

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	尾崎 秀義	提出年	令和 2 年
学位論文の 題目	High Sensitivity Search for Neutrinoless Double-Beta Decay in KamLAND-Zen with Double Amount of ^{136}Xe (^{136}Xe を倍増した KamLAND-Zen でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の高感度探索)		

論文目次

- 1 Introduction
- 2 Majorana Neutrino
 - 2.1 Neutrino Physics
 - 2.2 Majorana Neutrino and Neutrino Mass Origin
 - 2.3 Leptogenesis
 - 2.4 Double-Beta Decay Theory
- 3 Double-Beta Decay Experiments
 - 3.1 Double-Beta Decay Experiments
 - 3.2 Discovery Potential
- 4 Detector
 - 4.1 Site
 - 4.2 KamLAND
 - 4.3 Data Acquisition
 - 4.4 KamLAND-Zen Detector
- 5 Upgrade to KamLAND-Zen 800
 - 5.1 KamLAND-Zen 800
 - 5.2 Inner-Balloon Production
 - 5.3 Inner-Balloon Install
 - 5.4 Dummy-LS Distillation
 - 5.5 Xe Dissolving
- 6 Analysis Framework/Event Selections
 - 6.1 Analysis Framework
 - 6.2 Event Reconstruction
 - 6.3 Event Selections
 - 6.4 Livetime
- 7 MC Tuning and Detector Calibration

- 7.1 Source Calibration
- 7.2 Xe-LS Tuning
- 7.3 Detector Stability
- 8 Background Model
 - 8.1 Backgrounds
 - 8.2 Natural Radioactivities
 - 8.3 Inner-Balloon Contamination
 - 8.4 Spallation Backgrounds
 - 8.5 Solar Neutrino
 - 8.6 External Background
 - 8.7 Potential Backgrounds
- 9 Double Beta Decay Analysis
 - 9.1 Analysis Strategy
 - 9.2 Xe
 - 9.3 Uncertainties
 - 9.4 Spectrum Fitting for $0\nu\beta\beta$ Decay Search
 - 9.5 Results
 - 9.6 Sensitivity
 - 9.7 Discussion/Conclusion
- 10 Conclusions
- A Trigger Type
- B Energy Spectra and Radius Distribution
- C Results in KamLAND-Zen 400
- Bibliography

論文内容要旨

This dissertation reports the first results of ^{136}Xe neutrinoless double-beta ($0\nu\beta\beta$) decay search with KamLAND-Zen 800. Majorana nature of neutrinos is an important piece of the theories explaining the matter dominant universe and the extremely light masses of neutrinos. KamLAND-Zen is a search for ^{136}Xe $0\nu\beta\beta$ decay with the large liquid scintillator detector KamLAND, seeking the Majorana nature of neutrinos. The Xe-loaded liquid scintillator was filled in an ultra-low radioactivity container “inner-balloon” at the center of KamLAND. KamLAND-Zen completed the phase of using about 383 kg of Xe (KamLAND-Zen 400) in 2015. Aiming to increase ^{136}Xe isotope mass and reduce ^{214}Bi backgrounds from the inner-balloon film, a cleaner and larger volume inner-balloon was newly created and installed. In the new phase called KamLAND-Zen 800, 745 kg Xe gas 91% enriched in ^{136}Xe , which is about double Xe amount of the previous KamLAND-Zen 400, was loaded. The observation started in January 2019, and the lower limit of the ^{136}Xe $0\nu\beta\beta$ decay half-life ($T_{1/2}^{0\nu}$) was obtained: $T_{1/2}^{0\nu} > 5.8 \times 10^{25}$ yr (90% confidence level: 90% C.L.) with 145 days livetime (219 days runtime). The

90% C.L. lower limit sensitivity of the KamLAND-Zen 800 145 days observation was obtained to be $T^{0\nu}_{1/2} > 8.1 \times 10^{25}$ yr (90% C.L.), and it is the most sensitive measurement for ^{136}Xe $0\nu\beta\beta$ and the effective Majorana mass $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ in the world. The combined results with the KamLAND-Zen 400 gives the strictest limit on the ^{136}Xe $0\nu\beta\beta$ decay: $T^{0\nu}_{1/2} > 12.7 \times 10^{25}$ yr (90% C.L.). It corresponds to the limit on the effective Majorana mass $\langle m_{\beta\beta} \rangle < (49-150)$ meV with the matrix elements in (J. Engel and J. Menéndez, Reports on Progress in Physics 80 (4) (2017)). Although it depends on the model of the nuclear matrix element, the result was the first in the world to reach the band created by the inverted mass hierarchy region at $\langle m_{\beta\beta} \rangle$. KamLAND-Zen 800 is the first $0\nu\beta\beta$ decay search experiment that has the possibility to perform a $0\nu\beta\beta$ decay search in the band of the inverted hierarchy region.

別 紙

論文審査の結果の要旨

本論文は、二重 β 崩壊核 ^{136}Xe におけるニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu2\beta$) を探索するカムランド禅実験において、同位体濃縮キセノン量の倍増に加え、キセノン含有液体シンチレータを内包するミニバルーンの放射性不純物低減や宇宙線による原子核破碎起源の長寿命バックグラウンドの詳細な理解・低減によって、世界で初めてニュートリノ質量の逆階層構造にかかる感度を実現しニュートリノのマヨラナ性を検証するものである。

カムランド禅が探索する $0\nu2\beta$ は非常に稀な現象であるため、キセノンの大量導入に加え、その有効活用のためのミニバルーンの低放射能化も重要となる。製作時の徹底した清浄化によりミニバルーンの放射性不純物は 10 分の 1 に低減され、さらにキセノン量を 745kg にほぼ倍増したことで、有効キセノン量は 3 倍以上の増加が実現した。通常二重 β 崩壊や太陽ニュートリノといった不可避の事象以外では、宇宙線ミュオンが原子核破碎で生成する放射性元素が主要なバックグラウンドとなる。本論文では、炭素原子核破碎で生じる ^{10}C を、ミュオン・中性子・ ^{10}C の三重同時計測や原子核破碎の兆候であるシャワーを同定することによって、問題ならないほどに低減できている。また、その複雑さから詳細理解が難しかったキセノン原子核破碎の生成物も、高度なシミュレーションによって理解を進め、これらが主要なバックグラウンドであること、そして、中性子多重度の高さに着目した解析によって数万秒に及ぶ長寿命核をも効果的に低減できることを示した。その結果、147 日相当のデータの解析によって世界最高感度となる半減期 8.1×10^{25} 年を達成している。過去のデータも含めた統合解析では半減期の下限值 1.27×10^{26} 年 (90%信頼度) を得て、マヨラナ有効質量換算で 48-150 meV 以下 (90%信頼度、数値範囲は主に核行列要素計算の不定性) に達し、制限領域は遂に逆階層のバンド部分に到達した。長寿命核の低減は、将来の逆階層構造をカバーする探索にも大きく貢献するものである。

本論文は、世界で最も厳しいニュートリノのマヨラナ有効質量への制限を与え、バックグラウンドの詳細な理解とその低減方法を提示したものである。これらの成果は、自立して研究活動を行うのに必要な高度な研究能力と学識を有することを示しており、したがって、尾崎秀義提出の博士論文は博士 (理学) の学位論文として合格と認める。