

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：18K03666
研究課題名（和文）シリカエアロゲルによる高エネルギー宇宙線同位体比の精密測定：宇宙線伝播機構の解明

研究課題名（英文）Precise measurement of high-energy cosmic-ray isotopes by silica aerogel:
Elucidating cosmic-ray propagation mechanism

研究代表者
田端 誠（Tabata, Makoto）
千葉大学・大学院理学研究院・特任研究員

研究者番号：10573280
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地球極域長期周回気球に搭載し、大気圏外で一次宇宙線粒子を観測するためのチェレンコフ検出器を開発した。チェレンコフ検出器は、相対論的な速度の荷電粒子が輻射体を通過する際に生じるチェレンコフ光を光検出器で捉え、出力信号を解析することで粒子の速度を決定することができる。チェレンコフ検出器の性能は輻射体の屈折率や透明度などの光学機能に強く依存する。屈折率が適切に制御され、高い透明度の疎水性シリカエアロゲルの開発と量産に成功し、これまで測定が難しかった高エネルギー宇宙線の軽元素同位体比の測定が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
宇宙線の発見から100年以上が経つが、その銀河空間における伝播機構は未だ完全には解明されていない。様々な伝播機構理論モデルが提案されているが、観測データの不足によりモデルの正当性を評価できていない。各々の理論モデルが異なる予言を与えている、高エネルギー領域の宇宙線粒子の軽元素同位体存在比の精密測定が宇宙線伝播機構の解明の鍵となる。本研究で開発したエアロゲルによるチェレンコフ検出器を用いれば理論モデルに強い制限を与えることができる。

研究成果の概要（英文）：We have developed a Cherenkov detector for observing primary cosmic-ray particles outside the atmosphere by mounting it on a long-term orbiting balloon in the Earth's polar region. Cherenkov detectors detect the Cherenkov light generated when a charged particle with a relativistic velocity passes through a radiator by a photosensor. The velocity of the particle can be determined by analyzing the output signal. The performance of the Cherenkov detectors strongly depends on the optical properties, such as the refractive index and transparency of the radiator. We have succeeded in developing and mass-producing a highly transparent hydrophobic silica aerogel with a controlled refractive index. The aerogel enables the measurement of the light isotope ratio of high-energy cosmic rays, which has been difficult so far.

研究分野：素粒子実験

キーワード：シリカエアロゲル チェレンコフ輻射体 リンガイメーキングチェレンコフ検出器 屈折率 透過率
宇宙線 HELIX 放射線検出器

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙線の発見から 100 年以上が経つが、その銀河空間における伝播機構は未だ完全には解明されていない。銀河宇宙線の伝播機構を説明し得る様々な理論モデルが提案されているが、観測データの不足によりモデルの正当性を評価できていない。これら理論モデルは各々、宇宙線粒子の軽元素同位体存在比（特にベリリウム同位体 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ）のエネルギー依存性について異なる予言をする。特に、核子あたり 1~10 GeV/nuc の高エネルギー領域における軽元素同位体存在比の挙動はモデル依存性が大きく、高精度の測定データによる検証が宇宙線伝播機構の解明に向けて重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究は、米国航空宇宙局が運用する南極長期周回気球に搭載する一次宇宙線測定器を開発し、特にベリリウムの同位体存在比のエネルギー依存性を高い統計精度で精密測定することを通じ、宇宙線の伝播機構の理論モデルに強い制限を与えることを最終的な物理目的とする (HELIX 実験)。新しい測定器技術により、これまで実現が困難であった 1~10 GeV/nuc の高エネルギー領域における粒子識別を可能にし、高い統計精度の宇宙線観測データを取得する。宇宙線荷電粒子の速度測定装置であるリングイメージング型チェレンコフ (RICH) 検出器において、屈折率が 1.15~1.16 の疎水性シリカエアロゲルのタイル (大きき 10 cm × 10 cm × 1 cm) を 32 枚用いた輻射体システムの開発に重点的に取り組む。

3. 研究の方法

宇宙線測定器では、粒子の運動量を超電導電磁石とガスドリフトチェンバー飛跡検出器の組み合わせで測定する。速度は、0.2~1 GeV/nuc のエネルギー領域は ToF 検出器で、1~10 GeV/nuc のエネルギー範囲はエアロゲル RICH 検出器で測定する。宇宙線粒子の運動量と速度を精密測定することで、質量を 4σ 以上の高分解能で決定し、同位体核種を同定する。高エネルギー領域における高分解能測定のため、粒子の速度を 0.1% の精度で決定する、高性能 RICH 検出器を採用する。幅広いエネルギー領域に対応できる、屈折率 1.15 と 1.03 のシリカエアロゲルを輻射体として新規開発する。

1~4 GeV/nuc おける速度測定を屈折率 1.15-1.16 の、10 GeV/nuc までを 1.03 のエアロゲルで分担する。1.15 の下流側に 1.03 のエアロゲルを配置して二層構造とし、10 cm 角のエアロゲル 36 枚/層が必要である。エアロゲルの厚さを限定し (1.15 の場合 1 cm)、速度分解能を向上させる。厚さを限定すると発光量が減るが、透明度を向上させることで検出光子数を増加させる。

予備研究では 1.15 のエアロゲルについて、波長 400 nm において透過長 30 mm を達成しており、厚さに対して十分な透明度である。発光量はエアロゲルの密度に比例し、高屈折率 (密度) の採用は有利である。密度の一様性の要求は 1% レベルである。高屈折率を得るためにピンホール乾燥製法を用いるが、収縮過程の湿潤ゲルの重量をモニタし、個々の屈折率を揃えて 11 cm 角のエアロゲルを製作する。製造過程で疎水基を付加することで撥水性とし、ウォータージェット切断機で 10 cm 角にトリミングし、一様性の高い中央部を使用する。屈折率に依存するチェレンコフ角の位置依存性を予めスキャンしておき、0.1% 精度の屈折率マッピング情報を得て、物理解析に利用する。

1.03 では発光量が減る上、上流の 1.15 のエアロゲルからのチェレンコフ光は必ず下流の 1.03 を通過するため、高い透明度が要求される。予備研究では透過長 50 mm を得ている。1.03 はピンホール乾燥法を用いずに直接ゾル-ゲル法で製作する。湿潤ゲル合成の試薬配合比を最適化し、透過長 60~70mm まで向上させる。

飛翔実験は、2 段階の実施 (2 回の気球フライト) を計画している。第 1 段階では、RICH 検出器に 1.15 のエアロゲルを搭載し、1~4 GeV/nuc のエネルギー領域でデータを取得する。第 2 段階では、1.03 のエアロゲルを追加実装し、10 GeV/nuc まで拡張観測する。いずれも 0.2~1 GeV/nuc を ToF 検出器でカバーし、RICH 検出器と同時観測する。屈折率 1.15 の採用により、1 GeV/nuc 付近では、ToF と RICH の両検出器で測定が可能であり、相互に較正することで系統誤差を減じる。

4. 研究成果

宇宙線荷電粒子の速度測定に用いる RICH 検出器について、輻射体として採用する屈折率が 1.15-1.16 の疎水性シリカエアロゲルのタイル (大きき約 11 cm × 11 cm × 1 cm) の量産 (96 枚) を完了した (図 1 (左))。全数に対する初期光学的評価、すなわち目視検査 (ひび割れや部分白濁の有無等の確認)、レーザー最小偏角法による波長 405 nm における屈折率の測定、および

分光光度計による波長 200～800 nm における近紫外・可視光透過率の測定を実施した。屈折率は目標値である 1.15～1.16 の範囲に収まり、精確に制御できた。透明度の目標値を、厚み 10 mm に対する波長 400 nm における透過率が 70%以上、と掲げていたが、全てのタイルで達成した。ひび割れに関する歩留まりは約 80%であり、予想の 90%をやや下回ったが、実機に必要な枚数である 32 枚に対しては十分な数量の設計要求を満たす健全なタイルを得た。独自の製作手法であるピンホール乾燥法を用いる過程で、屈折率の制御が不完全となる未経験の問題に直面したが、温度管理を工夫することでこれを解決し、新たな知見を得た。



図1 (左) 実機用に量産したエアロゲルのサンプル (参考文献[1]より)。(右) 切断加工後、アルミフレームに接着したエアロゲル (参考文献[2]より)。

部分的にひび割れて実機に搭載できないタイルを利用して、ウォータージェット切断機による成型加工を試験した。設計試作したアルミフレームの形状に合わせて、大きさ 10 cm × 10 cm へのトリミングを計 4 回、各々複数枚に対して試みた。いずれも切断状態は良好で、サンプル数は少数ながら歩留まりは 100%であった。切断加工の歩留まりを 90%と予想していたので、製作中に生じたタイルのひび割れによる損失数と相殺できる期待をもった。トリミングしたタイルは試作アルミフレームに適合することを確認した。最終設計を完了したアルミフレームを量産し、全数を採寸検品した。アルミフレームと輻射体システムの構造体との噛み合わせ試験結果も良好であった。36 の区画に分けた輻射体システムは、当初 36 枚のエアロゲルを装着する予定であったが、内 4 枚を異なる物質に置き換えることで検出器の較正をより正確にできることを見出したため、エアロゲルの使用は 32 枚と決定した。

11 cm × 11 cm サイズのエアロゲルタイルを面取り付きの 10 cm × 10 cm サイズにウォータージェット切断機でトリミングする際、タイルへのダメージを許容できる範囲まで減じることにより成功し、計 57 枚のタイルをトリミング加工した。加工による透明度への影響はほとんどないことを確認した。次いでタイルをアルミフレームへ接着固定する方法を確立し、良好にトリミングできたタイル 50 枚をフレームに格納した (図 1 (右))。これらは実機に搭載する輻射体候補として、さらに詳細な特性評価に向けて、カナダの共同研究機関へ輸送した。タイル表面の接触測定による厚さの位置依存性スキャン、および電子ビーム照射による屈折率の位置依存性スキャンを完了し、検出器の地上較正データを得た。これらは気球フライトで得られる宇宙線観測データの物理解析に用いる予定である。フライト実験に向けて、チェレンコフ輻射体の製作は新規開発要素の多い重要項目であったが、実装の目途が立った。

気球飛行に必須のヘリウムの世界的な不足などが一因となり、南極周回気球を運用する米航空宇宙局との議論によりフライトは二度の延期となった。気球フライトによる物理データの取得は次のシーズンへと持ち越しとなったが、新型コロナウイルス蔓延による休止期間を除いて、搭載測定器の準備には技術的な問題はなく順調に進めている。

また、第二回目のフライトへの追加実装を予定している第二層目となる低屈折率 (1.03) エアロゲルの開発を進め、世界最高レベルの透明度を達成するとともに量産性と加工性を検証した。さらに、第二回目のフライトにおける第一層目の高屈折率 (1.15～1.16) エアロゲルのアップグレード案を検討した。気球フライトの機会を確実に得るため、バックアップ案として北欧で飛行機会を得るための検討を始めており、実験プログラムを確実に遂行する予定である。

参考文献

- [1] M. Tabata *et al.*, Developing a silica aerogel radiator for the HELIX ring-imaging Cherenkov system, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A 952 (2020) 161879.
- [2] P. Allison *et al.*, Production of silica aerogel radiator tiles for the HELIX RICH detector, in: Proceedings of 36th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2019), 358 (2019) 139.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 P.Allison, J.Beatty, L.Beaufore, Y.Chen, S.Coutu, E.Ellingwood, M.Gebhard, N.Green, D.Hanna, B.Kunkler, S.Mognet, R.Mbarek, K.McBride, K.Michaels, D.Muller, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, T.Rosin, E.Schreyer, G.Tarle, M.Tabata*, A.Tomasch, G.Visser, S.Wakely, T.Werner, I.Wisher, M.Yu	4. 巻 358
2. 論文標題 Production of Silica Aerogel Radiator Tiles for the HELIX RICH Detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0139	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 田端 誠	4. 巻 38
2. 論文標題 エアロゲルの開発と応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 高エネルギーニュース	6. 最初と最後の頁 124-134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 P.Allison, J.Beatty, L.Beaufore, Y.Chen, S.Coutu, E.Ellingwood, M.Gebhard, N.Green, D.Hanna, B.Kunkler, I.Mognet, R.Mbarek, K.McBride, K.Michaels, D.Muller, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park*, T.Rosin, E.Schreyer, G.Tarle, M.Tabata, A.Tomasch, G.Visser, S.Wakely, T.Werner, I.Wisher, M.Yu	4. 巻 358
2. 論文標題 Cosmic-ray Isotope Measurements with HELIX	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0121	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 P.Allison, J.Beatty, L.Beaufore, Y.Chen, S.Coutu, E.Ellingwood, M.Gebhard, N.Green, D.Hanna, B.Kunkler, I.Mognet, R.Mbarek, K.McBride, K.Michaels, D.Muller, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, T.Rosin, E.Schreyer, G.Tarle, M.Tabata, A.Tomasch, G.Visser, S.Wakely, T.Werner, I.Wisher*, M.Yu	4. 巻 358
2. 論文標題 The Design and Construction of the HELIX RICH Detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0152	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 P.Allison, J.Beatty, L.Beaufore, Y.Chen, S.Coutu, E.Ellingwood, M.Gebhard, N.Green, D.Hanna, B.Kunkler, I.Mognet, R.Mbarek, K.McBride, K.Michaels, D.Muller, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, T.Rosin*, E.Schreyer, G.Tarle, M.Tabata, A.Tomasch, G.Visser, S.Wakely, T.Werner, I.Wisher, M.Yu	4. 巻 358
2. 論文標題 Calibration of the Aerogel Tiles for the HELIX RICH	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0133	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 M. Tabata, P. Allison, J.J. Beatty, S. Coutu, M. Gebhard, N. Green, D. Hanna, B. Kunkler, M. Lang, K. McBride, S.I. Mognet, D. Muller, J. Musser, S. Nutter, N. Park, M. Schubnell, G. Tarle, A. Tomasch, G. Visser, S.P. Wakely, I. Wisher	4. 巻 952
2. 論文標題 Developing a silica aerogel radiator for the HELIX ring-imaging Cherenkov system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A	6. 最初と最後の頁 161879
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.02.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 田端 誠
2. 発表標題 南極気球による宇宙線軽元素同位体比精密測定実験HELIXに向けたリングイメージングチェレンコフ検出器のための超高屈折率シリカエアロゲル
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 M. Tabata, P. Allison, J.J. Beatty, S. Coutu, M. Gebhard, N. Green, D. Hanna, B. Kunkler, M. Lang, S.I. Mognet, D. Muller, J. Musser, S. Nutter, N. Park, M. Schubnell, G. Tarle, A. Tomasch, G. Visser, S.P. Wakely, I. Wisher
2. 発表標題 Silica aerogel radiator for the HELIX RICH system
3. 学会等名 10th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tabata, P. Allison, J.J. Beatty, L. Beaufore, Y. Chen, S. Coutu, E. Ellingwood, N. Green, D. Hanna, B. Kunkler, R. Mbarek, K. McBride, S.I. Mognet, D. Muller, J. Musser, S. Nutter, S. O'Brien, N. Park, T. Rosin, G. Tarle, A. Tomasch, G. Visser, S.P. Wakely, I. Wisher, M. Yu
2. 発表標題 Production of silica aerogel radiator tiles for the HELIX RICH
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Tabata
2. 発表標題 High-quality aerogel Cherenkov radiators recently developed in Japan
3. 学会等名 5th International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田端 誠
2. 発表標題 ハドロン粒子識別のためのシリカエアロゲルチェレンコフ輻射体の開発
3. 学会等名 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」キックオフシンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 M.A. Aegerter et al. (Eds), M. Tabata et al.	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer International Publishing	5. 総ページ数 1522
3. 書名 Springer Handbook of Aerogels (Chapter: Transparent Tiles of Silica Aerogels for High-Energy Physics)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://www.ppl.phys.chiba-u.jp/~makoto/index.html>

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			
カナダ	McGill University	Queen's University		
米国	University of Chicago	University of Wisconsin-Madison	Pennsylvania State University	他4機関