O-7

ニュートリノ振動及び暗黒物質探索研究への貢献

Contribution to the research for the neutrino oscillation and dark matter search experiment.

○小川　洋[1]

*Hiroshi Ogawa[1]

Abstract: I have conducted research on elementary particle and nuclear physics experiments in underground experimental facilities. Various results have been achieved in neutrino research by Super-Kamiokande and KamLAND experiments and dark matter search research by XMASS experiment. In this talk, I will present the results of search for the exotic neutrino interactions by the XMASS experiment. I will also propose the research aimed at independently experimenting with the search for exotic neutrino interactions at CST Nihon University.

１．Intorduction

素粒子・原子核物理実験において、大型の検出器によって宇宙・自然からの素粒子を観測・研究する非加速器実験という分野がある。この研究では、地球や太陽・宇宙から大量に飛来する素粒子を観測することで、素粒子・宇宙の謎に迫る。特に、このような検出器を地下に設置し、地上に大量に降り注いでいる一次宇宙線や、ミューオン粒子を遮蔽することで、物質とめったに反応しないニュートリノの観測や、宇宙に存在すると言われてまだ未検出である暗黒物質の探索が盛んに実施されている。

ニュートリノは、質量が非常に小さく（電子の 10 万分の 1 以下）、標準理論では電荷、磁気能率がゼロと考えられ、物質とほとんど反応しない。岐阜県神岡にある神岡地下素粒子実験施設において、純水 5 万トンを用いたスーパーカミオカンデ実験、液体シンチレータ 1000 トンを用いたカムランド実験によって、ニュートリノの観測が実施されており、ニュートリノ振動の発見など、講演者も研究に参賀し、様々な成果をあげてきた。一方、暗黒物質は、宇宙の大規模構造に大きく関わっていると考えられ、天文学観測より存在が示唆されているが、今だ未発見である。上施設では、液体キセノン 1 トンを用いた暗黒物質探索のための XMASS 実験が実施されていた。

本講演では、講演者が関わっている XMASS 実験検出器によって、ニュートリノのエキゾチック（特異）な相互作用を探索した結果を発表する[1]。この探索手法は、講演者が独自に考案したものである。また、日大理工学部で独自にニュートリノのエキゾチックな相互作用探索をするための検出器開発についての研究計画を示す。

２．エキゾチックなニュートリノ相互作用の探索

ニュートリノは質量が非常に小さく、素粒子の標準理論では、ニュートリノは“弱い相互作用”しか反応をしないと考えられている。しかし、もしニュートリノに標準理論で予想されていない性質があれば、もっと別の強い反応を引き起こす可能性がある。例えば、ニュートリノが標準理論ではゼロと考えられている電荷や磁気能率がある程度の大きさを持つ場合には、ニュートリノがより強い相互作用である“電磁相互作用”を生じる可能性がある[2]。さらに最近注目度が上がってきているダークフォトンと呼ばれる未発見で、暗黒物質の候補となる素粒子が、ニュートリノの相互作用に影響を及ぼす可能性も考えられる[3]。これらがもし発見されれば、ニュートリノ振動の発見によりニュートリノに質量があることを示したのと同様、標準理論を越えた物理として世紀の発見となる。

このようなニュートリノのエキゾチックな（特異な）相互作用の影響は、数 keV 程度のエネルギー領域で観測されやすいと考えられ、この低いエネルギー領域に感度を持ち、低バックグラウンドである暗黒物質検出器が観測に有利となる。XMASS 検出器[4]は、世界初のトンスケールの暗黒物質探索検出器であり、直径 80cm の液体キセノン感度領域の周りを 642 本の光電子増倍管が囲い、暗黒物質が液体キセノン原子核と反応したときに発生するシンチレーション光を観測することを目指す。エキゾチックなニュートリノ相互作用は、ニュートリノの液体キセノン中の電子の反応を観測することとなる。ニュートリノ源としては、地球に大量に降り注いでいる太陽での核融合反応で生成される太陽ニュートリノを考える。

2013 年 11 月から、2016 年 3 月までのうち、711 日分の XMASS 実験データで解析を実施した。Figure 1（左）に、一例として、ニュートリノの微弱電荷の探索の解析結果を示す。その結果得られたデータは予想される検出器の放射線不

１：日大理工・教員・物理

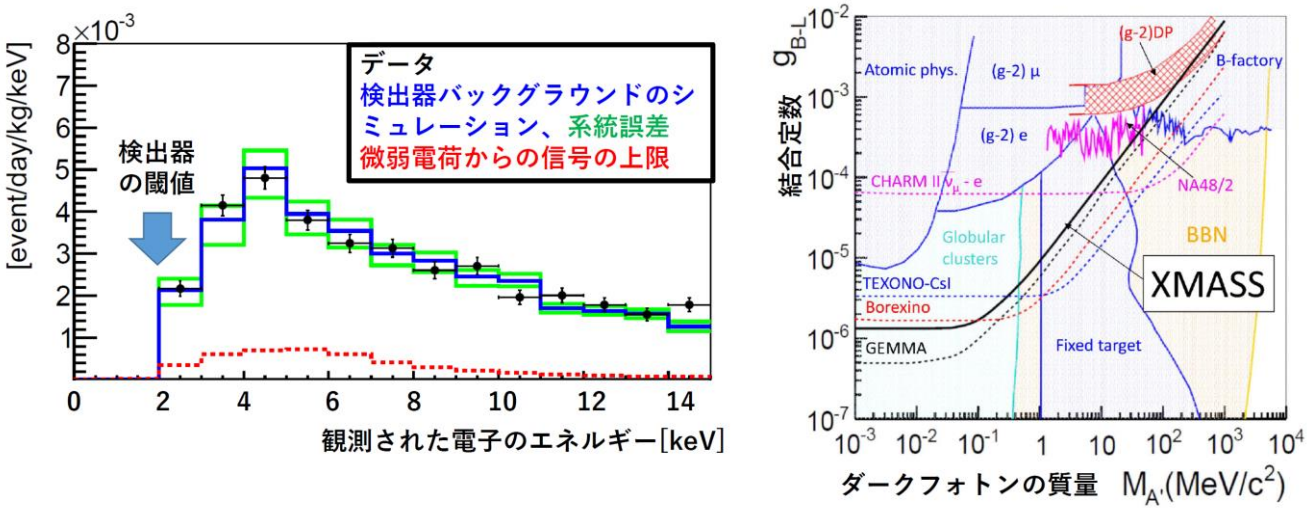

Figure 1 (Left) electron energy distribution for the data, background simulation from the detector material with systematic uncertainty and the upper limit of the expected signal from the neutrino millicharge. (Right) The upper limits and exclude regions for the dark photon mass and the coupling constant. Black solid line indicates XMASS result. Dot lines indicate the estimated result from the other neutrino experiments. The color regions indicate the exclusion regions from the accelerator experiments and astrophysical observations. Red hatched region is the allowed one that muon (g-2) anomaly can be explained by the existing of dark photon.

純物由来のバックグラウンドで説明がつくことが確認された。つまり、上に紹介したニュートリノのエキゾチックな相互作用による信号は有意に観測されず、残念ながらエキゾチックな相互作用の発見には至らなかった。しかしこのような相互作用の強度について、微弱電荷では、$5.4\times10^{-12}e$（素電荷）という強い上限を付けることにも成功した。同様に、磁気能率では、$1.8\times10^{-10}\mu_B$ (ボーア磁子)という制限を付けた。ダークフォトンについては、Figure 1 (右)にあるように、ダークフォトンの質量と結合定数について制限をつけることに成功した。特に、ミューオンの磁気能率の観測値が理論値からずれている(g-2)問題について、それをダークフォトンの存在で説明する可能性をほとんど排除することが出来た。本研究は、暗黒物質探索検出器の多目的検出器としてのポテンシャルを示し、新物理探索の新たなフロンティアを開いた結果となった。本研究の結果の後から、他暗黒物質探索実験から同様に暗黒物質探索以外の低エネルギー事象探索の結果が出ており[5 など]、本研究が鏑矢になった。

３．研究計画

エキゾチックなニュートリノ相互作用を日大独自でさらに高感度で観測する計画を進めている。大きいニュートリノフラックスを稼ぐために、大量のニュートリノが生成される原子炉の近傍に検出器を設置することにし、低閾値(<1keV)で低バックグラウンドであるシンプルな検出器の開発を進める。検出器の原理としては、高圧のガスを充填した比例計数管とし、講演者が開発したガス中放射能測定用比例計数管[6]からのノウハウを基に、開発を進める予定である。

４．参考文献

[1] K.Abe et al. (XMASS collaboration), Phys. Lett. B 809 (2020) 135741
[2] C. Hsieh et al., Phys. Rev. D 100 (2019) 073001.
[3] S. Bilmis et al.. Phys.Rev. D 92 (2015) 033009
[4] K.Abe et al. (XMASS collaboration), Nucl. Instr. and Meth. A716 (2013) 78-85
[5] E. Aprile et al. (XENON Collaboration) Phys. Rev. D 102, 072004
[6] 小川　洋　“暗黒物質探索実験用放射能計測装置の開発”令和 3 年度日本大学理工学部学術講演会