

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03584

研究課題名（和文）高精度エアロゲルチェレンコフイメージングによる銀河宇宙線伝播モデルの精密検証

研究課題名（英文）Precise verification of galactic cosmic-ray propagation models by high-precision aerogel Cherenkov imaging

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：極域長期周回気球に搭載し、大気圏外で一次宇宙線荷電粒子の核種を識別するチェレンコフ検出器のアップグレードに向けて、輻射体となる新しいシリカエアロゲルを開発した。宇宙線核種を精度良く識別するために、チェレンコフ検出器ではエアロゲルから輻射されるチェレンコフ光をより多く捉えることが必要である。エアロゲルにおける光の伝播は、その屈折率や光透過性などの物性に強く依存する。屈折率が1.03に精度よく制御され、これまでで最も透明な疎水性エアロゲルの製作に成功し、検出器への実装に向けた基礎研究を完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河系内における宇宙線の伝播機構は未だ完全には解明されておらず複数の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。高エネルギー領域においては宇宙線粒子の軽元素同位体存在比に対して各々の理論モデルが異なる予言を与え、その精密測定は伝播機構の解明への鍵となる。本研究で新たに開発した屈折率1.03のエアロゲルを実装したチェレンコフ検出器を用いて観測を進めることにより、理論モデルに強い制限を与えることができる。また、この屈折率のエアロゲルは汎用性が高く、様々なチェレンコフ検出器への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：A new silica aerogel as a radiator has been developed to upgrade a Cherenkov detector, which will be installed in a long-term balloon orbiting polar regions and identifies direct cosmic charged nuclides outside the atmosphere. Cherenkov detectors need to yield more Cherenkov light emitted from aerogels to identify cosmic-ray nuclides accurately. Light propagation in aerogels strongly depends on their physical properties, such as refractive index and optical transparency. The most transparent hydrophobic aerogel to date, with a precisely controlled refractive index of 1.03, has been successfully produced, and essential research for employing the aerogel in the detector has been completed.

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 リンギイメージ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

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (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、荷電宇宙線粒子の宇宙空間における伝播機構は未だ完全には理解されていない。銀河内における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ものの、観測データの不足によりモデルの正当性に対する評価が不十分である。宇宙線粒子の軽元素同位体存在比（特にベリリウムの同位体存在比  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ）のエネルギー依存性については、理論モデルは各々異なる予言をする。特に、宇宙線の核子あたりのエネルギーが 1~10 GeV/nuc の領域におけるベリリウム同位体存在比の挙動はモデル依存性が大きく、高精度な観測データを取得できればモデルの検証が大きく進展する。このような観測実験は宇宙線伝播機構の解明に向けて重要な研究課題であるとの学術コミュニティの認識がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、極域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科学的目標としている (High Energy Light Isotope eXperiment: HELIX 実験)。HELIX 測定器では、宇宙線粒子の運動量と速度を精密測定し、質量を高分解能 (目標  $4\sigma$  以上) で割り出すことで同位体核種を識別し同定する。高エネルギー領域における高分解能測定の要となるのが、粒子の速度  $\beta$  を高精度 (目標  $\Delta\beta/\beta < 0.1\%$ ) で決定する、高性能なリングイメージングチェレンコフ (RICH) 検出器の開発である。幅広いエネルギー領域に対応するため、屈折率が 1.15 および 1.03 の (シリカ) エアロゲルをチェレンコフ輻射体として新たに開発して実装する。この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とし、高い統計精度の宇宙線観測データの取得につなげる。製造が完了している 1.15 に追加して多層化するため、1.03 の高品質エアロゲルを新規に開発する。

### 3. 研究の方法

気球搭載の一次宇宙線測定器では、超電導電磁石とガスドリフトチェンバー飛跡検出器によるスペクトロメータを用いて粒子の運動量を測定する。粒子の速度は 0.2~1 GeV/nuc のエネルギー領域については飛行時間 (ToF) 検出器で、1~10 GeV/nuc の範囲についてはエアロゲルを輻射体とした RICH 検出器で測定する。これらの測定値から粒子の質量を高精度で決定、同位体核種を同定し、宇宙線同位体存在比を算出する。HELIX 実験は二段階の実施 (二回の気球フライト) を計画しているが、第一回では RICH 検出器に屈折率 1.15 のエアロゲルを搭載し、0.2~4 GeV/nuc のエネルギー領域を観測する。第二回では 1.03 のエアロゲルを追加実装し、10 GeV/nuc まで観測エネルギーを拡張する。いずれも 0.2~1 GeV/nuc は ToF 検出器が担当し、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ことができる。

RICH 検出器では 1.15 の下流に 1.03 の屈折率のエアロゲルを配置して二層構造とするが、1 枚の大きさを 10cm 角とすれば検出器の大きさを考慮して一層あたり 32 枚が必要となる。エアロゲルの厚さを限定する (例えば屈折率 1.15 の場合 1cm とする) ことで速度分解能の向上を見込める。これはチェレンコフ光の発生点の不定性を減じることができるからである。輻射体の厚さを減じると発光量も減少するが、透明度を向上させることができれば検出できる光子数が増加する。屈折率 1.03 のエアロゲルは媒体としての密度が小さいため発光量が少ない上、上流の屈折率 1.15 のエアロゲルで発生したチェレンコフ光は必ず下流の 1.03 を通過する。このため 1.03 のエアロゲルには高い透明度を要求する。

### 4. 研究成果

先行研究 (科研費・基盤研究(C)・18K03666・2018~2020 年度) で開発し、支持フレームに組み込んで接着した屈折率 1.15 のエアロゲル (第一回フライト用およびスペア品の 50 枚) については、製造直後に可視光による光学的な特性測定を実施している。同エアロゲルに対してカナダの共同研究機関で行っ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データを国内における可視光測定データと比較した結果、互いに調和的であった。また、製造から約 5 年が経過しても特筆すべき劣化は見られなかった。これは製造過程で施している疎水化処理が有効に作用し、保管環境における吸湿が十分抑制されていることを示している。評価結果は学術論文 (参考文献[1]) としてまとめただけでなく、検出器の地上較正データとして、気球フライトで得られる宇宙線観測データの物理解析

に用いるために整備した。尚、当初予定されていた米国航空宇宙局による南極周回気球によるフライトは、世界的なヘリウムガスの不足等の影響を受けて先送りとなったが、スウェーデン宇宙公社による北極域気球フライトの機会を2024年5月に得ている。

本研究では、新たに屈折率1.03のエアロゲルの開発を行った(図1(左))。前述のように1.03では1.15に比べて発光量が少ない上、上流の1.15のエアロゲルで発生した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。試作を繰り返しながら、湿潤ゲル合成における試薬の配合比、熟成条件(温度や期間)、疎水化処理の条件、湿潤ゲルを超臨界乾燥する過程の最適化を進めた。尚、1.03は1.15と異なり、ピンホール乾燥製法を用いずに直接ゾルゲル合成法で開発を進めた。試作ごとに目視検査(ひび割れや白濁の有無等の確認)ののち、レーザーを利用した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行った。

屈折率は目標値である1.03に対して、 $\pm 0.001$ の範囲に精確に制御できるようになった。また、ピンホール乾燥製法によるゲルの収縮を経っていないこともあり、単一タイルの屈折率の一様性を高く( $\pm 1\%$ 未満)保てることがわかった。タイルの中央部分ほど屈折率の一様性が高いことを期待できるので、1.15のエアロゲルと同様にウォータージェットカッターにより縁辺部を切除すれば、全体としてさらに一様性を高められると期待する。

透過長は平均的に65mmにまで向上させることに成功した。1990年代には40mmに達していなかったことを考慮すると大幅な改善であり(図1(右))、エアロゲルの他の屈折率領域を含めても最高記録である。現有設備で製造可能な最大の大きさである15cm角の大面積エアロゲルの製作においても高い透明度を維持できた。ウォータージェットカッターによる精密切断加工(加工精度1mm以下)にも成功し、十分な疎水性を有することも実証できた。厚みを20mmとした場合、ひび割れに関する歩留まり率は80%程度を記録しており、さらに向上の余地がある。また、さらに厚いタイルをひび割れなしで得るという期待もできる。

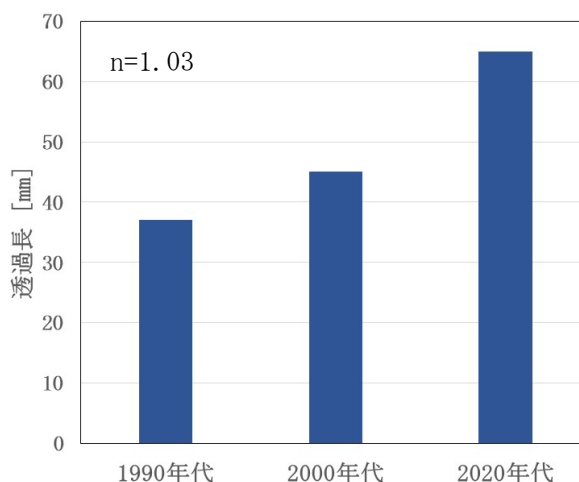


図1 (左) 屈折率1.03の試作エアロゲル。大きさ約11×11×1 cm。(右) 屈折率1.03のエアロゲルの波長400 nmにおける透過長の変遷。1990年代(当時の製法の再現による。参考文献[2])から2000年代(参考文献[3])を経て2020年代(本研究)まで。

本研究で開発したエアロゲルの屈折率である1.03はチェレンコフ輻射体として最も汎用性の高い値であり、この屈折率で過去最高の光学的透明度を得られたことの意義は大きい。合わせて、これよりも屈折率の小さい、または大きい領域(例えば1.02や1.04)では透明度が1.03に比べて現状は低い。これらの領域において透明度の向上を目指すことは、さらに興味深い研究課題であり、1.03の製造工程の最適化で用いた手法は、これら隣接する屈折率領域に対しても応用できると考えられる。実際、予備的な試作において有望な結果が得られており、HELIX実験の第二回フライトに向けて実装する二層目のエアロゲルの屈折率の選択肢が増えた。第一回フライトで得られる観測データの解析結果も加味し、次回フライトにおいて測定器の性能を最大化できる仕様にすべく準備を継続している。

#### 参考文献

- [1] P. Allison et al., Electron-beam calibration of aerogel tiles for the HELIX RICH detector, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A 1055 (2023) 168549.
- [2] M. Tabata et al., Hydrophobic silica aerogel production at KEK, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A 668 (2012) 64-70.
- [3] I. Adachi et al., Study of a silica aerogel for a Cherenkov radiator, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A 595 (2008) 180-182.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 S.Coutu, P.Allison, M.Baiocchi, J.Beatty, L.Beaufore, D.Calderon, A.Castano, Y.Chen, N.Green, D.Hanna, H.Jeon, S.Klein, B.Kunkler, M.Lang, R.Mbarek, K.McBride, S.Mognet, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, K.Powledge, K.Sakai, M.Tabata, G.Tarle, J.Tuttle, G.Visser, S.Wakely, M.Yu	4. 巻 19
2. 論文標題 The High Energy Light Isotope eXperiment program of direct cosmic-ray studies	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01025 ~ C01025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/19/01/C01025	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 該当する

1. 著者名 P.Allison, M.Baiocchi, J.Beatty, L.Beaufore, D.Calderon, Y.Chen, S.Coutu, E. Ellingwood, N.Green, D.Hanna, H.Jeon, R.Mbarek, K.McBride, S.Mognet, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, T.Rosin, M.Tabata, G.Tarle, G.Visser, S.Wakely, M.Yu	4. 巻 1055
2. 論文標題 Electron-beam calibration of aerogel tiles for the HELIX RICH detector	5. 発行年 2023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 168549 ~ 168549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2023.168549	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 該当する

1. 著者名 S.Wakely, P.Allison, M.Baiocchi, J.Beatty, L.Beaufore, D.Calderon, A.Castano, Y.Chen, S.Coutu, N.Green, D.Hanna, H.Jeon, S.Klein, B.Kunkler, M.Lang, R.Mbarek, K.McBride, S.Mognet, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, K.Powledge, K.Sakai, M.Tabata, G.Tarle, J.Tuttle, G.Visser, M.Yu	4. 巻 444
2. 論文標題 Cosmic-ray isotope measurements with HELIX	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.444.0118	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 H.Jeon, P.Allison, M.Baiocchi, J.Beatty, L.Beaufore, D.Calderon, A.Castano, Y.Chen, S.Coutu, N.Green, D.Hanna, S.Klein, B.Kunkler, M.Lang, R.Mbarek, K.McBride, S.Mognet, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, K.Powledge, K.Sakai, M.Tabata, G.Tarle, J.Tuttle, G.Visser, S.Wakely, M.Yu	4. 巻 444
2. 論文標題 The design and status of the HELIX ring imaging Cherenkov detector and hodoscope systems	5. 発行年 2023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) 10.22323/1.444.0121	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 K.McBride, P.Allison, M.Baiocchi, J.Beatty, L.Beaufore, D.Calderon, A.Castano, Y.Chen, S.Coutu, N.Green, D.Hanna, H.Jeon, S.Klein, B.Kunkler, M.Lang, R.Mbarek, S.Mognet, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, K.Powledge, K.Sakai, M.Tabata, G.Tarle, J.Tuttle, G.Visser, S.Wakely, M.Yu	4. 巻 444
2. 論文標題 The HELIX drift chamber tracker design and implementation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.444.0123	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 Makoto Tabata	4. 巻 2374
2. 論文標題 High-quality aerogel Cherenkov radiators recently developed in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2374/1/012114	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.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.P.Wakely, T.Werner, I.Wisher, M.Yu	4. 巻 395
2. 論文標題 Calibration of aerogel tiles for the HELIX-RICH detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.395.0090	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.J.Beatty, L.Beaufore, Y.Chen, S.Coutu, M.Gebhard, N.Green, D.Hanna, H.B. Jeon, B.Kunkler, M.Lang, R.Mbarek, K.McBride, I.Mognet, D.Muller, J.Musser, S.Nutter, S.O'Brien, N.Park, Z.Siegel, M.Tabata, G.Tarle, G.Visser, S.P.Wakely, M.Yu	4. 巻 395
2. 論文標題 Cosmic-ray isotope measurements with HELIX	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.395.0091	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

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Makoto 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 (TIPP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021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		
カナダ	Queen's University	McGill University	
米国	University of Chicago		