

Title	Study of a Large Volume CaF ₂ (Eu) Scintillating Bolometer with Metallic Magnetic Calorimeter
Author(s)	李, 曉龍
Citation	
Issue Date	
Text Version	ETD
URL	https://doi.org/10.18910/76360
DOI	10.18910/76360
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (李 曉 龍)

論文題名

Study of a Large Volume CaF₂(Eu) Scintillating Bolometer with Metallic Magnetic Calorimeter
 (大型CaF₂(Eu)シンチレーション結晶と金属磁気熱量計を用いた熱量蛍光検出器の研究開発)

論文内容の要旨

Neutrinoless double beta (0νBB) decay is a way to prove fundamental properties of neutrinos, such as Majorana nature, mass hierarchy and absolute mass scale. Many experiment groups around the world are developing various detection techniques and competing to observe the 0νBB decay for the first time.

Scintillating bolometer is a powerful tool to search the 0νBB decay, because it can achieve a high energy resolution and a good discrimination power to reduce background. Our experiment group plans to develop a scintillating bolometer to search for the 0νBB decay of ⁴⁸Ca.

We established a large scintillating bolometer using a 312 g CaF₂(Eu) crystal with a readout technology of metallic magnetic calorimeters. Phonons and scintillation photons of the CaF₂(Eu) are detected by a meta film phonon collector and a germanium light detector, respectively. Since CaF₂(Eu)'s scintillation is easy to be absorbed by metals, we developed a special multi-layer metal film phonon collector having both a high thermal conductivity and a high optical reflectivity. We also studied a physical mechanism to understand the detector system through some basic calculations and Monte Carlo simulation.

A set of successful measurements were carried out for simultaneous detection for heat and light signals at a few 10 mK in an above-ground laboratory. We found large light signals with clear difference in scintillation yields between electron- and alpha-induced events. The comparison of relative amplitudes of heat and light signals obtained about 10 σ discrimination power. The resolution of scintillation signals was 3.1% for 4.9 MeV alpha events, so we can estimate that the same energy beta/gamma events should have 1.3% energy resolution because of a 17% quenching factor. The resolution exceeded the current running CANDLES experiment's 2.5%.

The intrinsic resolution of phonon signals was 0.3% (FWHM) at 5.6 MeV, which was evaluated by silicon heater's signals and ²²²Rn → ²¹⁸Po → ²¹⁴Pb continuous alpha decay events. This intrinsic resolution has already satisfied our goal of resolution, 0.5% (FWHM). Through the study of the continuous alpha decay, however, we also found the phonon signals experiencing strong position dependence from the event locations. This position dependence can be interpreted by the spin-lattice interaction of paramagnetic Eu ions in the CaF₂ crystal.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (李 曉 龍)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	川畑 貴裕
	副 査	特任教授	岸本 忠史
	副 査	准教授	嶋 達志
	副 査	准教授	酒井 英明
	副 査	准教授	梅原 さおり
	副 査	准教授	吉田 斉
論文審査の結果の要旨			
<p>近年のニュートリノ研究から、ニュートリノの素粒子的性質が解明されつつあるが、質量の絶対値やその起源、およびニュートリノだけがなぜ微小な質量を持つのかなど未解明な基本的性質が多く残されている。ニュートリノレス二重ベータ ($0\nu\beta\beta$) 崩壊探索は、それらの謎に迫ることができ、ニュートリノの基本性質を解明するうえで極めて重要な研究と位置づけられている。世界中で発見を目指して激しく競争が行われており、長期観測・検出装置の開発が精力的に行われている。</p> <p>本論文は、二重ベータ崩壊核 ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の高感度化を目的として、Ca 蛍光結晶を使った蛍光熱量検出器の開発について記述されている。この検出器は、高いエネルギー分解能と反応粒子識別能を実現することが原理的に可能であり、$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の高感度化に大きく寄与できると期待されている。</p> <p>$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索用検出器への実用を目指して、50mm 径×50mm (312 g) の大きさを持つ $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレーション結晶を、10 mK という極低温まで冷却し、MMC (Metallic Magnetic Calorimeter) といわれる温度変化を磁化率の変化として読み出す超伝導センサーによって、放射線が $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレーション結晶でエネルギーを失った際に発生する、熱量 (結晶の温度上昇) と光量 (シンチレーション結晶による発光) を測定する検出器を構築した。</p> <p>学位申請者が行った検出器の開発では、$\text{CaF}_2(\text{Eu})$ のサイズがこれまでの先行研究と比較して 1000 倍になっており、大容積の検出器が必要になる $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索への実用を視野に入れた飛躍的な進展を目指している。また、従来使用されてきた、熱量を読み出すための金属蒸着膜を Au 膜から Ti-Ag-Au 多層膜に変更することで、$\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶の蛍光発光中心である 425 nm 付近での効率的な光反射と熱吸収を同時に実現した。この手法は、現在すでに開発が進んでいる他の蛍光結晶を用いた蛍光熱量検出器にも応用可能である。</p> <p>実験の結果、大容積の $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 検出器からの熱量と蛍光の同時読み出しに成功し、解析の結果、α 線と β/γ 線の粒子識別能は 10σ という極めて高い分離能を得ることに成功している。これは、蛍光の検出のみで行われる粒子識別能が $2\sim 3\sigma$ であることと比べて、飛躍的な性能改善を実現できている。エネルギー測定分解能は $1.3\%(\text{FWHM})@5\text{MeV}$ と、現行の検出器よりも改善は期待した熱量信号を使用した高エネルギー分解能は達成できていない。エネルギー分解能の向上を妨げているのが、熱信号の大きさが $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶の場所に依存することが原因であることを、結晶内部に一様に含まれている ^{226}Ra 放射能による連続崩壊の分析から突きとめ、信号の位置依存性を抑えることができれば 0.3% までエネルギー分解能を改善できることを明らかにしている。位置依存性を生む物理的要因が、発光活性剤として添加された Eu の磁性であることも考察によって指摘しており、今後のさらなる改善に対して独自の視点からアイデアを提案している。</p> <p>本論文の結果は ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索を目指す上で大きな一歩と言え、これまでに発見されなかった蛍光熱量検出器の新しい材料異存の性質を明らかにするとともに、高い粒子識別能と固有エネルギー分解能を持つ有望な検出器であると結論づけている。</p> <p>以上のことから、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。</p>			