

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17685

研究課題名(和文) 超高エネルギー宇宙線源の現象論的なモデルの構築と検証

研究課題名(英文) To build and test a phenomenological model of ultra-high energy cosmic rays

研究代表者

木戸 英治 (Kido, Eiji)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：00633778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：TA実験及びTALE実験で観測したエネルギースペクトルの、約30 PeV以上10 EeV以下の範囲の銀河系外起源と考えられる成分を、現象論的な宇宙線陽子のモデルでフィットして、宇宙線源の条件を調べた。モデルでは、宇宙線源の陽子のエネルギースペクトルをエネルギーEのべき乗則として傾きを -1 とした。共動体積(宇宙膨張で変動しない体積)当たりの宇宙線源の密度を $1+z$ のべき乗則で傾きを m (m : 自由変数, z : 赤方偏移, $z > Z_c$ で密度は定数)とした。フィットした結果、 $-1 = 2.38 \pm 0.04 - 0.04$, $m = 3.6 \pm 0.2 - 0.3$ を得た。また、ある宇宙磁場の仮定のもとに Z_c に制限を与えた。

研究成果の概要(英文)：We fit the energy spectra observed by the Telescope Array (TA) and Telescope Array Low Energy extension (TALE) experiment using phenomenological extragalactic cosmic ray proton source model assuming some models of galactic cosmic rays. The fit range is from about 30 PeV to 10 EeV including the energy region known as “second knee” and “ankle”. We assume the following conditions of the sources. The energy spectrum of cosmic ray protons is power law and the power index is -1 at the source. The cosmic ray source density per comoving unit volume is the power law of $(1+z)$ and the power index is m until $z = Z_c$ and constant for the sources at $z > Z_c$. $-1 = 2.38 \pm 0.04 - 0.04$, $m = 3.6 \pm 0.2 - 0.3$ is obtained by the fitting. The constraint of Z_c is obtained assuming some models of cosmological magnetic fields.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：UHECR

1. 研究開始当初の背景

テレスコープアレイ (TA) 実験で、高い有意度で 57 EeV ($1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$) 以上の宇宙線の到来方向にホットスポットを観測した。このホットスポットの発生源となるような顕著な天体は見つかっていない。

2. 研究の目的

観測されたホットスポットを再現するモデルを TA 実験及びその拡張計画で得られた新しいデータを用いて検証することで、宇宙線及び宇宙線源の特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

観測したホットスポットの起源となる宇宙線源のモデルとして、宇宙の大規模構造の質量分布を考える。そして、宇宙線の到来方向を条件(宇宙線源の密度、宇宙磁場、宇宙線組成)を変えながらシミュレートする。ホットスポットを再現できるようなモデルを、新しく得られたデータを用いて検証する。

4. 研究成果

(1) 計算機を購入し、宇宙線が地上で観測されるまでの伝播の計算を行った。宇宙線源は 2Mass XSCz カタログ中の銀河として、宇宙線源から放射される 5 種類の宇宙線原子核 (p, He, N, Si, Fe) のエネルギースペクトルは、べき乗則に従うと仮定した。計算結果はデータベース化して、べき乗の傾きを変更して取り出せるようにした。

(2) 予期していなかったことに、2017 年 TA 実験では、57 EeV 以上の宇宙線の到来方向に観測されたホットスポットを含む天域 (北緯 24.8 度以上 (引用文献 参照)、また超銀河面から 30 度以下 (引用文献 参照)) で、エネルギースペクトルのカットオフのエネルギーが他の天域よりも高くなっている兆候を観測した。カットオフの違いを説明するためには、例えば加速限界の異なる特別な宇宙線源が必要で、当初計画していたような宇宙線源のモデルのパラメータでは、異方性を再現できないことが分かった。更に、TA 実験では、16 EeV 以上でもエネルギースペクトルに異方性の兆候を観測した。(引用文献 参照) これらのエネルギースペクトルの異方性を詳しく調べるためには今後観測を更に進める必要があるが、16 EeV 以上で既に、何か特殊な宇宙線源の影響が大きい可能性がある。以下では、より一般的な宇宙線源のモデルを構築するために、10 EeV 以下のエネルギーの宇宙線の起源について研究を進めることにした。

(3) (1) で行った宇宙線の伝播計算を、更に遠方の宇宙線源、低いエネルギーの宇宙線に

ついて行った。その結果を用いて、TA 実験及び TA 実験の拡張計画である TALE 実験で観測したエネルギースペクトルを再現するような宇宙線源の現象論的なモデルを構築した。以下ではこの成果について報告する。

(4) エネルギースペクトルには特に統計精度のいい、TA 実験の地表検出器 (SD) のデータ解析により得られたもの、TA 実験の大気蛍光望遠鏡 (FD) 単眼で得られたデータ解析で得られたもの、また TALE 実験の FD 単眼で得られたものを用いた。エネルギースペクトルのデータ点は図 1 にプロットされている。黒点が TASD、青点が TAFD 単眼解析、赤点が TALEFD 単眼解析の結果である。図の誤差棒は統計誤差を意味していて、陰になっている領域は、それぞれのデータ点の統計誤差と系統誤差を含んだ不定性を意味している。これらの不定性とは別に、エネルギースケールの系統誤差が 21% あるが、それぞれのデータ間で相互に較正がなされているため、お互いのエネルギースケールは共通である。TA 実験のエネルギースペクトルは、世界で唯一このような広いエネルギー範囲に渡って共通のエネルギースケールで取り扱うことができる。

(5) 宇宙線の伝播計算を行う際、遠方の宇宙線源について扱うために、宇宙線源の共動体積 (宇宙膨張で変動しない体積) 当たりの密度は $(1+z)^m$ (m : 自由変数, z : 赤方偏移, $z > z_c$ で密度は定数) の個数進化をすると仮定した。また、低いエネルギー宇宙線のエネルギースペクトルは、宇宙磁場の条件によっては、低いエネルギーで宇宙線の強度が抑制される可能性がある。参考文献の方法に従って、磁場の影響を考慮してエネルギースペクトルの計算を行った。この際、1 Mpc のコヒーレント長の磁場の強度を B_c として考慮した。その結果、宇宙線のエネルギースペクトルへの磁場の影響の大きさは、個数進化のパラメータ m に大きく依存することが分かった。 m が 0 程度で小さい場合には、磁場の影響は宇宙線源間の距離に大きく依存するが、 m が大きい場合には、宇宙線源の間の距離にあまり依存せず磁場の影響が大きい。この成果は宇宙線国際会議 (ICRC2017) で発表した。

(6) (4) で述べたデータの、 $10^{16.5} \text{ eV} - 10^{19} \text{ eV}$ の範囲の銀河系外起源と考えられる成分を、(5) で述べた条件で伝播計算を行った宇宙線陽子でフィットして、宇宙線源の条件を調べた。このエネルギーの範囲は、second knee (約 0.1 EeV) と ankle (約 5 EeV) と呼ばれる領域を含んでいる。ここでは、second knee の領域で銀河系内起源から銀河系外起源の宇宙線の遷移が起こっていると仮定した銀河系内起源の宇宙線のモデル (引用文献) を用いた。フィットした結果、 $= 2.38 + 0.04 - 0.04$, $m = 3.6 + 0.2 - 0.3$ が得られた。また、宇宙磁場の仮定のもとに Z_c に制

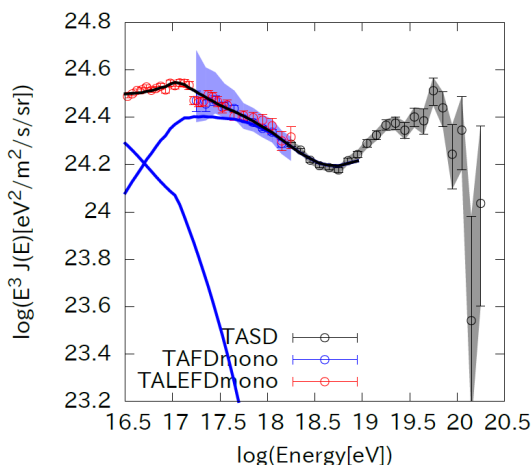


図 1: TA 実験と TALE 実験で測定されたエネルギースペクトルと、モデルの曲線 (黒線)

限を与えた。磁場の影響が十分無視できる場合には、 $Z_c = 2.1 + 0.5 - 0.3$ が得られた。また、 Z_c が十分大きい場合には、磁場強度 B_c について約 0.01 nG の上限値が得られた。図 1 のモデルの曲線は、磁場の影響を無視した場合に最もフィットが良かったモデルの曲線で、図の黒線で示している。また、銀河系内の成分が左、銀河系外の成分が右の青線に対応している。図 2 は、図 1 に用いたものと同じモデルで、宇宙線原子核の質量数 A の自然対数を取ったもの $\ln A$ の平均値 $\langle \ln A \rangle$ と、これまでの実験で得られたデータ点を比較した図である。図でモデルは青線で描かれ、他のモデルが赤線と黒線で描かれている。赤線と黒線のモデルは、ankle 領域付近で銀河系内から銀河系外への宇宙線源の遷移が起こっているとするものである。今回得られたモデルが示すような second knee の解釈は KASCADE 実験などの見解とは異なっているが、TALE 実験 FD の単眼解析で得られた原子核組成の予備的な結果とは矛盾していない。昨年 TALE 実験の

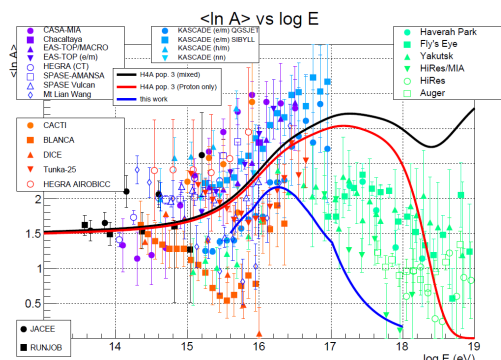


図 2: 過去に測定された宇宙線原子核の $\ln A$ の平均値とモデルの曲線(青線)

SD が完成したので、今後 TALE 実験の SDFD ハイブリッド観測で、単眼解析よりも精度のよい原子核の組成の測定が可能になった。今後は宇宙線原子核の組成の観測を進めることで、モデルの弁別が進む見通しである。

また、宇宙線の到来方向において、銀河系内起源の宇宙線からは、銀河系外起源の宇宙線よりも大きな異方性が期待される。今後も SD を用いた宇宙線の到来方向の異方性の探索を継続することによって、モデルの検証が進展する可能性もある。

<引用文献>

R.U. Abbasi et al., arXiv:1801.07820 [astro-ph.HE]
 R.U. Abbasi, et al., arXiv:1707.04967 [astro-ph.HE]
 R.U. Abbasi, et al., arXiv:1802.05003v2 [astro-ph.HE]
 R. Aloisio, V. Berezhinsky & A. Gazizov, ApJ 693, 1275 (2009).
 T. Abu-Zayyad, et al., arXiv:1803.07052 [astro-ph.HE]

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 0 件)

[学会発表](計 1 件)

Eiji Kido, " Interpretation of the energy spectrum observed with the Telescope Array detectors ", 35th International Cosmic Ray Conference - ICRC2017, 2017

[図書](計 件)

[産業財産権]

出願状況(計 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 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
木戸 英治 (KIDO Eiji)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教
研究者番号：00633778

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：

(4)研究協力者
O. Kalashev
G. Thomson
P. Tinyakov
長瀧重博 (NAGATAKI Shigehiro)