

Title	Development of prototype detector MOON-1 for double beta decay from ^{100}Mo
Author(s)	中村, 秀仁
Citation	
Issue Date	
Text Version	none
URL	http://hdl.handle.net/11094/46442
DOI	
rights	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

氏名	なかむらひと 中村秀仁
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 20008 号
学位授与年月日	平成 18 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科物理学専攻
学位論文名	Development of prototype detector MOON-1 for double beta decay from ^{100}Mo (^{100}Mo の二重ベータ崩壊測定用プロトタイプ検出器 MOON-1 の開発)
論文審査委員	(主査) 教授 能町 正治 (副査) 名誉教授 江尻 宏泰 教授 岸本 忠史 教授 永井 泰樹 助教授 青木 正治 助教授 小田原厚子

論文内容の要旨

Recent studies of neutrino oscillations suggest that the effective mass to be studied by neutrinoless double beta decays is of the order of 0.1~0.02 eV if the neutrino is a Majorana particle in nature and the mass spectrum is of the quasi-degenerate (QD) or the inverted hierarchy (IH). Thus it is of great interest to study double beta decays with the QD and IH sensitivities. ^{100}Mo is shown to have large responses for the double beta decays.

MOON (Molybdenum Observatory Of Neutrinos) is a double beta decay experiment with a ton's scale of ^{100}Mo . It aims at high-sensitivity studies of the neutrinoless double beta decays with sensitivity to the effective mass of $\langle m_{\nu} \rangle \sim 30$ meV in order to study the effective mass in the QD and IH regions.

The MOON detector consists of multi-layer modules with plastic scintillators and enriched ^{100}Mo foils. It is based on the double beta decay study of ^{100}Mo by the ELEGANT-V. When 2 ton ^{100}Mo source with 95% enrichment is used, 8 decays/year can be expected assuming the neutrino mass of a few meV. In this case, the total area of the ^{100}Mo foil will be 5,250 m² with 40 mg/cm². The several thousand layers of a few m² foils will be used. Two beta rays from ^{100}Mo foil are detected by two plastic scintillators, which are placed above and below the ^{100}Mo foils. The other plastic scintillators are used as an active shield to reduce the radioactive background (BG) events. A plastic scintillator layer works as a calorimeter as well as an active shield.

The two-neutrino double beta decay signals ($2\nu\beta\beta$) are background in the $0\nu\beta\beta$ window at the $Q_{\beta\beta}$ (3.034 MeV) region. The good energy resolution is crucial to reduce the $2\nu\beta\beta$ background. Neutrino mass sensitivity depends on the energy resolution. The energy resolution of around 7% in FWHM at the $Q_{\beta\beta}$ is required for MOON. Most RI BG's are below the $0\nu\beta\beta$ signals. These requirements are evaluated to be realized by the MOON multi-layer plastic scintillator modules with large PMT coverage i.e. large photon-collection efficiency.

The MOON-1 detector was built as a prototype of the MOON detector to prove feasibilities of the MOON detector with the requirements as given above. MOON-1 consists of 6 plastic scintillators, each 1 cm thick and

53 cm by 53 cm, and 3 layers of enriched ^{100}Mo foils (94.5% enrichment), which is divided into four sections. Each section consists of 2 foils, each with 20 mg/cm² thick and 18 cm by 18 cm in the area. ^{100}Mo foil is interleaved between two PL's. The ^{100}Mo foils are supported with the aluminized Mylar films. 56 PMTs, each with 60 mm by 60 mm, are attached to the four PL sides to get about 82% coverage of the four-side surface. One PMT sees 3 layers of the plastic scintillators. The hit layer can be identified by the PMT hit pattern. The measurement using the MOON-1 detector is carried out at the Oto underground laboratory (1,400 m w.e.) since August 2005. The MOON-1 detector is placed inside the shield of the ELEGANT V detector. The 14 NaI detectors, each with 10.2 cm by 10.2 cm and 101.6 cm long, are placed at top and bottom of the MOON-1 detector.

Relative gains of PMT are adjusted by using the Compton scattering of the ^{208}Tl 2.61 MeV gamma rays. The absolute energy scale is calibrated by using the sum of the energy deposits on a Plastic scintillator and a NaI(Tl) detector. The energy resolution of a plastic scintillator is obtained from the measured energy resolution of the reconstructed gamma-ray peak and that of the NaI detector.

The energy resolution for the plastic scintillator was found to be as good as $7.9 \pm 1.4\%$ in FWHM at the 2.08 MeV regions. It meets the required energy resolution of the MOON detector at $Q_{\beta\beta}$ (3.034 MeV).

The data of 12 days (live time 276 hours) are analyzed. The double beta decay events will be identified requiring two beta rays emitted at opposite sides to give signals at two adjacent layers of the plastic scintillators. Two-layers hit events for one ^{100}Mo foil, which is 51 g, is analyzed. 200 keV deposit is required for one layer and 500 keV deposit is required for summed deposit on two layers. Hits in the other layers, more than 200 keV deposit, and the NaI(Tl) detectors are used as veto. In this analysis, no event is observed over the 2.7 MeV regions for 12 days measurement. The detection efficiency of MOON-1 detector is estimated with Monte Carlo simulation for $0\nu\beta\beta$.

It was found to be 39.5% in the energy window over the 2.7 MeV. The systematic error by the energy window was found to be most. The detection efficiency is $39.5^{+4.5}_{-6.5}(\text{syst.})\%$. Upper limit of the half-life time for $0\nu\beta\beta$ is obtained to be $T_{1/2} > 1.2 \times 10^{21}$ years 90% CL from 612 g·day measurements.

In short, the energy resolution of around 7% in FWHM for the large size (1 cm thick and 53 cm by 53 cm) multi-layer plastic scintillator modules was obtained. The data reduction and the $0\nu\beta\beta$ event analysis were made successfully for the MOON-1 multi-layer plastic scintillator modules. The $0\nu\beta\beta$ efficiency of around 40% is achieved for MOON-1.

These result show experimentally, for the first time, the feasibility of MOON with the IH mass sensitivity in views of the energy resolution.

標準理論を越える新しい素粒子宇宙物理がニュートリノ研究で拓かれようとしている。スーパーカミオカンデ、SNO、KamLAND、K2K その他のニュートリノ振動測定によりニュートリノ質量差の存在が確認された。また大気ニュートリノ振動のデータに最も良くフィットする大混合角 (LMA 解) において、ニュートリノ振動パラメーターの中心値は $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1, 2.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2)$ と決定された。しかしニュートリノ質量、マヨラナ粒子性等の基本的性質は未知である。二重ベータ崩壊の測定は、ニュートリノの基本性質を解明し、電弱相互作用の標準模型の枠を超えた新しい物理に重要な役割を果たすと期待されている。

そこで我々 MOON (Molybdenum Observatory Of Neutrinos) グループは二重ベータ崩壊核種の一つである ^{100}Mo からの二重ベータ崩壊を精密測定することでニュートリノ質量の絶対値測定とマヨラナ粒子性の解明に挑む。 ^{100}Mo は二重ベータ崩壊を起こす原子核の中でも 3.034 MeV と大きな Q 値を持つ。これは大抵の放射性不純物によるバックグラウンド (BG) より高い。また Q 値の 5 乗に比例する大きな (^{76}Ge より 1 桁上) 位相空間を持つため、ニュートリノ質量に対する感度も高い。 ^{100}Mo (40 mg/cm², 2ton) を用いてニュートリノ質量を Inverted Hierarchy (IH : 30 meV) 領域で検出するには、ニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) と BG となる 2つの β 崩壊が同時に同じ原子核内で起こる二重ベータ崩壊 ($2\nu\beta\beta$ 崩壊) を識別しなければならない。そのためには、 $Q_{\beta\beta}$ 値

3 MeV に対して 7% (FWHM) の分解能を持つ検出器が必要である。この分解能を実現するため、MOON 検出器の開発をする。

MOON 検出器ではエネルギーのカロリーメータとしてプラスチックシンチレーター (PL) を用いる。3 MeV に対して 7% (FWHM) の分解能を達成するには高い集効率が重要である。そこで PL の 4 側面を多数の光電子増倍管で覆うことにより多数の光子を集光する。MOON 検出器は、この PL と ^{100}Mo フォイルを層状に重ね合わせること (多層構造) で構築する。多層構造を適用することで少スペース化とし、検出器の大型化を可能にする。

MOON 検出器の R & D と BG 測定を目的として、プロトタイプ検出器 (MOON-1) 検出器を開発した。この MOON-1 検出器は ^{100}Mo (40 mg/cm²、純度 94.5%、142 g) と 6 層の PL (53×53×1 cm³) から成る。また 56 本の光電子増倍管を用いることにより全側面の約 82% を覆った。2005 年 4 月から奈良県の大塔コスモ観測所 (1,500 m w.e.) にて、MOON-1 検出器を用いた二重ベータ崩壊測定を開始した。

論文審査の結果の要旨

素粒子物理の重要な課題のひとつとして、ニュートリノ質量の解明がある。二重ベータ崩壊の測定はニュートリノ質量を調べる上で欠かすことのできない重要な実験である。

本論文では、二重ベータ崩壊を測定するために計画されている大型検出器 MOON 開発のためのプロトタイプ検出器を製作し、大塔地下実験室でデータ収集を行い、その性能評価を行った。ニュートリノ質量を測定するためには、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の測定が必要であるが、その際、ニュートリノを伴う二重ベータ崩壊がバックグラウンドとなってしまう。これらを区別するには、良いエネルギー分解能でベータ線のエネルギーを測定するしかない。開発した検出器は、エネルギーをプラスチックシンチレーターで測定している。本論文では、エネルギー分解能の新しい測定方法を確立するとともに、シンチレーターからの蛍光を効率よく集めることにより、大型のプラスチックシンチレーターにもかかわらず、これまでよりも良い分解能を得ることができた。また、検出器をできるだけコンパクトにした上で必要な性能を出せることを実際のデータ収集・解析で実証した。

これらにより、ニュートリノ質量の解明を目指す MOON 計画でもっとも懸念されていたエネルギー分解能と大型化に関して大きな進展を得ることができた。本論文の成果は、ニュートリノ質量の解明に貢献するものである。よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値のあるものと認める。