

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540307

研究課題名(和文)ダイヤモンドを用いた大強度ニュートリノ実験ミュオンプロファイルモニターの実用化

研究課題名(英文) Practical use of the muon profile monitor using diamond for the high-intensity neutrino experiment

研究代表者

山本 和弘 (Yamamoto, Kazuhiro)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：80303808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の大強度ニュートリノビームを用いたニュートリノ振動実験の実現のために、放射線耐性が高いとされるダイヤモンド検出器をミュオンプロファイルモニターとして実用化させるための研究を行った。厚さ0.5mmのCVD単結晶ダイヤモンド試料をメーカーから入手し、深紫外線および大強度ミュオンの照射に対する出力信号の安定性を調べた。深紫外線の照射では、3日間の連続照射に対しても安定性を示した。大強度ミュオンに対しては、照射量が 3×10^7 個/cm²/sを超えるあたりから、ダイヤモンド中の不純物準位への電子捕獲に起因すると考えられる出力信号の減少が見られた。実用化に向けては更なる品質の向上が必要である。

研究成果の概要(英文)：Towards realizing the next-generation neutrino oscillation experiment using a high-intensity neutrino beam, a study of a radiation-hard diamond detector was performed for practical use as a muon profile monitor. Several 0.5mm thick CVD single-crystalline diamond samples were obtained from the company, and the stability of the output signal against exposure of deep ultraviolet (DUV) rays and high intensity muons were studied. The stable output was seen after the 3-days continuous DUV exposure. As for the high intensity muons, the signal reduction was seen for the exposure rate above $3E+7$ particles/cm²/s, which is likely caused by the electron capture into the impurity level in the diamond. Further qualitative improvement of diamond is necessary for practical use under the extremely high-intensity radiation.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：放射線検出器 ダイヤモンド

1. 研究開始当初の背景

2011年、J-PARC とスーパーカミオカンデで行われている T2K 実験において、世界で初めて電子ニュートリノ出現現象による $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の兆候を捉えることに成功した。これにより、ニュートリノの第1世代と第3世代の間の混合角 θ_{13} は 0 でない可能性が非常に高まった。(θ_{13} はその後 T2K 実験を含むいくつかの実験で精密な測定がなされ、現在では約 9° であることが確定している。) このことが意味するところは非常に大きく、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動確率における CP 非保存の項は $\sin\theta_{13}$ に比例しているために、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動の違いを測定することによってニュートリノの CP 非対称性を観測できる可能性が大きくなった。現在の宇宙における物質・反物質の不均衡の原因を解くために、ニュートリノを含むレプトンセクターの CP 非対称性を探ることは、現代物理学における最重要課題の1つになっている。

T2K 実験では、良質なニュートリノビームを担保することが実験を成功させる上で極めて重要な要素であり、そのために J-PARC ニュートリノビームライン上にミュオンモニターを設置し、 $\pi \rightarrow \mu\nu$ 崩壊で生じたミュオンをリアルタイムで測定している。ミュオンモニターの一部にはシリコン PIN フォトダイオードが使われているが、今後加速器の強度を上げていき設計値に近づけていくと、放射線損傷により使えなくなることが予想されている。そこで、シリコン PIN フォトダイオードに替わる検出器として、放射線耐性の高いダイヤモンド検出器が候補に挙げられている。人工ダイヤモンドは、最近では化学気相合成(CVD)法による単結晶が市販されるようになり、これを用いたミュオンモニターの実現に期待が高まった。

2. 研究の目的

素粒子のレプトンセクターの CP 非対称性を探る次世代ニュートリノ振動実験を行うためには、ニュートリノビームを大強度化する必要がある、それに伴い、ビームを監視するミュオンモニターも大強度の放射線に曝されることになる。そういう状況下での使用が期待されている CVD 単結晶ダイヤモンドを用いた検出器の高放射線下での安定性を調べ、ミュオンプロファイルモニターとしての実用化へ近づけることを目的とする。

3. 研究の方法

CVD 単結晶ダイヤモンド試料をメーカーに依頼して作成した。当初購入を予定していたメーカーが倒産してしまったために、急きよ別のメーカーを探して購入することとなった。試料の大きさは $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ である。紫外線源(重水素ランプ)を用いて、出来上がったサンプルの信号を確認し、短期間の安定性を見た。ダイヤモンドのバンドギャップは 5.5eV で、ちょうど 225nm の深紫外線に対応

するため、この波長領域をカバーする重水素ランプ光を照射することで信号の応答が確認できる。

さらに、J-PARC ニュートリノビームラインのビームダンプ下流側に設置し、大強度ミュオンを照射することによって出力信号の長期間安定性を見た。データ収集システムは、T2K 実験のビームライン DAQ のフラッシュ ADC を使用した。2012 年から 2014 年にかけて、J-PARC メインリングの陽子ビーム強度は 150 kW から 230 kW に徐々に増強されていき、それに伴い、ダイヤモンド検出器に照射されるミュオン強度も 2.5×10^7 個/cm²/s から 4×10^7 個/cm²/s に増えた。長期間安定性ととも、強度依存性の確認も行った。

4. 研究成果

CVD 単結晶ダイヤモンドの両面にメタライズ処理を施したものにバイアス電圧を印加し、重水素ランプによって深紫外線を照射した。光チョッパーを用いてパルス光を照射して得られたオシロスコープの信号が図1である。3日間照射を継続して、信号の安定性を見たところ、重水素ランプ自体が立ち上がるまで多少時間がかかるものの、その後は波高の減少もなく、安定した波形が見られた。(図2)

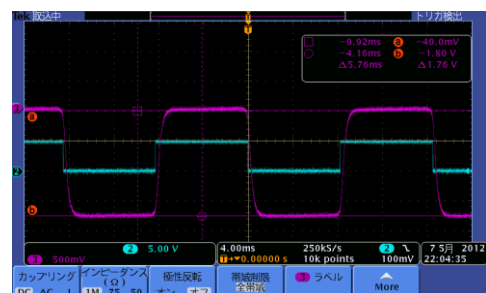


図1 ダイヤモンド検出器の紫外線照射に対する出力信号(紫)。水色は光チョッパーの同期信号。

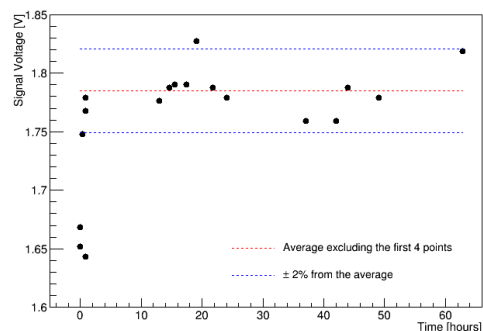


図2 紫外線連続照射に対する信号の安定性

PEEK 樹脂製のパッケージにマウントしたダイヤモンド検出器を J-PARC ニュートリノビームラインのビームダンプ下流側に設置し、信号を見た。メインリングの陽子ビームは 1 スピルに 8 バンチ (1 バンチは 581ns) が含まれる構造になっているが、図3に示したフラッシュ ADC で読み取られた波形にははっきりとその構造が見られる。 581ns の短い繰り返し

しにも関わらず、パイルアップもあまり見られず、非常に速い応答が得られた。ビーム量がスピル単位ではなくバンチ毎に測定できることを示している。

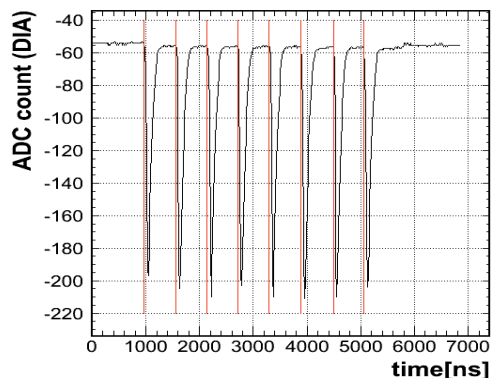


図 3 ダイヤモンド検出器をJ-PARCニュートリノビームラインにおいて大強度ミュオンを照射したときの波形

2012年10月から2014年6月までの長期間にわたり、大強度ミュオンを照射し続けた結果を図4に示す。ダイヤモンド検出器と同じ位置に設置してミュオンの流量を測定していたガスイオンチェンバーによる信号強度との比を縦軸に、照射期間を横軸に示した。この期間のJ-PARCメインリングの陽子ビーム強度は150 kW~230 kWで、 $2.5\sim 4 \times 10^7$ 個/cm²/sのミュオン照射量に対応する。ダイヤモンド検出器は、本研究期間以前に既に設置されていた2個(サンプルA1、サンプルA2)に加えて、2012年に2個(サンプルB1、サンプルB2)を追加設置し、2013年5月には新たに購入した2個(サンプルC1、サンプルC2)を設置した。A1~B2は4 mm × 4 mm × 0.5 mm、C1、C2は4.5 mm × 4.5 mm × 0.5 mmである。印加したバイアス電圧は200 Vで、B2については2013年5月から300 Vに上げている。

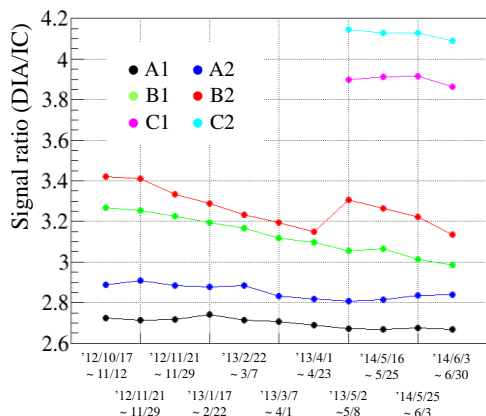


図4 大強度ミュオン照射に対するダイヤモンド検出器とイオンチェンバーの出力信号強度の比。横軸は照射期間を表す。

B1, B2とC1, C2の信号強度の差は、検出器の有効面積の違いで説明される。A1, A2とB2, B2では、有効面積が同じであるにも関わらず信号強度に差があるのは、製作ロットの違いによる個体差が考えられる。また、ダイヤモンド検出器の信号強度が全体に減少傾向にあるのが見られる。さらに減少幅には個体差があり、B1, B2は下がり方が顕著である。B2のバイアス電圧を2013年5月に200 Vから300 Vに上げてみたが、減少傾向は止まらなかった。その他のサンプルについても、2~3%程度で減少が見られた。ただし、本研究期間以前の準備研究において約 1×10^7 個/cm²/s程度のミュオン照射量でA1, A2の信号を見ていたときには信号の減少は見られなかった。この信号現象の原因に関しては、照射される荷電粒子が膨大になり、ダイヤモンド内で生成される電子・正孔対が非常に多くなると、ダイヤモンド内の窒素等の不純物が引き起こす準位に電荷が蓄積されていき、内部電場が弱くなってしまふことが考えられる。そこで同じメーカーで製作された同じタイプのダイヤモンドに対し、実験室で²⁴¹Amからの α 線(5.4 MeV)を照射して電荷収集効率を調べたところ、100%より大きく下回ってしまう結果になり、ダイヤモンド内で生成された電荷の一部が読み出し電極まで到達できずに捕獲されていることを裏付けることとなった。

現在メーカーから入手できるダイヤモンド検出器に対し、 3×10^7 個/cm²/s程度までの大強度ビームでは安定動作が得られるが、それを超える極めて大強度のビームに対しては課題の残る結果になった。今後、ダイヤモンド検出器を大強度ビーム下での実用化に向けて発展させるには、不純物が極めて少ない良質な単結晶ダイヤモンドの製作を考える必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計11件)

- ① “Measurement of the muon beam direction and muon flux for the T2K neutrino experiment”, K. Suzuki, T. Kobayashi, H. Kubo, K. Matsuoka, K. Nakaya, K. Yamamoto, M. Yokoyama *et al.* (著者35人中34番目), *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, **2015**, 053C01-1 – 053C01-31 (2015), 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptv054
- ② “Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with 6.6×10^{20} protons on target”, K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) (著者350人中333番目), *Physical Review D*, **91**, 072010-1 – 072010-50

- (2015), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.072010
- ③ “Measurement of the Inclusive Electron Neutrino Charged Current Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 321 人中 306 番目),
Physical Review Letters, **113**, 241803-1 – 241803-7 (2014), 査読有,
DOI:10.1103/PhysRevLett.113.241803
- ④ “Measurement of the inclusive ν_μ charged current cross section on iron and hydrocarbon in the T2K on-axis neutrino beam”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 409 人中 393 番目),
Physical Review D, **90**, 052010-1 – 052010-15 (2014), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.012013
- ⑤ “Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter θ_{23} from Muon Neutrino Disappearance in an Off-Axis Beam”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 340 人中 326 番目),
Physical Review Letters, **112**, 181801-1 – 181801-8 (2014), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.181801
- ⑥ “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 339 人中 326 番目),
Physical Review Letters, **112**, 061802-1 – 061802-8 (2014), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.061802
- ⑦ “Measurement of Neutrino Oscillation Parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-Axis Beam”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 343 人中 330 番目),
Physical Review Letters, **111**, 211803-1 – 211803-7 (2013), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.211803
- ⑧ “Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 358 人中 346 番目),
Physical Review D, **88**, 032002-1 – 032002-41 (2013), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.88.032002
- ⑨ “Measurement of the inclusive ν_μ charged current cross section on carbon in the near detector of the T2K experiment”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 356 人中 344 番目),
Physical Review D, **87**, 092003-1 – 092003-20 (2013), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.092003
- ⑩ “T2K neutrino flux prediction”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 351 人中 338 番目),
Physical Review D, **87**, 012001-1 – 012001-34 (2013), 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.012001
- ⑪ “Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector”,
K. Abe, T. Kobayashi, K. Nakaya, C.K. Jung, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration) (著者 432 人中 415 番目),
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **694**, 211-223 (2012), 査読有,
DOI:10.1016/j.nima.2012.03.023
- [学会発表] (計 4 件)
- ① 「ワイドバンドギャップ半導体を使用した半導体検出器の特性評価」,
田中真伸, 金子純一, 嶋岡毅紘, 新名章宏, 牧野高紘, 小野田忍, 大島武, 土田秀一, 星野紀博, 山本和弘, 市川温子, 身内賢太郎, 村上武, 斉藤正俊, 島崎昇一,
日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日～24 日, 早稲田大学 (東京都新宿区)
- ② “T2K Experiment”, Kazuhiro Yamamoto,
Electron-Nucleus Scattering XIII (招待講演),
2014 年 6 月 23 日～27 日, Marciana Marina (イタリア)
- ③ 「T2K 実験ミューオンモニターを用いたニュートリノビームの評価」,
平木貴宏, 石田卓, 市川温子, 木河達也, 久保一, 鈴木研人, 坂下健, 中平武, 中家剛, 丸山和純, 南野彰宏, 山本和弘, 横山将志 他 T2K コラボレーション,
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 20 日～23 日, 高知大学 (高知県高知市)
- ④ 「T2K 実験ミューオンモニターに用いるダイヤモンド検出器の性能評価」,
平木貴宏, 石田卓, 市川温子, 木河達也, 久保一, 鈴木研人, 坂下健, 中平武, 中家剛, 丸山和純, 南野彰宏, 村上明, 山本和弘,
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日～29 日, 広島大学 (広島県東広島市)
6. 研究組織
(1) 研究代表者
山本 和弘 (YAMAMOTO, Kazuhiro)
大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 80308308