

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14564

研究課題名（和文）ミュオン誘起ソフトエラー評価に向けた低速宇宙線ミュオン識別エネルギー測定系の開発

研究課題名（英文）Development of particle identification and energy measurement system for slow cosmic ray muons for the evaluation of muon-induced soft error rate

研究代表者

川瀬 頌一郎（Kawase, Shoichiro）

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：10817133

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙線ミュオンに起因する半導体デバイスでのソフトエラー率の高精度評価のためには、計算機が実際に設置される環境における低速宇宙線ミュオンの流束の実測データが必要である。本研究では、低エネルギー宇宙線ミュオンの流束測定において主なバックグラウンドとなる宇宙線電子由来のイベントを宇宙線ミュオン由来のイベントと弁別し、その発光量から宇宙線ミュオンの運動エネルギーを測定するチェレンコフ検出器の開発を行った。そして既存の低速宇宙線ミュオン流束測定装置と同期してデータ取得を行うデータ収集系の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したチェレンコフ検出器は、計算機の稼働する実環境での低速宇宙線ミュオンの流束の実測におけるバックグラウンド電子由来の不確かさの低減に寄与する。これにより、高度情報化社会に深刻な影響をもたらす宇宙線ミュオン起因の半導体デバイスでのソフトエラーの発生確率の高精度評価に貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：In order to accurately evaluate the soft-error rate in semiconductor devices caused by cosmic-ray muons, it is necessary to obtain measured data on the flux of low-energy cosmic-ray muons in the actual environment where the computer is installed. In this study, we have developed a Cherenkov detector. It discriminates cosmic-ray electron-derived events from cosmic-ray muon-derived events, which are the main background in the flux measurement of low-energy cosmic-ray muons and measures the kinetic energy of the cosmic-ray muon from the intensity of Cherenkov radiation. We also developed a data acquisition system synchronizing with an existing cosmic-ray muon flux measurement system.

研究分野：放射線計測

キーワード：宇宙線計測 チェレンコフ検出器 粒子識別 宇宙線ミュオン

1. 研究開始当初の背景

次世代半導体デバイスの信頼性を脅かす問題として、ソフトエラーと呼ばれる現象が知られている。ソフトエラーとは電子機器が放射線に曝された際に発生する一過性の誤動作のことであり、放射線により誘起される過渡電流によって半導体デバイスの保持するデータが書き換わる(ビット反転)ことによって発生する。地上には絶え間なく種々の宇宙線が降り注いでいるが、従来ではこれら宇宙線のうち中性子がソフトエラーの主因となると考えられ、宇宙線中性子起因のソフトエラー発生率の評価法が集中的に研究されてきた。中性子は半導体デバイス内の原子核と核反応を起こし、陽子やアルファ粒子等の荷電粒子を生成する。それら二次的に発生した荷電粒子は強い電離作用を持つため、ビット反転を引き起こすのに十分な過渡電流をデバイス内に発生させるのである。一方で宇宙線ミュオンは電離作用が弱いために、ソフトエラー発生率にはほとんど寄与しないと考えられてきた。

近年半導体デバイスの微細化・低消費電力化が進み、ビット反転の閾値となる臨界電荷量が減少し、半導体デバイスの放射線耐性が低下する傾向がある。そのため、従来は問題にならなかった電離作用の弱いミュオンに起因するソフトエラーの顕在化が予想されている。実際、SRAM デバイスに対する正ミュオン照射実験において、設計ルールの微細化に従ってミュオン誘起ソフトエラー率の増加傾向が見られている。これは中性子誘起ソフトエラー率が半導体デバイスの微細化につれて減少する傾向とは正反対の傾向である。また、申請者の所属する研究室が実施した負ミュオン照射実験において、負ミュオンが原子核に捕獲される原子核ミュオン捕獲反応によって、負ミュオン照射時には正ミュオン照射時よりソフトエラー率が最大 4 倍程度増大することが見出された。宇宙線ミュオンのうち原子核ミュオン捕獲反応に寄与するのは主に電子機器内で停止する低速、すなわち運動エネルギーで数十 MeV 以下のミュオンであるため、ミュオン誘起ソフトエラー発生率の評価には低速宇宙線ミュオン流束の実測データが不可欠である。しかしながら、電子機器や計算機が置かれている実環境における、ミュオン電荷の正負を識別した低速宇宙線ミュオン流束の実測データは皆無である。この点は宇宙線ミュオン起因ソフトエラー評価において大きな不確定要因となっており、低速宇宙線ミュオン流束の高精度測定が急務となっている。さらに、最近では量子コンピュータに用いられる超伝導素子のコヒーレンス時間の短縮に宇宙線ミュオンの電離作用が寄与することがわかっており、この点からも将来の高度情報化社会の実現に向け宇宙線ミュオン流束の高精度な実測データの重要性が増している。

2. 研究の目的

研究代表者の所属する研究グループで開発を行っているドリフトチェンバーを用いた宇宙線流束・運動量計測系では、宇宙線の飛跡の磁場中での変位を測定することで低速宇宙線の運動量を測定する。この測定において主要なバックグラウンド源は宇宙線ミュオンと共に飛来する宇宙線電子由来の事象の混入である。本研究では、比較的安価な材料を用いて低速宇宙線粒子を弁別しつつそのエネルギーを測定するシンプルなシステムを構築することにより、宇宙線電子由来のバックグラウンド低減、さらにはミュオンの運動エネルギー分解能の向上をはかり、低速宇宙線ミュオン流束の高精度測定を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

磁場中での軌道の変位によって宇宙線ミュオンの運動量を測定する系では、低速宇宙線ミュオンと等しい運動量を持つ宇宙線電子がバックグラウンドとなる。測定対象の低速宇宙線ミュオンと同じ運動量をもつ宇宙線電子では速度が大きく異なるため、適切な屈折率を持つ輻射体を用いたチェレンコフ検出器によって粒子弁別が可能である。さらに、宇宙線が物質中で発するチェレンコフ光量は、宇宙線の速度自体の他に、物質内での光速を超えた速度で飛行する長さにも依存する。低速宇宙線粒子は輻射体中でもエネルギー損失をして速度を落とすため、チェレンコフ光量を測定することで一定の分解能で宇宙線の運動エネルギーの測定を行うことができる。本研究では、チェレンコフ検出器を用いた低速宇宙線粒子弁別・エネルギー測定系を開発し、シンプルな測定系でも低速宇宙線粒子の粒子識別と同時に低速宇宙線ミュオンの運動エネルギーの決定が可能であることを実証する。そして、電子機器や計算機が置かれている実環境での低速宇宙線ミュオン流束測定においてバックグラウ



図 1 本研究で製作したチェレンコフ検出器

ンドとなる宇宙線電子の影響を排除することで、低速宇宙線ミュオン流束測定の高精度化を実現する。

4. 研究成果

低エネルギー宇宙線ミュオン・電子弁別のための、紫外線透過型アクリルを輻射体としたチェレンコフ検出器を製作した(図1)。鉛直下向きに飛来する宇宙線が輻射体で発生させるチェレンコフ光は鉛直下向きに多く放出される。そのチェレンコフ光の集光効率を高めるため、輻射体の下側に光電子増倍管を取り付ける設計とした。今回の検出器設計に合わせて行った Geant4 シミュレーションの結果、今回開発した検出器では 170 MeV/c 以下の運動量で電子とミュオンの識別およびエネルギーの推定が可能であることがわかった。しかし、光電子増倍管の光電面に到達するチェレンコフ光量には宇宙線入射位置・角度に対する依存性があるため、エネルギー分解能を高めるためには位置検出器で測定した宇宙線の入射位置・角度によりチェレンコフ光量の補正を行う必要がある。

当初研究計画ではドリフトチェンバーを用いた宇宙線エネルギー・流束測定系との同時計測を行う予定であったが、ドリフトチェンバーが使用できる状態ではなかった。そのため、放射線源や宇宙線を用いてチェレンコフ検出器単体で行うことのできるテストを進めた。まず、ガンマ線源を用いてコンプトン電子の発するチェレンコフ光を測定するテストを行った。宇宙線の発するものより光量の小さいチェレンコフ光が観測できたため、測定回路で十分なゲインが得られていることが確認できた。さらに、ガンマ線エネルギーが高いほどチェレンコフ光量が大きくなり、Geant4 を用いたシミュレーションと矛盾しない結果が得られた。さらに、プラスチックシンチレータを用いて鉛直0度方向から飛来する宇宙線の飛行時間(TOF)とチェレンコフ光量の相関測定を行った(図2)。TOFの長い、すなわち低速な宇宙線のイベントではチェレンコフ光量が小さく観測され、宇宙線ミュオンのエネルギー推定の可能性を示唆する結果が得られた。以上の結果を国内学会、研究会にて発表した。

検出器テストと並行し、ドリフトチェンバーと同期したデータ取得を行うデータ収集系を開発した。今後、ドリフトチェンバーを用いた宇宙線流束・エネルギー計測系との同時計測により、本研究期間中に実施できなかった宇宙線粒子弁別能およびエネルギー分解能の推定を行う予定である。



図2 宇宙線を用いた TOF・チェレンコフ光量相関測定のセットアップ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中谷聡江、亀井智子、川瀬頌一郎、佐藤朗、中上直人、渡辺幸信
2. 発表標題 宇宙線計測のための粒子弁別用チェレンコフ検出器の開発
3. 学会等名 日本原子力学会九州支部第41回研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoko Kamei, Shoichiro Kawase, Naoto Nakagami, Akira Sato, Satomi Nakatani, Yukinobu Watanabe
2. 発表標題 Development and preliminary experiments of a charge-discriminating low-energy cosmic-ray muon measurement system for the evaluation of muon-induced soft errors
3. 学会等名 研究会「放射線検出器とその応用」
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------