

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2011～2015

課題番号：23403002

研究課題名(和文) 銀河系内宇宙線起源の解明

研究課題名(英文) Study on galactic origins of high energy cosmic rays

研究代表者

垣本 史雄 (KAKIMOTO, Fumio)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00092544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：現在、観測される 10^{16} eVまでの一次宇宙線は銀河系内起源であり、 10^{19} eV以上の超高エネルギーのものは、銀河系外起源と考えられている。本研究では、特に一次宇宙線のエネルギースペクトルと質量組成を測定し、この系内から系外に切り替わるエネルギー領域を確定し、宇宙線起源天体、加速機構、伝播機構を解明すること目的としている。エネルギースペクトルの測定結果の全体は、一次宇宙線のエネルギーEのべき関数で表せるが、 $10^{15.6}$ eVにおいて、べき値の変化が観測された。また、最終結論ではないもののエネルギーが $10^{15.6}$ eVより高くなるにつれて鉄などの重核から軽核成分に変化していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We observe the energy spectrum and the mass composition of primary cosmic rays and then establish the energy region where the origins of primary cosmic rays change from galactic to extra galactic ones. Observed energy spectrum are well fitted with a power law function of primary energies with a change of the power index at $10^{15.6}$ eV. Moreover, preliminary results for the mass composition show that major component of primary cosmic rays is gradually lighter as primary energies from iron at 10^{16} eV.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 空気シャワー 宇宙線起源 質量組成 縦方向発達 空気チェレンコフ光

1. 研究開始当初の背景

現在までの理論的考察によれば 10^{15}eV 代までは、超新星残骸におけるショック加速により銀河系内宇宙線が生成されているとする説が有力である。しかし、原理的に 10^{15}eV を超える宇宙線の加速モデルは存在しない。一方、 10^{20}eV 付近の超高エネルギー宇宙線を銀河系内で加速することは不可能であり、 10^{16} から 10^{19}eV の間で銀河系起源から銀河系外起源への転換が起こっている。この転換エネルギー領域を確定することは、銀河系内宇宙線加速理論の構築に最も厳しい条件を課すことになり、新たなブレークスルーを誘導するきっかけとなる。一方、このエネルギー領域を境として、銀河系外宇宙線起源が明確となれば、銀河系外起源超高エネルギー宇宙線と宇宙背景放射との相互作用（電子対生成やパイオン生成）によりエネルギースペクトル上にあらわれる変形を確認することにより、高い精度での一次宇宙線エネルギーの決定方法が確立できることになる。

このように重要な転換エネルギー領域の確認には一次宇宙線質量組成のエネルギー変化を測定することが最も有効な手段である。すなわち、銀河系内宇宙線は、エネルギーが高くなるにつれて加速効率が良い鉄核などの重核が主成分となる一方、銀河系外宇宙線は、加速領域の高強度放射場や銀河間物質との相互作用の結果、太陽系で観測されるまでに陽子などの軽核になることが予想されている。したがって、転換エネルギー領域では、質量組成に急激な変化が起こるはずである。

図1には、本研究者のグループによる結果を含めた一次宇宙線質量組成の観測結果を示す。 10^{16}eV までは一様に軽元素から重元素に変化しており、超新星残骸起源理論と定性的には矛盾しない。しかし、この変化傾向は

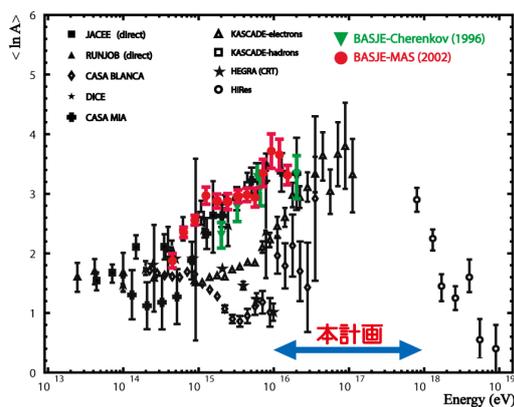


図1 宇宙線の質量組成平均値 $\langle \ln A \rangle$

10^{16}eV 以上まで伸びているようであり、現在の超新星起源論では明らかに説明できない。一方、これ以上のエネルギーでは、観測例も少ないことから、いまだ議論できる状況にはなく、早急に改善することが急務である。

2. 研究の目的

宇宙線（粒子線）が宇宙における最も激しい現象と関連していることは疑いようもないが、 10^{13}eV を超す高エネルギー宇宙線の起源はいまだに解明されていない。そこで、本研究では、 10^{16}eV 以上の宇宙線のエネルギースペクトルおよび質量組成を南米ボリビア・チャカルタヤ山宇宙物理学研究所で測定し、特に、質量組成における急激な変化（銀河系内起源の鉄から銀河系外起源の陽子への変化が期待されている）を観測することにより、銀河系内起源宇宙線のエネルギー上限を確定する。本結果は、銀河系内宇宙線の加速モデルを限定する上で極めて重要な情報であり、現在停滞気味の宇宙線起源理論に対する大いなるインパクトを与え、銀河系内における加速源や加速機構の解明が一挙に進むことが期待できる。また、いまだ予想でしかない銀河系外起源宇宙線の存在が確定でき、超高エネルギー宇宙線研究の進展に大きく寄与する。

3. 研究の方法

本研究で対象としている高エネルギー宇宙線を観測するには、この宇宙線が大気中で形成する空気シャワーを測定することが唯一の方法である。この空気シャワーは、一次宇宙線と大気原子核との相互作用による多重粒子発生、およびそれに続く発生粒子の大気中での吸収によって図2に示すような振る舞いをする。この変化の様子を空気シャワーの縦方向発達という。図からわか

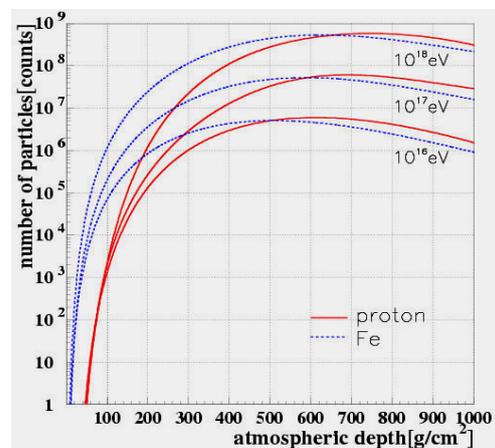


図2 空気シャワー縦方向発達、赤:陽子 青:鉄

るように、この発達の様相は一次宇宙線のエネルギーや核種の違いにより大きく異なる。特に同一エネルギーの宇宙線の場合、その核種の違いは、特に大気上空における発達の違いに顕著にあらわれる。したがって、宇宙線質量組成を測定するには空気シャワーの縦方向発達、特にできるだけ大気上空での発達の様相を測定することが極めて重要なキーポイントであり、できるだけ高い高度での観測が肝要である。そこで、本研究では、この種の観測所としては世界最高高度（5200m、大気深さ 550g/cm^2 ）に位置するチャカルタヤ山宇宙物理学研究

所を観測場所に選定した。さらに、測定パラメータとしては、大気上空における縦方向発達の情報を強く反映し、かつ含まれる

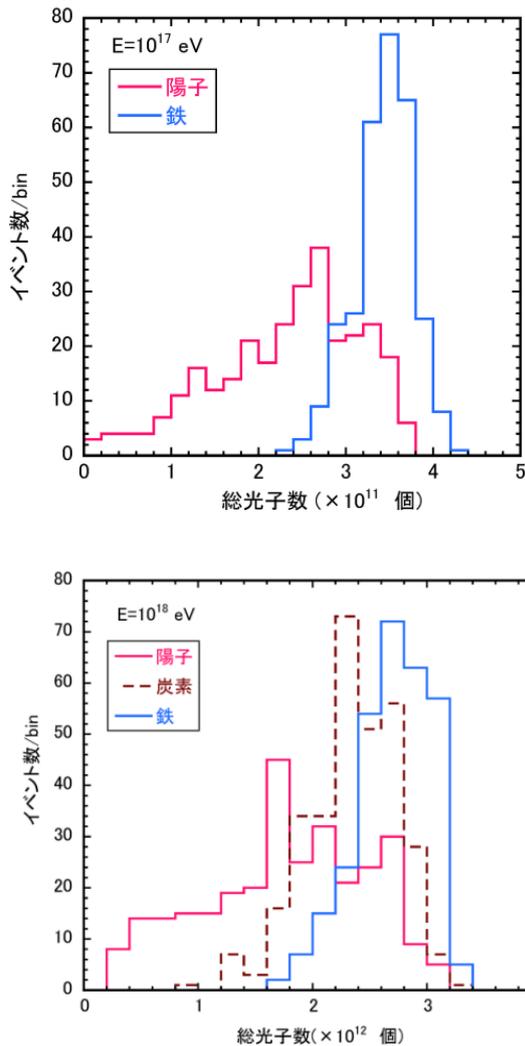


図 3 空気チェレンコフ光総光子数分布一次宇宙線エネルギー(E)は上図: 10^{17} eV 下図: 10^{18} eV

光子数が多く高統計測定が可能な空気チェレンコフ光を測定することとした。

なお、本研究では、 10^{18} eV 領域までの観測を行い、これ以上のエネルギー領域に関する情報は、本結果と申請者が参加している「テレスコープアレイ実験」によって得られる結果との比較検討を行いながら最終結論を得ることになる。現在までの結果、 $10^{18.5}$ eV 以上での質量組成は陽子であるとの結論を得ており、転換エネルギー領域は 10^{16} から 10^{18} eV に存在する可能性が高くなっている。

4. 研究成果

研究開始から約 2 年間 (平成 23~24 年度) は、空気チェレンコフ光検出装置 7 台、およびデータ収集用ソフト・ハードの制作を行った。観測場所 (南米ボリビア・チャカルタヤ宇宙物理学研究所) への観測輸送は 2 年目の後半に行った。これと平行して、最適な設置場所をシミュレーション計算結果に基づき

決定した。平成 25 年度においては、予備観測を実施し、各装置の動作確認を行った上、本観測を実施した。平成 26 年度では、対象エネルギー領域を高エネルギー側に変更するため、空気チェレンコフ光検出器設置場所を変更し、観測を継続した。観測は月の無い

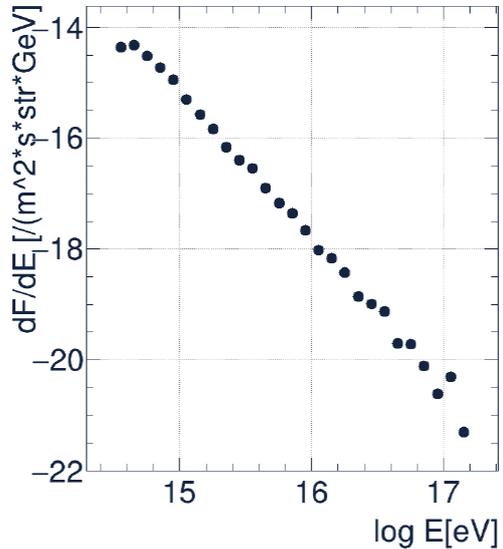


図 4 一次宇宙線微分エネルギースペクトル

晴天夜に行う必要があり、現地が乾期である 4 月から 10 月にかけて実施した。研究終了時までの総観測時間は約 1150 時間となった。

以上の結果、得られた一次宇宙線の微分エネルギースペクトルを図 4 に示す。この結果をエネルギー E のべき乗関数で表すと、 $E=10^{15.6}$ eV に折れ曲がり (knee) が存在し、その前後でべきの値が -2.7 から -2.9 に変化し

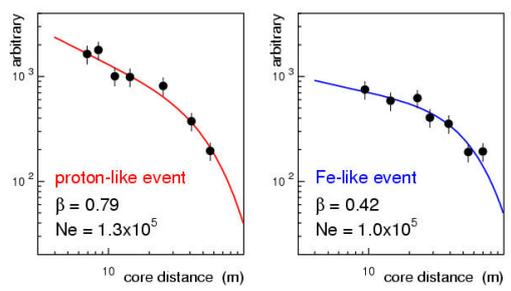


図 5 空気チェレンコフ光横方向分布観測結果の例。一次宇宙線が陽子(左図)、鉄(右図)と推定される事象。

ていることを確認した。一方、空気チェレンコフ光測定結果の例を図 5 に示す。現在、解析を続行中であり、最終結果が得られるまで約半年を必要としているが、一次宇宙線のエネルギーが 10^{16} から 10^{18} eV にかけて、鉄などの重核からより軽い核成分に変化しているようである。また、観測データからより高精度で結論を得るために、より適切な観測パラメータを選定するためのシミュレーション計算を継続しており、これらの結果を踏まえて最終結果を報告する。

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 1 件)

① Y. Tsunesada (10 人中①番目), R. Katsuya (10 人中②番目), F. Kakimoto (10 人中⑤番目) et al., New air Cherenkov light detectors to study mass composition of cosmic rays with energies above knee region, Nuclear Instrumentals and Methods in Physics Research A, 査読有、A763、2014、pp.320-328
DOI : 10.1016/j.nima.2014.06.054

[学会発表] (計 4 件)

① 勝谷龍一、高山での空気チェレンコフ光観測による **Knee** 領域以上の宇宙線核組成研究Ⅳ、日本物理学会、2015 年 3 月 21 日、早稲田大学早稲田キャンパス (東京都・新宿区)
② 勝谷龍一、高山での空気チェレンコフ光観測による **Knee** 領域以上の宇宙線核組成研究Ⅲ、日本物理学会、2014 年 9 月 20 日、佐賀大学本庄キャンパス (佐賀県・佐賀市)
③ 常定芳基、高山での空気チェレンコフ光観測による **Knee** 領域以上の宇宙線核組成研究Ⅱ、日本物理学会、2014 年 3 月 29 日、東海大学湘南キャンパス (神奈川県平塚市)
④ 勝谷龍一、高山での空気チェレンコフ光観測による **Knee** 領域以上の宇宙線核組成研究、日本物理学会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学 (兵庫県・西宮市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

垣本 史雄 (KAKIMOTO, Fumio)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：00092544

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

常定 芳基 (TSUNESADA, Yoshiki)
大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：50401526