likelihood Selection Efficiency
    - 5.3.5 Summary of Uncertainty
  - 5.4 Anti-Neutrino Candidates
    - 5.4.1 DS-1 and DS-2
    - 5.4.2 Reactor Shutdown Phase
    - 5.4.3 All Dataset
  - 5.5 Detector Related Uncertainty
- 6 Background Estimation
  - 6.1 List of Backgrounds
  - 6.2  $^8\text{He}/^9\text{Li}$  Production
  - 6.3 Fast Neutron
    - 6.3.1 Real Data Selection
    - 6.3.2 Muon Flux Simulation
    - 6.3.3 Fast Neutron Generation Simulation
    - 6.3.4 Optical Photon Simulation
    - 6.3.5 Simulation Result for Before OD Refurbishment
    - 6.3.6 Simulation Result for After OD Refurbishment
    - 6.3.7 Summary of Fast Neutron Background
  - 6.4 Accidental Backgrounds
  - 6.5 Alpha N Interaction

- 6.5.1  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  Interaction (No.4)
- 6.5.2 Uncertainties of  $(\alpha, n)$
- 6.5.3 Summary of  $(\alpha, n)$  Backgrounds
- 6.6 Reactor Neutrinos
  - 6.6.1 Reactor Anti-Neutrino Energy Spectrum
  - 6.6.2 Expected Events from Reactors
  - 6.6.3 Reactor Related Uncertainty
  - 6.6.4 Summary of Reactor Neutrino Background
- 6.7 Geo Neutrinos
- 6.8 Atmospheric Neutrinos
  - 6.8.1 Charged Current (CC)
  - 6.8.2 Neutral Current (NC)
  - 6.8.3 Summary of Atmospheric Neutrino Background
- 6.9 Other Negligible Backgrounds
  - 6.9.1 Spontaneous Fissions
  - 6.9.2  $(\gamma, n)$  Interaction
  - 6.9.3 T2K Neutrinos
- 6.10 15 MeV Events
- 6.11 Background Summary
- 7 Analysis and Result
  - 7.1 Model Independent Flux
  - 7.2 Supernova Relic Neutrino
  - 7.3 Solar Neutrino Conversion
  - 7.4 Dark Matter Annihilation
- 8 Conclusion and Outlook

Appendix A. Neutrino Oscillation

Appendix B. Neutrino Detection via Scattering

Appendix C. Gravitational Wave Coincident Neutrino Search

### Abstract

The “Neutrino” is a powerful tool for the study of our astronomy due to its transparency. Astronomical neutrino sources are the Supernova explosion, solar activities, dark matter annihilation, gravitational wave, and others. In this study, the electron-type anti-neutrinos ( $\bar{\nu}_e$ ) from their sources are searched in a liquid scintillator type anti-neutrino detector, KamLAND. The 4183.72 days of all dataset includes Japanese reactor shut down phase which makes the dominant background of reactor-neutrinos at low energy region. The number of observed 2066  $\bar{\nu}_e$  candidates is consistent with the expected number of backgrounds of  $2037.3 \pm$

78.2; accidental coincidence, spallation  ${}^9\text{Li}$ , fast neutron, ( $\alpha$ , n) interaction, atmospheric neutrino interaction, reactor- $\bar{\nu}_e$ , and geo- $\bar{\nu}_e$ . The upper limits are given on the supernova relic neutrino flux,  ${}^8\text{B}$  solar neutrino conversion probability, and the cross-section of light dark-matter self-annihilation. Thanks to the decreased reactor- $\bar{\nu}_e$  in the reactor-off period, the most strict limit of  $\bar{\nu}_e$  flux is given below 10 MeV region. This is an important pioneering study of background estimation for the anti-neutrino physics from astronomy at a multi-MeV region before the start of a future large volume anti-neutrino detectors: JUNO, SK-Gd, and Hyper-KamiokaNDE.

## 別 紙

### 論文審査の結果の要旨

論文題目は「原子炉停止期間におけるカムランドでの超新星背景ニュートリノ探索」である。

本研究の目的は、世界最大の1000トン液体シンチレータを用いた高感度ニュートリノ検出器カムランドによる超新星背景ニュートリノ（以下、SRN という）の探索である。本論文は SRN の内、特に 4 MeV 以下の低エネルギー領域を含む反電子ニュートリノの検出による探索の結果である。

SRN は宇宙の始まりから今日に至るまでの超新星爆発により大量に生成され、その間の星の形成と崩壊の情報を含むため、宇宙の進化を解明する重要な手がかりの1つとされており、その観測と理論的研究が活発に行われている。世界的には稼働中の大型ニュートリノ検出器（スーパーカミオカンデ、SNO、Borexino など）での観測がなされており、現在のところ未発見であるが今後の研究計画でも重要な研究テーマの一つとして検討されている。一方で、理論的には星の形成や超新星爆発のメカニズム等においてモデルの不定性があり、観測によりこれを拘束する情報が得られることが期待されている。

カムランドは本学ニュートリノセンターが推進する実験で、神岡鉱山の大深度地下において超高純度の液体シンチレータを用いて、逆ベータ崩壊反応により特に 1MeV までの低エネルギー反電子ニュートリノの高感度検出に優れている。本研究は 2002 年 3 月から 2017 年 6 月までのカムランドによる反電子ニュートリノ観測実験のまとめと言え、15 年以上の全蓄積データを解析し、既存の背景事象（原子炉ニュートリノ、地球ニュートリノ、大気ニュートリノ等）を調べ観測データとの間に優位な違いがないことを示した。特に低エネルギー領域での最大の背景事象である原子炉ニュートリノが、2011 年の東日本大震災による全国の原子力発電所の長期停止にともない、激減した期間を含んでいることから、結果として SRN は未発見ではあったが世界の他の大型ニュートリノ検出器による探索を大きく凌ぐ制限を与えることに成功した。その成果は高い評価に値するもので博士論文としての十分な価値が認められる。

以上から本研究を行った小原脩平は自立して研究活動を行うに必要な、高度の研究能力と学識を有するものと認められる。したがって本博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。