

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740147

研究課題名（和文） 気球による夜間大気発光と雲による反射、散乱の測定

研究課題名（英文） Balloon-borne measurement of nightglow and its reflection and scattering by clouds

研究代表者

榑 直人 (SAKAKI NAOTO)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：90342790

研究成果の概要（和文）：JEM-EUSO 計画では 2015 年に望遠鏡を国際宇宙ステーションにとりつけ、最高エネルギー宇宙線が地球大気を通過した時に発する微弱な紫外線蛍光を観測する。このような宇宙線が雲上でも観測できるかを調べるために気球により雲上の夜間発光現象とその散乱反射光、背景光を観測することを目指した。本研究期間中には気球実験の飛翔機会が得られず、代わりに乗鞍岳山頂での 300-400nm 帯の夜光スペクトルを観測し高層大気光、人工光の割合を見積もった。

研究成果の概要（英文）：In the JEM-EUSO mission, faint fluorescence induced in the atmosphere by highest energy cosmic rays will be detected with a telescope attached to the International Space Station. In order to examine whether those cosmic rays can be detected even above clouds, balloon-borne experiment was planned to observe nightglow and its reflected and scattered light. Any chance of the balloon experiment was not available in the research period. Instead, nightglow spectrum in 300-400nm was observed at the top of Mt. Norikura. Portions of light from upper atmospheric layers and man-made light were estimated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	360,000	3,660,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線、大気発光、飛翔体、地球観測、超高層物理学

## 1. 研究開始当初の背景

山梨県明野町で行われた明野広域空気シャワー観測装置(AGASA)による観測で  $10^{20}\text{eV}$  を超える宇宙線の存在が明らかになった。

$10^{19.6}\text{eV}$  を超えるエネルギーを持つ陽子は宇宙背景放射の光子と衝突して  $\pi$  中間子を生成しエネルギーを失うため、 $10^{20}\text{eV}$  を超える宇宙線のソースが宇宙に様に存在してい

たとしても 100Mpcを超えるような遠方のソースからは到来できず、エネルギースペクトルに  $10^{19.6}\text{eV}$ 付近にカットオフができると予想されていた。

カットオフエネルギーを越えた宇宙線は銀河内磁場でも数度しか曲がらないので宇宙線の到来方向はソースの方向を指し示す。また、宇宙背景輻射との衝突による距離の制限からソースは近傍になければならないが、超高エネルギー宇宙線の到来方向には、そのソースとなりそうな既知の活動的な天体は見つかっていない。

現在の  $10^{20}\text{eV}$ 宇宙線の観測結果では世界中のデータをあわせても 20 例程度であり、モデルの判別するには不十分な数である。観測例数を増やすために、現在、国際共同実験の Auger Project がアルゼンチンで、日米共同実験の Telescope Array Project がアメリカで、建設中である。これらは AGASA の十倍から数十倍の有効面積を持つので、 $10^{20}\text{eV}$ 以上のエネルギースペクトルを決定し、ある程度その起源についても制限が付けられると期待される。

しかし、 $10^{20}\text{eV}$ 領域で個々の起源を同定し「超高エネルギー粒子天文学」を創成するためにはさらに大有効面積が必要である。それを実現するために有効面積を AGASA の数百倍に増やした EUSO (Extreme Universe Space Observatory) ミッションが進められてきた。EUSO では国際宇宙ステーションに 2.5m 超広角望遠鏡をとりつけ、大気中で宇宙線によって引き起こされるシャワーカスケード(空気シャワー)からの近紫外線により、シャワーのイメージを捕らえることにより超高エネルギー宇宙線を観測する。

EUSO はヨーロッパ宇宙機関(ESA)のミッションとして Phase-A 研究(概念設計)を終えたが、その後ヨーロッパでの予算獲得が難航した。2006 年に日米を中心とし、国際宇宙ステーションの日本の Japan Experiment Module 船外実験プラットフォームに望遠鏡を設置する JEM-EUSO として再組織され、10 年以内の打ち上げを目指している。

## 2. 研究の目的

超高エネルギー宇宙線を多数観測するためには有効面積をできる限り広げ、またエネルギー閾値を下げる必要がある。そのためには、空気シャワーからの光量に対してバックグラウンド光が十分少ないことが必要である。イタリアの EUSO グループが気球から地表方向を観測した結果、晴天新月期のバックグラウンド光は問題ない量であることが分かっている (BaBy 実験)。しかし、高度 100-200km 近辺の夜間大気光については、時と場所によって大きく変動することが知られており、様々な場所において継続的に観測

することが重要となる。可視光での観測データは存在するが、地上観測では大気による吸収の影響を受け始めるために JEM-EUSO で必要とする波長 300-400nm での観測は十分にされていない。

近紫外線領域で夜光を分光観測することは JEM-EUSO 実験のバックグラウンド観測として役立つのみならず、高層大気成分とその化学反応についての新たな情報も得られるであろう。さらにエルブスやスプライトと呼ばれる、50-100km 高度で起こる瞬間的な発光現象が観測されている。これらは雷との関連があると考えられているがまだそのメカニズムの解明には至っていない。このような発光現象が観測されれば、メカニズムの解明のための新たな手がかりとなる可能性がある。

また、雲は反射率が高く、反射、散乱などにより夜光量が増加する可能性がある。その強度によっては雲がある場合でも JEM-EUSO によって空気シャワー観測ができる可能性があり、超高エネルギー宇宙線の検出有効面積をさらに増やすことができる。

本研究では気球を用いて、超高エネルギー宇宙線観測で用いられる 300nm-400nm 領域の波長で、上方、下方からの夜間大気発光を同時に分光観測する。雲の種類による定常夜光の変化に加え、地上都市光の散乱、透過、遠方での雷光、高層大気発光の影響などを観測し、JEM-EUSO 型観測方法への影響を調査する。

## 3. 研究の方法

300-400nm 領域フィルター (BG3) をつけた 16ch マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) 1 本に、後述の赤外線サーモグラフィと同程度の視野 (30 度) を持つ光学系をとりつけ、16 素子の画像検出器として上向きと下向きにとりつける。MAPMT は JEM-EUSO 用に開発したものを使用し、光子計数法で測定する。この検出器により、視野の一部しか占めない雲との対応や視野内での局所的な発光の大雑把な位置を同定することができる。

また、同様の検出器を横にも取り付け、横方向の夜光と、陸地近傍を飛行する時間帯には周辺都市からの紫外線領域での光量を観測する。日本では蛍光灯の使用が多いため、ヨーロッパなどに比べ、都市光の影響は大きいと予想される。観測装置を積んだゴンドラをゆっくり回転させ、全方向をみることで、気球航路によらず仙台や盛岡などの都市光を俯角 5-15 度くらいで観測できる。観測装置の方向の決定には磁場センサーと CCD カメラによる星像を併用する。

2005 年度の観測では月の出していない時で波長帯により  $100\text{-}1000$  光子/( $\text{m}^2$  ns sr)であったので、上記検出器では  $10^3\text{-}10^4$  /ms/pixel

程度の計数率になると予想される。雲の影響や強い発光現象があった場合でもカウンターがあふれないように、搭載した組み込みコンピュータ(CPU)によりゲート幅を動的に変化させる。もし瞬間的な発光が起こった場合にはMAPMTからの信号で分光計にトリガーをかけデータをとることで、位置情報、スペクトル情報を得ることができる。各測定値は観測装置内のフラッシュメモリに記録し、そのうちの一部をテレメーターで送信しモニター兼バックアップデータとする。

雲の情報については赤外線サーモグラフィにより観測する。適度に厚い雲では雲頂温度はその高度の周辺空気の温度を反映し地上に比べ低い温度になり、その温度に対応する赤外線を放射する。赤外線サーモグラフィにより雲の形、雲頂温度を測定し鉛直温度分布から雲の高度を推定する。赤外線サーモグラフィの画像はカメラ内蔵のコンパクトフラッシュメモリに定期的に記録するとともに、ビデオ信号を星像記録用 CCD カメラの信号とビデオ画面分割器により合わせてテレメーターで送信する。鉛直温度分布は気象庁がゾンデを用いて毎日 9 時、21 時に取得している高層気象データを利用して高度に換算する。また、赤外線サーモグラフィのデータに加え、日本付近を観測する衛星データ(ひまわり 6 号、アメリカの Aqua 衛星と Terra 衛星の MODIS センサー)が得られれば雲情報について比較検討する。

日本付近で雷の発生しやすい夏季の、新月期付近で雲のある日を選び、JAXA 三陸大気球観測所において気球の飛翔、観測を行い、雲と夜光の関連データを取得する。

#### 4. 研究成果

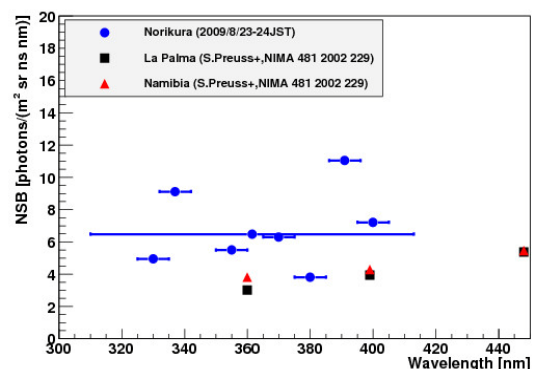
本研究期間中に気球実験を行う機会が得られなかったため、代わりに東京大学宇宙線研究所乗鞍観測所(標高 2770m)において夜光観測を行った。

宇宙線空気シャワーによる蛍光波長領域にある中心波長 330、337、355、370、380、390、400nm(透過幅 10nm)の狭域フィルターと 300-430nm を透過する BG3 フィルターの 8 種類を用いて夜光の分光強度を測定した。観測装置は赤道儀にのせて観測方向を決め、小型 CCD カメラで観測方向の星野を撮影して観測方向を明確にした。平成 21 年度、平成 22 年度にそれぞれ新月期の 10 晩程度観測をこころみたが、両年ともに天候に恵まれず、きちんとした観測が出来たのは 3 晩のみであった。観測ができた 3 晩いずれも雲海が出るような天候とはならなかったため、単純に上空(天頂角 0 度、15 度、30 度、一部 60 度、90 度)からの夜光量を測定した。

BG3 の透過波長での夜光量は日ごとに約 600-700photons/ns・sr・m<sup>2</sup>の間でほぼ一定で

あり天文薄明の前から光量が上昇した。2008 年度が 600photons/ns・sr・m<sup>2</sup>程度であったのに対し、2009 年度は 650-700photons/ns・sr・m<sup>2</sup>とやや増加した。波長別に見ると 390nm、400nm で光量が増加しておりそれより短波長側ではほとんど変化が見られなかった。観測中に目視や CCD 画像中にみられた薄い雲の様子から都市光の雲による反射であると推測される。狭域フィルターを用いて測定した夜光量は 4-12/ns・sr・m<sup>2</sup>・nm で、ほとんどの場合は BG3 での夜光量に比例して変動していた。波長別強度をみると宇宙線空気シャワーの観測に用いられる電子による空気中での蛍光のライン(337、391nm)が他の波長に比べやや強い結果であった。従ってフィルターなどで観測波長帯を限っても夜光の減少には効果が出にくい。地上で宇宙線を観測しているサイト La Palma、Namibia の夜光量と比較し 1.5 倍から 2 倍程度多かった。文献を用いて期待される星野光と黄道光を計算したところ観測した日時、方向の光量は 200-300 photons/ns・sr・m<sup>2</sup>であった。星野光と黄道光の和の変動量の計算値と観測光量の変動量が同程度であることから、観測光量の 7 割程度が高層大気光と人工光で数時間のスケールでは時間的空間的にほぼ一定であると考えられる。

夜光スペクトルは可視領域では天体観測のために良く調べられているが、近紫外線領域ではあまり調べられておらず本観測結果は貴重なデータであると言える。JEM-EUSO の観測は地球の様々な場所で行われることから、様々な場所、様々な気象条件下(雲上など)での夜光観測へと発展させる必要がある。また、約 100km 高度で起こる高層大気光は直接観測され人工光は大気中で減衰した成分を観測することになるので成分を分離することでさらに詳細に宇宙線観測への影響が見積もられる。



図：夜光スペクトル

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に)

は下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① N. Sakaki, Y. Watanabe, M. Nagano, and K. Kobayakawa, Fluorescence in air excited by electrons from a  $^{90}\text{Sr}$  source, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 査読有, **597**, 2008, pp. 88-93.
- ② N. Sakaki for the JEM-EUSO collaboration (156 人中①番目), The JEM-EUSO mission -Instrument-, Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Cosmic Ray Symposium (Kosice) Ed. P. Kiraly, K. Kudela, M. Stehlik, A.W. Wolfendale, 査読無, 2009, pp. 493-498.
- ③ N. Sakaki et al. (19 人中①番目), Balloon-borne measurement of UV nightglow and clouds for the JEM-EUSO mission, Proceedings of 30<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference (Merida), 査読無, **5**, 2008, pp. 965-968.
- ④ N. Sakaki et al. (19 人中①番目), Balloon-borne Measurement of UV Nightglow for the JEM-EUSO Experiment, Proceedings of International workshop on "Cosmic-Rays and High Energy Universe" (Tokyo) Ed. T. Shibata and N. Sakaki UAP Tokyo, 査読無, 2007 pp. 195-198.

[学会発表] (計 5 件)

- ① Naoto Sakaki, Aya Zindo, Motohiko Nagano, Keizo Kobayakawa, Fluorescence yield in moist air by electron and its application to space-based experiments, 31<sup>st</sup> International Cosmic Ray Conference, 2009 年 7 月 13 日, Lodz, Poland.
- ② 榭直人, 柴田徹, 和田智之, 小川貴代, 滝澤慶之, 川崎賀也, 篠崎健児, 戎崎俊一, 山本常夏, 梶野文義, 井上直也, 東出一洋, JEM-EUSO ミッションに向けた気球実験, 第 9 回宇宙科学シンポジウム, 2009 年 1 月 7 日, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部
- ③ N. Sakaki for the JEM-EUSO collaboration, The JEM-EUSO mission -Instrument-, 21<sup>st</sup> European Cosmic Ray Symposium, 2008 年 9 月 10 日, Kosice, Slovakia.
- ④ 榭直人, 柴田徹, 角田知史, 上岡隆, 早坂圭治, 上村将宏, 吉田朱里, 滝澤慶之, 川崎賀也, 戎崎俊一, 梶野文義, 沢辺俊之, 井上覚太, 永野元彦, 高橋幸弘, 佐藤光輝, JEM-EUSO に向けた気球実験, 大気球シン

ポジウム, 2007 年 12 月 14 日, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

- ⑤ N. Sakaki for the JEM-EUSO collaboration, Balloon-borne measurement of UV nightglow and clouds for the JEM-EUSO mission, 30<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, 2007 年 7 月 6 日, Merida, Mexico.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榭 直人 (SAKAKI NAOTO)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号: 90342790