

# 低エネルギーニュートリノによる新たな物理特性探索用検出器の開発研究

## Research on the development of detectors for the search of new physical properties by low-energy neutrinos.

(日本物理学会推薦)

代表研究者 日本大学理工学部 小川 洋 CST Nihon University Hiroshi OGAWA

The aim of this study is to develop a low-threshold, low-background proportional counter as a detector to search for undiscovered exotic interactions as a new physics in low-energy neutrinos. The search for exotic neutrino interactions seeks to observe neutrino interactions via unknown gauge bosons, such as weak charges and magnetic moments which the quantities of matter not considered in the Standard Model. A distinctive feature of this research program is the development of new detectors with sensitivity in the low energy region around 1 keV in order to search for new neutrino properties. To achieve this, three factors are important: (i) the detector must be placed in the vicinity of reactor neutrinos to earn neutrino flux, (ii) it must have a low threshold, as events are expected to increase in the low-energy region, and (iii) it must have a low background. In this application, an evaluation of the performance of proportional counters to meet these three factors will be carried out.

### 研究目的

本研究の目的は、低エネルギーニュートリノにおける新たな物理として、未発見であるニュートリノ物性や相互作用を探索するための検出器を開発することであり、手法として低閾値・低バックグラウンドの比例計数管を採用する。

日本の XMASS 実験では、2020 年に、太陽ニュートリノによるニュートリノ・電子散乱におけるエキゾチックな相互作用の探索結果を発表した[1]。ニュートリノのエキゾチックな相互作用の探索は、ニュートリノに微弱電荷や磁気能率といった、標準理論では考慮していない物性がある場合の相互作用や、ダークフォトンといった未知のゲージボソンを介したニュートリノ相互作用などが候補に挙げられる。

- ニュートリノの微弱電荷：標準模型 (SM) では、ニュートリノの電荷はゼロと仮定されている。SM を拡張し、右巻きニュートリノ  $\nu_R$  の場合、ニュートリノはディラック粒子であり、ニュートリノは微弱電荷を持つことを許容される。

- ニュートリノの磁気能率：SM の質量なしニュートリノは、磁気モーメントを持たない。しかし、SM を最小に拡張した場合、ニュートリノが質量を持つディラックニュートリノとして、有限のニュートリノ磁気モーメントが  $O(10^{-19})\mu_B$  程度と予想される。そのような小さなニュートリノ磁気モーメントを実験的に検出することは、現在のところ不可能である。しかし、SM 理論の別の拡張では、現在観測可能なレベルのニュートリノ磁気モーメントを得ることが許容される。例えば、ニュートリノが Majorana 粒子である場合、遷移磁気モーメントは、次のような拡張で  $O(10^{-12} \sim 10^{-10})\mu_B$  と見積もられる。
- ダークフォトン：ニュートリノの質量や暗黒物質の粒子性など、SM では説明できない未解決の問題が数多くあり、SM を超える新しい物理シナリオが求められている。Dark sector シナリオはその一つである。このシナリオでは、ゲージ  $U(1)_{B-L}$  対称性に由来するダークフォト

ンが含まれている可能性があり、ニュートリノと電子の相互作用に、ダークフォトン媒体として影響を与える可能性がある。

以上のようなニュートリノの物性や、ゲージボソンが存在する場合、ニュートリノと電子の相互作用は、標準理論で期待される弱い相互作用の他に、追加の相互作用が発生することが期待され、それに伴う電子散乱事象は、keV 領域以下の低エネルギーで増加すると考えられる。このようなエキゾチックなニュートリノ相互作用の探索は、低閾値、低バックグラウンド環境である暗黒物質探索実験が有利であり、XMASS 実験の結果はその先駆けとなった。2022 年には、イタリア・グランサッソで実施されている XENONnT 実験による電子散乱事象解析結果で、ニュートリノの磁気能率の上限について  $6.4 \times 10^{-12} \mu_B$  (Bohr magneton) という、極めて強い制限を付けた[2]。XMASS 実験や、XENONnT 実験は、地下に設置された暗黒物質探索検出器であるという性質上、ニュートリノ源として太陽ニュートリノを想定した探索になっている。本研究では、低エネルギーニュートリノにおけるこのような相互作用を探索するために、ニュートリノフラックスが多い原子炉近傍での観測を目標とする。また、検出器手法としては、比例計数管を採用する。

その理由はとして、以下の 3 つの要素を満たすことであるからである

1) ニュートリノ・フラックス：ニュートリノのフラックスについては、原子炉からのニュートリノを想定すると、MW と L~15m では太陽ニュートリノの約 400 倍のフラックス量が予想され、原子炉を停止させればバックグラウンド事象率を直接知ることができる。図 1 が、原子炉近傍でのニュートリノ測定イメージとなる。原子炉の近くに検出器を設置することができれば、太陽ニュートリノによる観測よりも高感度で測定することができる。原子炉の近くに設置するためには、できるだけ数 m 以下の小型でシンプルな検出器が望まれる。

2) 閾値が低いこと：エキゾチックな相互作用による事象は、エネルギーが低いほど期待される事象数が多くなる。そのため、感度を向上させるためには、閾値が低いほど有利になる。本研究では、検出器を液体ではなくガスにし、ガスによる信号増幅率を稼ぎ、発生した電離をすべて信号情報として利用することで、1keV 付近の閾値を目指す。

3) 低バックグラウンド：できるだけ検出部材が少なく、シンプルな検出器構造が望まれる。また、検出対象を固体結晶ではなく気体とすることで、放射性不純物の浄化が容易になる。

比例計数管の難点としては、ターゲットがガスとなることから、物質量が少なくなることである。そのため、本研究では、比例計数管の圧力を大気圧よりも上げて実施する必要がある。理想的には 1MPa (~10 気圧)程度が目標となる。

原子炉付近に検出器を置いたニュートリノ実験は古くからおこなわれており、有名なのが、1956 年のライネスによるニュートリノの発見である。ニュートリノの物性研究としては、GEMMA 実験によるニュートリノの微弱電荷、磁気能率探索が挙げられる。極低放射能比例計数管によるガス中放射能の測定に関しては、PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) における先行研究がある[3]。これは主にアルゴンガス中の同位体  $^{37}\text{Ar}$  の含有量を求める為のものとなっている [4]。また、アルゴンをキャリアガスとした、ガス中のラドンを比例計数管で観測する手法も実施されている[5]。本研究では、同等の性能が期待される比例計数管により、ニュートリノの物理特性研究という新しい研究を実施することを目指す。到達感度としては、ニュートリノ磁気能率において、 $10^{-12} \mu_B$  オーダーという、世界最高レベルの感度と、ダークフォトンの質量とニュートリノとの結合についての新たな制限を付けることが可能な性能を目指す。

本助成研究においては、プロトタイプのプロトタイプ比例計数管検出器と周辺セットアップを製作し、X 線などに

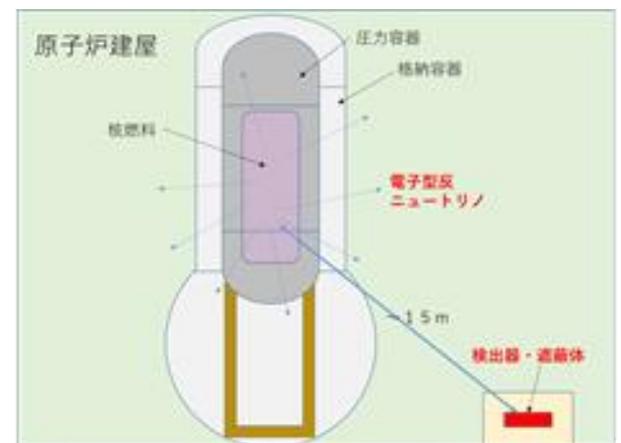


図 1: Image of neutrino measurements in the vicinity of a nuclear reactor.

対するレスポンスやバックグラウンドを測定し、将来的な検出器製作における基本データを取る。その上で、本研究用検出器のデザインについても考察をする。

### 研究経過

本研究の実験は2種類の検出器による測定で実施された。一つ目は、低エネルギーX線を外部から照射可能な小型の比例計数管であり、本助成研究によって製作した。二つ目が、日本大学理工学部で所有している8Lの大型比例計数管で、ガス中のラドンの計測とバックグラウンドの評価を行った。結果についてそれぞれ以下に述べる。

#### 1) 小型の比例計数管による測定

まず、小型の比例計数管によって、X線に対するレスポンスを測定する。またこのセットアップでは、比例計数管を鉛のシールドで覆い、シールドの上下を宇宙線ミュオンが同定できるプラスチックシンチレーターを設置することで、本研究における測定器のプロトタイプとして機能できる。図2に、小型比例計数管のセットアップを示す。比例計数管の本体は、 $\Phi 4\text{cm} \times L 40\text{cm}$ のSUS製となっており、内部にPL-10(アルゴン90%, CH<sub>4</sub>10%)を充填することができる。フィードスルーを通して、比例計数管からの信号を取り出すことができ、プリアンプ、リニアアンプで増幅し、PHA (peak hold ADC)とPCでデータを取得する。また、PL-10ガスは、ガスライン及び循環ポンプで循環させ、フィルターを通してガス

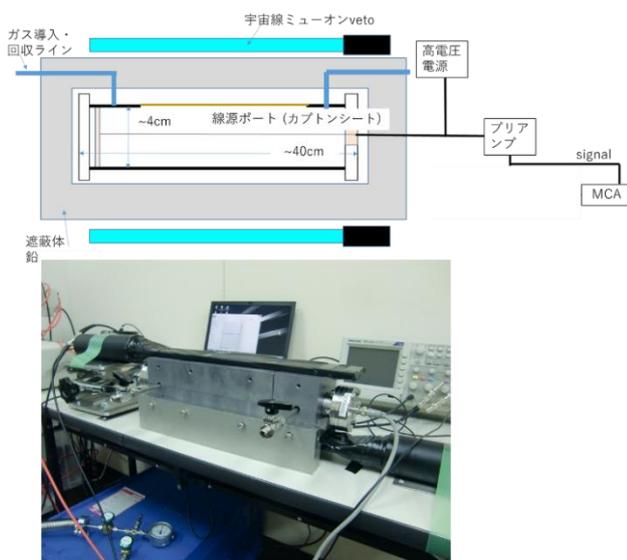


図 2: The setup of the small proportional counter.

の純化が可能である。本比例計数管には、カプトンシートによる線源照射窓がついており、外部からX線の照射が可能となっている。

まず、X線に対するレスポンスを、<sup>55</sup>Fe線源を用いて測定した結果を図3に示す。この時のHVは1600Vであり、ガス圧力は1気圧である。この結果、5.9keVのX線がはっきりと観測でき、エネルギー分解能は9.7%となった。また、小さいチャンネルではアルゴンの励起X線のエスケープピークが観測され、1keV付近の事象について感度があることが明らかになった。

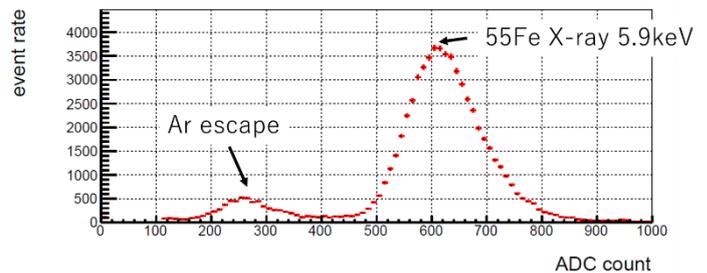


図 3: channel distribution from <sup>55</sup>Fe X-ray

次に、X線線源として再び<sup>55</sup>Feを用い、ガスの圧力と印加電圧を変えて、相対的なガス増幅率を調べた結果を図4に示す。残念ながら、カプトンシートの強度の問題もあり、加圧は1.5気圧までとした。その結果、1気圧、1.5気圧の場合について、印加電圧と増幅率に相関がみられた。この相関は増幅率の比例計数管構造、ガス種、ガス圧力、印加電圧依存を示したDiethornの式[6]に従う。

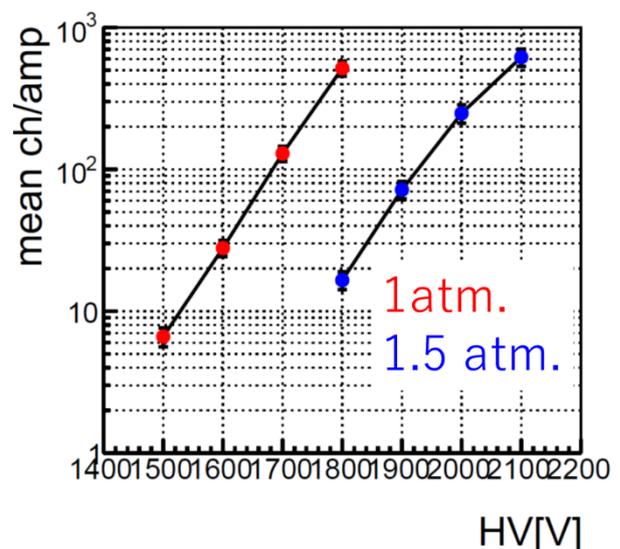


図 4: relative gain in the supplied voltage and gas pressure.

次に、小型比例計数管のバックグラウンド事象を観測した。ガスの純度を保つため、ガスを循環しながら、公募者が開発したゼオライトでガス純化した。これにより、ガスの純度が下がることなく、今日機関の安定した測定が可能となった。図5にバックグラウンドのエネルギー分布を示す。エネルギーは1000chでおおよそ10keVとなる。青がすべての事象、赤がプラスチックシンチレーターで観測されたミュオンと同期した事象である。10keV付近までに外部由来と考えられるバックグラウンド事象が観測された(10keV付近のピークは、MCAのsaturationに由来している)。

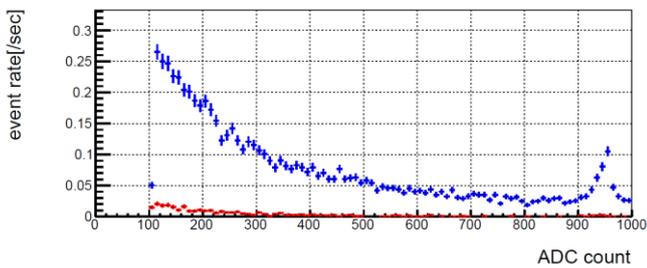


図5: background event spectrum (blue) with muon induced event spectrum (red) for the proportional counter.

## 2) 大型の比例計数管による測定

次に、日本大学理工学部が所有する大型の比例計数管による測定結果を報告する。比例計数管は、Φ80×L1000mmのサイズで、図6(左)のように、こちらもガスの循環ラインとつないである。ただ、鉛シールドや宇宙線ミュオンの同定はできない。エネルギー較正は、放射性ラドンガスからのα線をエネルギー較正として使用する。このα線は5MeV以上であることから、低エネルギーにおける特性評価ではない。比例計数管に1気圧のアルゴンを充填し、

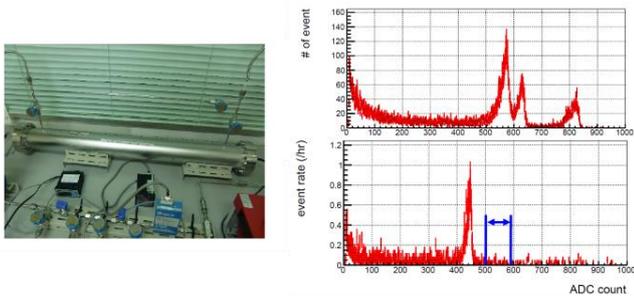


図6: (left) The picture of the large volume proportional counter (right-top) ADC distribution for radon injected data. (right-bottom) background distribution.

ガス中にラジウムセラミックボールをラドン源として、ラドンを導入した。また、バックグラウンド事象の分布も測定した。その結果をそれぞれ図6(右上)、図6(右下)に示す。まず、ラドンを導入したデータでは、ラドン自身、及びその娘核である $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ の崩壊によるα線ピークがはっきりと観測できた。このカウント数と、ラドン量から見積もった $^{222}\text{Rn}$ の検出効率は $27.4 \pm 0.4 \text{ count/day/mBq @ 8L volume}$ となる。また、バックグラウンドのデータより見積もられた $^{222}\text{Rn}$ のバックグラウンドは、 $0.84 \pm 0.13 \text{ mBq @ 8L volume}$ となることが分かった。

## 考察

二種類の比例計数管の性能特性の測定結果を実施した。

小型の比例計数管による測定においては、 $^{55}\text{Fe}$ からのX線を観測することができ、O(keV)の事象測定が可能であることが分かった。また、相対増幅率のガス圧依存も測定した。本研究では、1.5気圧までの加圧であったが、増幅率を印加電圧の相関を観測できた。今後さらにガスを加圧すると同時に印加電圧を上げるためには、電磁ノイズ対策が重要となる。特にプリアンプへの対策が不十分だと、ガス圧1atmでも $^{55}\text{Fe}$ からのX線が電磁ノイズにかぶってしまう。本研究では、プリアンプ内配線をなるべくシールドするなどの対策を実施した。

バックグラウンドとしては、環境からのバックグラウンドが主であり、宇宙線ミュオンの寄与は少ない。今後は、鉛シールドの増強(低RIの鉛・無酸素銅など)で環境のγ線対策をする。また、ポリエチやホウ素を用いたシールドを導入し、環境の高速・熱中性子遮蔽も試みたい。これは、原子炉近くに検出器を置いた場合に、原子炉からの中性子対策にもなる。また、ガス自身の放射性不純物としては、ラドンとその娘核が考えられる。大型比例計数管における $^{222}\text{Rn}$ のバックグラウンドは、 $0.84 \pm 0.13 \text{ mBq @ 8L volume}$ であった。これは公募者が開発した極低放射能ゼオライトによつての削減が期待される。本研究測定で得られた知見より、ニュートリノの新たな物理特性探索用検出器の開発に生かしていきたい。

本研究の手法の発展として、ニュートリノの電子散乱事象の方向を知ることが出来ればさらなるバックグラウンドの削減が可能である。すでに、MUNU実験[7]が、原子炉近傍にTPC(time projection chamber)を置き、電子散乱の方向測定を試みて、ニュートリ

ノの磁気能率の上限を求めているが、閾値が高く (700keV @ 3bar, 200keV@1bar)、感度としては十分でなかった。現在進めている暗黒物質の方向探索実験 NEWAGE [8]では、 $\mu$ -PIC を用いたより高感度な事象方向測定を目指している。NEWAGE では、閾値が 70keV @ 1bar まで下がっており、さらなる方向感度の向上が期待される。

#### 参考文献

1. K. Abe et. al, Phys. Lett. B809 (2020) 135741
2. E. Aprile et. al, Phys. Rev. Lett. 129, 161805
3. EK Mace et al, Poster in LRT2013
4. J. Hall et. al. Appl Radiat Isot. 107(201)p187
5. G. Zuzel GZAppl Radiat Isot. 67(2009)p889
6. Glenn F. Knoll, 放射線計測ハンドブック

7. Z. Daraktchieva et. al, Phys. Lett. B615:153-159, 2005

8. Tomonori Ikeda et. al, PTEP, (2021) ptab0532101. 09921

#### 研究の発表

口頭発表

1. “暗黒物質探索実験用極低放射能ゼオライトの性能試験” 小川 洋、2022 年 9 月、日本物理学会 2022 年秋季大会
2. “暗黒物質探索実験用極低放射能ゼオライトの開発と性能評価” 小川 洋、2022 年 11 月、第 8 回極低放射能技術研究会-

誌上発表

1. H. Ogawa, arXiv:2212.01517