

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13564

研究課題名（和文）新型原子核乾板検出器を用いた宇宙線ミュオンの方角運動量スペクトルの測定

研究課題名（英文）Measurement of omni-directional momentum spectra of cosmic ray muons using a new type of nuclear emulsion films

研究代表者

北川 暢子（KITAGAWA, Nobuko）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任助教

研究者番号：20727911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電源不要、コンパクトな検出器である原子核乾板を用いることで、可搬性に富む幅広いエネルギー領域が測定可能な検出器の開発を行った。熱膨張率が小さいガラスを基板に使用した原子核乾板の性能を評価し、原子核乾板の読み取り装置の測定精度と同等の位置分解能を有することを実証した。また、このガラス乾板を使用したECC（原子核乾板と金属板を交互に積層した検出器）を用いて宇宙線の観測を行い、既存の運動量測定手法に改良を加えることで、約70GeV/cまでの運動量測定が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線ミュオンラジオグラフィーの技術は非破壊で構造物内部の密度分布が得られることから、考古学調査から地球惑星科学に用いられ、近年ではインフラ点検への応用にも期待されている。各分野で要求される分解能は様々であるが、世界遺産などの調査ではより精密な形状が分かることで考古学的理解も進み、インフラ点検のような数10cm～数m級の構造物内部の変状を検知することで被害が及ぶ前に対応が可能となり、人々の安全な生活にも繋がる。高い精度でイメージングを行うにはミュオンフラックスを理解することが重要であり、本研究で開発した手法や実証した内容により達成されると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a portable and wide energy range measurable detector by using nuclear emulsion plates, which are compact and do not require a power supply. We evaluated the performance of a nuclear emulsion plate using glass with a small thermal expansion coefficient as a substrate and demonstrated that it has a position resolution equivalent to the measurement accuracy of a readout system. We also observed cosmic rays using an ECC (a detector consisting of alternating layers of nuclear emulsion plates and metal plates) with this glass plate we developed, and then demonstrated that it is possible to measure momentum up to about 70 GeV/c by modifying the existing momentum measurement method.

研究分野：宇宙線観測

キーワード：宇宙線 ミュオン イメージング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙線ミュオンラジオグラフィとは、地球上大気で発生するミュオンの高い透過力を用いて、大型構造物内部の密度分布をイメージングする技術である(以下、宇宙線イメージングと呼ぶ)。この技術により、近年では、福島第一原子力発電所での燃料溶融や火山内部の密度分布の観測、エジプトのクフ王ピラミッド内部の未知の空間など、従来の技術では検知できなかった物質内部の情報を得ることが可能になった。その対象物の大きさは数mから 1km 程度と幅広く、対象によって観測条件(観測期間、観測場所での環境放射線量、観測場所の温度など)が異なり、各々の観測におけるノイズ成分の原因も様々である。そのような環境下で 10%以下で密度差を検知するには、宇宙線ミュオンの運動量スペクトルに付与される系統誤差を 10%未満に抑える必要がある。そのため、可搬性のある簡便な運動量測定可能な検出器の開発を行おうと考えた。

2. 研究の目的

宇宙線イメージングで用いられている電子検出器では荷電粒子の通過したタイミングと位置情報(位置分解能 0.5~1mm)で飛跡の再構成を行うため、電磁シャワーの飛跡や低運動量の陽子を特定する事は難しい。一方で、原子核乾板検出器は粒子識別(飛跡の濃さや電磁シャワー)と運動量測定(飛跡の角度変化量や磁場に因る曲率)が同一検出器で可能である。本研究では、バックグラウンド(電子や低運動量の陽子)とシグナル(ミュオン)の識別と運動量測定が可能な原子核乾板検出器の開発を行う。また、宇宙線イメージングの対象は、屋内、屋外、国内、国外問わず存在し、観測現場でのミュオンフラックスの値を知る事は、イメージングの精度を向上させるためには重要な要素の一つである。そのための可搬性に富む、幅広い運動量が測定可能な検出器を開発を行うことが本研究の目的の一つでもある。

3. 研究の方法

原子核乾板を用いた運動量測定が可能な検出器は、ECC(Emulsion Cloud Chamber)と CES(Compact Emulsion Spectrometer)の2種類がある。ECCは原子核乾板と金属板等の物質を交互に積層した検出器で、物質中での多重電磁散乱による飛跡の角度変化量により運動量を推定する。CESは、磁場中に原子核乾板を等間隔に並べた検出器を設置することで、クーロン力により進行方向を曲げられた量により運動量を推定する。前者は、積層する物質の種類や厚さを変えることで運動量の測定範囲が容易に変更可能であるが、高運動量の測定では総物質量の増加の割に測定誤差が軽減されないという欠点もある。後者は、一様磁場中において原子核乾板の間隔や枚数(最小単位は3枚)を調整する事により運動量の測定範囲を変更可能で、その測定精度は乾板の位置分解能に依存する。両方の検出器のタイプを作製し、研究目的を達成するために適切な手法を検討した。

また、実データが殆どない 1GeV 以下の領域の運動量測定のために、水中で深さ毎のミュオンの検出数からミュオンフラックスの算出する WEQ(Water Emulsion Chamber)の開発を行い、実際に 3m の水深を持つプールで観測を行った。

乾板の位置分解能を向上させるため、従来の基板はプラスチックを使用していたが、熱膨張率がプラスチックの 10~100 分の 1 程度のガラスを使用することを考え、製作方法の検討や、ガラス乾板の性能を評価した。さらに、使用する乳剤の粒子径を変えた乾板を試作し、感度評価を行った。

4. 研究成果

(1) CES の開発とテスト実験： 2017 年にガラス乾板(500 μ m のガラス板の両面に原子核乳剤を塗布)を使用した検出器を作製し、CERN(欧州原子核研究機構)で 1T の磁場中に設置し、2~10GeV のパイオンビームを照射したサンプルを解析した結果、位置精度とその読み取り精度とはほぼ同程度の $0.31 \pm 0.16 \mu\text{m}$ となり、読み取りシステムの限界まで乾板の位置精度を向上させたことを確認した。これにより、たった 3 枚のガラス乾板のデータから 10GeV までの運動量を 20~30% で測定可能なことを実証した[1]。KEK(高エネルギー加速器研究機構)にある標準磁場発生装置(約 1.5T)にプラスチックの基板を使用した乾板を用いて、宇宙線の観測を行った。しかし、上記のガラス乾板と比較してプラスチック乾板は熱膨張率が大きいため、例えば、観測時の温度と読み取り装置でデータをスキャンする際の温度が変化すると、飛跡の位置が変化してしまい、位置分解能の悪化が見られた。そのため、磁場によって曲げられる飛跡の位置は高運動量になればなるほど変化が少ないため、その位置分解能の悪化のため、測定出来る運動量測定で

きる運動量は数 GeV 程度であることが分かった。これにより、CES を用いた宇宙線の（数 GeV 以上の）運動量測定には、ガラス乾板を用いる必要があることが分かった。

（ 2 ） 3 m 水深プール内での宇宙線の観測：原子核乾板を 50cm 毎に水深 3m まで設置して約 1 か月の宇宙線の観測を行い、約 600MeV までミュオンフラックスを測定した。400~600MeV の領域では、これまでに測定された BESS 実験のデータや、PHITS というシミュレーションモデルとも誤差の範囲内で一致することを確認した。400MeV 以下の領域では、ミュオンだけでなく電子の混入の可能性が高いと推定される結果が得られた。これにより、1 m 未満の薄い構造物内部のイメージングを行う際には、データから電子の排除を試みる（電子とミュオンを識別する）又はシミュレーションに電子のフラックスを考慮する必要があると考えられる。しかし、その後、エジプトのクフ王ピラミッドの入り口付近で観測したデータからは、50cm 未満の石の構造物では、M. Guan のモデルと一致することが分かり、低運動量領域（数 100MeV 未満）の推定されるフラックスはモデルによって異なり、実データによる検証が重要であることが分かった。

（ 3 ）ガラス乾板を用いた ECC による解析手法の開発：熱膨張率が小さいガラスを基板とした乾板を作製し、1mm 厚のタングステンとガラス乾板を交互に 80 枚ずつ積層した ECC を用いて、宇宙線の観測を行った。ECC を用いた運動量測定では、1 本 1 本の飛跡が物質（金属板）を通過した際に生じる多重電磁散乱による角度の変化量を算出し、変化量に相当する運動量を推定するという手法である。この角度測定の精度は、読み取り装置による誤差だけでなく、乾板間のアライメント情報を取得する際にも生じる。その原因は、乾板に記録された低運動量の飛跡を含む全飛跡でアライメントを取るため、アライメントの精度が悪化してしまう。そこで、散乱量が小さい高運動量の飛跡の位置を基準として近傍の飛跡の運動量を測定する手法（相対散乱法）を、従来の 3 本で計算する方法から更に多数（100 本）の飛跡を用いた計算方法へと改良することで、約 70GeV/c まで運動量推定が可能であることを実証した[1]。

（ 4 ）従来とは異なる粒子径乳剤を用いた乾板の感度評価：従来の原子核乾板に用いられている乳剤の臭化銀結晶の粒子径は約 200nm であるが、約 300nm の乳剤を使用することで、従来品よりも感度が向上する傾向にあることが分かった。しかし、従来品に取って代わる標準の乾板として使用するためには、適切な乾板の現像条件を探索する必要がある。

[1]2022 年 3 月 眞部祐太 博士論文（名古屋大学）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Manabe Yuta, Morishima Kunihiro, Kitagawa Nobuko, Nishio Akira, Kuno Mitsuaki	4. 巻 1034
2. 論文標題 Development of glass-based nuclear emulsion plate as an ultra-high precision tracking detector in the era of fully automated readout systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 166741 ~ 166741
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2022.166741	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Nobuko Kitagawa, Kunihiro Morishima, Akira Nishio, Mitsuaki Kuno, Yuta Manabe
2. 発表標題 Observation of cosmic ray with emulsion chambers on the ground
3. 学会等名 ICMaSS2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuko Kitagawa, Kunihiro Morishima, Akira Nishio, Mitsuaki Kuno, Yuta Manabe
2. 発表標題 Measurement of cosmic rays with emulsion chambers in water
3. 学会等名 International Workshop on Cosmic-Ray Muography（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北川暢子, 森島邦博, 西尾晃, 久野光慧, 眞部祐太, 榊原亜美
2. 発表標題 エマルジョンチェンバーを用いた宇宙線の地上観測(4)
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 干潟 紘太郎, 森島 邦博, 北川 暢子, 西尾 晃, 久野 光慧, 眞部 祐太
2. 発表標題 原子核乾板を用いた宇宙線イメージング技術のための水中でのミュオンフラックス測定
3. 学会等名 2019日本写真学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 干潟紘太郎, 森島邦博, 西尾 晃, 久野光慧, 眞部祐太, 榊原亜美, 北川暢子
2. 発表標題 宇宙線イメージングのための原子核乾板を用いた低エネルギー領域のミュオンフラックス測定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 干潟紘太郎, 森島邦博, 西尾 晃, 久野光慧, 眞部祐太, 榊原亜美, 北川暢子
2. 発表標題 宇宙線イメージングのための低エネルギー領域のミュオンフラックス測定
3. 学会等名 画像関連学会連合会第6回秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kotaro Hikata, Kunihiro Morishima, Akira Nishio, Mitsuaki Kuno, Yuta Manabe, Ami Sakakibara, Nobuko Kitagawa
2. 発表標題 Study of Low Energy Muon Flux for Cosmic ray Imaging with Nuclear Emulsion
3. 学会等名 ICMaSS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Manabe, Kunihiro Morishima, Akira Nishio, Mitsuaki Kuno, Kotaro Higata, Ami Sakakibara, Nobuko Kitagawa
2. 発表標題 Development of High Position Accuracy Nuclear Emulsion
3. 学会等名 ICMaSS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuko Kitagawa, Kunihiro Morishima, Akira Nishio, Mitsuaki Kuno, Yuta Manabe, Kotaro Higata, Ami Sakakibara
2. 発表標題 Observation of the flux of cosmic ray muon on the ground with CES
3. 学会等名 ICMaSS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuko Kitagawa
2. 発表標題 Status of cosmic-ray muon radiography with nuclear emulsion
3. 学会等名 ISVHECRI2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北川 暢子
2. 発表標題 エマルションチェンバーを用いた宇宙線の地上観測 (3)
3. 学会等名 日本物理学会2019年年次大会
4. 発表年 2019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
---------	---------