

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05471

研究課題名(和文) 大気蛍光望遠鏡による宇宙線観測のためのリアルタイム大気透明度測定法の開発

研究課題名(英文) Development of the measurement of atmospheric transparency for the cosmic ray observation using air fluorescence telescope

研究代表者

有働 慈治 (udo, shigeharu)

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号：50506714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線の大気蛍光観測におけるエネルギー決定精度の向上を目的として、新たな大気透明度測定装置の開発を行った。スペクトルが詳細に測定されている恒星(標準星)を追従し、その光度変化を測定することで、大気透明度の時間変動を測定する方法を検証した。コンピュータ制御可能な赤道儀式架台に搭載した反射望遠鏡に冷却 CCD カメラを取り付け、宇宙線大気蛍光観測を行っているアメリカ・ユタ州のテレスコープアレイ実験サイトで試験観測を行った。いくつかの恒星の追従撮影データを用い、天頂角と光度の依存性である大気吸収係数の算出を試み、大気透明度の時間変化を測定し得ることを確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線の発見以来、その起源は未だ解明されていない。超高エネルギー宇宙線は加速源からほぼ直進してくると考えられ、宇宙線起源を探る有力な手段と見なされている。本研究は、大気蛍光望遠鏡を用いた超高エネルギー宇宙線観測でのエネルギー決定精度向上を目的として、新たな大気透明度測定法の開発を行い、大気透明度に繋がる情報が得られることが確認できた。この測定法が確立されれば、大気透明度を連続的に測定し宇宙線エネルギー推定の不定性を減らすことができる。学術的意義は、宇宙線源を特定するための超高エネルギー宇宙線観測技術を進展させた点にある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new atmospheric monitoring system to improve Energy estimation of primary cosmic rays using the air fluorescence technique. The system will measure the time variation of atmospheric transparency by tracking the photometric standard stars and measuring fluctuations of the brightness of those stars. We performed the test observation at Utah, USA where the Telescope Array experiment has been observing the Ultra High Energy Cosmic Rays using air fluorescence telescope. The new system consists of the PC controllable equatorial mount and the reflecting telescope, the UV sensitive cooled CCD camera. We tried to obtain the atmospheric extinction coefficient using test data of some photometric standard stars and confirmed that the new system would be possible to measure a time variation of the atmospheric transparency.

研究分野：宇宙線観測

キーワード：大気透明度 大気蛍光

様式 C-19、F-19-1、Z-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙線観測の手法のひとつである大気蛍光法は、宇宙線空気シャワーの縦方向発達を観測するのに最も適した方法である。この特色を生かし、一次宇宙線のエネルギーと核種を明らかにすることができる。反面、この方法で一次宇宙線のエネルギーを推定するためには遠方で発生した大気蛍光量を適切に見積もる必要があり、大気中の光の減衰量(大気透明度)の測定が不可欠となっている。

米国ユタ州で超高エネルギー宇宙線を観測しているテレスコープアレイ実験(TA実験)においても、複数の大気モニターシステムを用いて大気透明度が測定されている。TA実験では主に、大気蛍光に近い紫外線レーザーによる測定が行われている。レーザーを使った測定の弱点としては、宇宙線観測中に行われるために間欠的であることと、レーザー出力の不定性がそのまま大気透明度の不定性につながる事が挙げられ、継続した測定と安定した光源が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、カタログ化された特定の恒星(標準星)を長時間にわたって追尾・撮像し、その明るさの変化から大気による光の減衰量(大気透明度)を測定する手法を確立することである。

大気透明度は大気蛍光法における一次宇宙線エネルギーの推定に大きな影響をおよぼす。観測中にも時々刻々と変化する大気透明度を継続して測定することで、一次宇宙線のエネルギー決定精度の向上が期待できる。測定装置として、赤道儀式架台を利用した恒星の自動導入・追尾機能の制御システムと、冷却 CCD カメラ等を用いた光度測定システムを開発する。また、レーザーを用いた動的な大気モニターによる間欠的な大気透明度測定との相補的な運用方法についても検討する。

3. 研究の方法

標準星光度を測定するための天体望遠鏡と冷却 CCD カメラを用いた観測装置と、光度データから大気透明度の変動を測定するための解析手法を開発する。

天体望遠鏡による恒星導入・追尾システムは、強度・精度の面から市販の赤道儀を利用し、自動制御プログラム等は用途に最適化したものを開発する(1)。冷却 CCD カメラには紫外領域の感度の高い機種を選定し、大気蛍光望遠鏡に使用されているものと同じ紫外透過フィルターを取り付ける(2)。国内および米国ユタ州の TA 実験観測所で恒星導入・追尾の自動制御試験を行い、取得したデータを用いて大気透明度情報の解析手法を確立する(3)。

(1) 恒星導入・追尾の自動制御システムの開発

市販の天体望遠鏡用の赤道儀式架台を用いた自動導入・追尾システムを開発する。近年市販されている赤道儀には、コンピュータを内蔵し、天体の自動導入・追尾が可能なものが多くある。これらを利用し、測定する恒星をリスト化し、自動導入するシステムを開発する。

一般に標準星の光度測定において、大気厚さの天頂角依存性を $\sec(z)$ で近似できるのは $z < 30^\circ$ とされているので、その範囲にある標準星を選択することが望ましい。また、ある恒星が $z < 30^\circ$ の条件を満たす時間は 2 時間程度しかないため、一晩のうちに観測対象とする標準星をいくつも切り替える必要がある。そこで、時間帯ごとに天頂付近を通過する標準星のリストを作製し、決まった時刻に決まった標準星を追うようなプログラムを構築する。さらに日没・日出と同期した測定開始・終了もプログラム化し、自律システムとしての試験観測を行う。

(2) 波長の違いの補正

宇宙線空気シャワーが大気中の窒素を励起することで発生する大気蛍光は、337 nm、357 nm 付近に大きなピークがあるため、TA 実験の大気蛍光望遠鏡では、340-360 nm にピークを持つ紫外線透過フィルター(Schott 社製 BG3 フィルター)を使用している。大気透明度測定には大気蛍光望遠鏡と同じ BG3 フィルターを使用することが望ましい。一方、代表的な標準星カタログはジョンソンの UBV システムによる分光 [1] に基づいており、紫外領域は U バンドと呼ばれる 364 nm での測光値となっている。標準星測光に用いられる市販のフィルターの U バンド透過率は、中心波長と半値幅が $364 \text{ nm} \pm 30 \text{ nm}$ であり、大気蛍光のスペクトルをカバーできない。そこで、二つのフィルターの違いを補正するため、双方の測定値を比較する。

(3) 試験観測とデータ解析手法の開発

国内では赤道儀・CCD カメラの動作確認のための試験観測を行い、米国・ユタ州のテレスコープアレイ実験サイトではデータ取得を目的として試験観測を行う。

取得したデータは、恒星の地平座標から天頂角 z を得て、光度情報を等級に変換したものとの相関によって大気吸収係数を求めることができる。

4. 研究成果

宇宙線の大気蛍光観測におけるエネルギー決定精度を向上するための、新たな大気透明度測定装

置の研究・開発を行った。

3(1) で述べた自動制御システムは、赤道儀に内蔵されたエンコーダーによって、任意の赤経・赤緯方向に望遠鏡を向けることは可能となっている。ただし、望遠鏡・カメラの視野中央に目標とする恒星を導入するには到っていない。これは赤道儀設置の精度やモーター・エンコーダーの誤差が原因であり、解決するためには、カメラの撮影データをフィードバックし、目標とする星を視野中央に導入するまで微調整するシステムが必要となる。

本研究で使用している冷却 CCD カメラでは、撮影を制御するためのプロトコルの入手が難しく、現状では赤道儀と連携するようなプログラムを開発できていない。今後、撮影制御プロトコルを自由に扱えるサブカメラを用いて、自動導入システムの完成を目指す。

3(2) で述べた波長補正については、BG3 フィルターと U バンドフィルターの透過率を、355nm の Nd:YAG レーザーを用いて測定した (図 1)。恒星は単色ではなく個々にスペクトルも異なるため、レーザーによる測定をそのまま適用することはできない。今後、一つの恒星をフィルターを代えながら撮影し測定値を比較する。

3(3) の試験観測は、新型コロナウイルスの流行のため、2020 年度・2021 年度には実施できなかった。

望遠鏡と赤道儀架台を 2019 年度にユタ州へ輸送したが、海外渡航が難しい状況が続いたため、試験観測が実施できないままであった。2022 年 8 月に現地に渡航することができ、少ない時間ではあるが、試験観測を行うことができた。いくつかの恒星について 2-3 時間の追尾撮影を行って撮影データを蓄積し、帰国後の解析によって天頂角と光度の依存性である大気吸収係数の算出を試みた。

図 2 に、2022 年 9 月 3 日に撮影したぎよしゃ座カペラの解析結果を示す。横軸は $\sec(z)$ (z は天頂角) で、縦軸は撮影データから算出した機械等級である。機械等級は望遠鏡・カメラの光学特性を含んだ相対値であり、実際の星の等級とは異なるが、同条件下での測定値を比較することはできる。データは線形に変化しておらず、観測中に天候等の何らかの変化があったものと考えられる。そのため、大気吸収係数を精度よく求めることはできなかったが、解析方法を確立することはできた。

試験観測による解析結果については、日本物理学会 2023 年春季大会において口頭発表を行った。

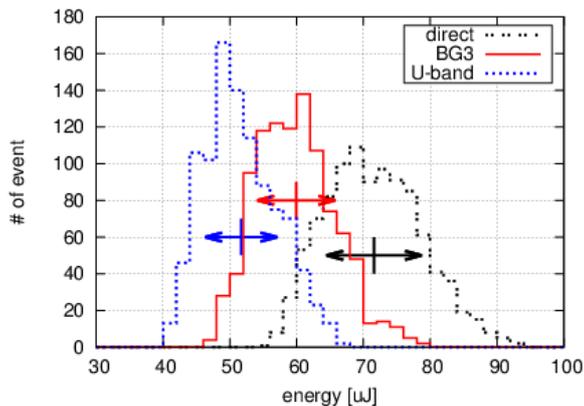


図 1: レーザーを用いたフィルター透過率の測定結果

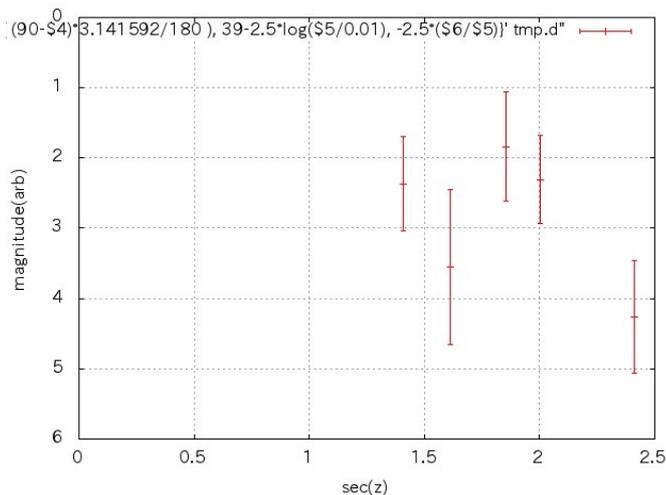


図 2: ぎよしゃ座カペラの天頂角 z に対する光度変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 有働慈治
2. 発表標題 TA 実験 399 大気蛍光観測のための リアルタイム大気透明度測定法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
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
---------	---------