

論文内容の要旨

Study on the High-Energy Cosmic-Ray Anisotropy with the Tibet Air-Shower Array

(チベット空気シャワーアレイを用いた
高エネルギー宇宙線異方性の研究)

氏名：佐古 崇志

1 研究の背景

宇宙線と呼ばれる高エネルギーの荷電粒子(ほとんどは陽子)が、常にほぼ等方的に地球に降り注いでいる。そのエネルギースペクトルは 30 GeV から 100 EeV を超える広い範囲にわたってべき型($\propto E^{-\gamma}$)で表され、4000 TeV 付近でべきの指数 γ が 2.7 から 3.1 に変化することが知られており、これは宇宙線スペクトルの knee と呼ばれる。knee より低いエネルギーの宇宙線は我々の銀河系起源と考えられており、それらの銀河宇宙線は源で加速されたのち、星間空間及び太陽圏を伝播して地球に到達する。過去の地下ミュオン実験や空気シャワーアレイ実験により、太陽時 (365.2422 cycles/year)、及び恒星時 (366.2422 cycles/year) という二つの時間系において、銀河宇宙線の到来方向には小さな異方性が観測されている。太陽時における異方性は、主に太陽活動によって生じる太陽圏内の磁場構造に起因すると考えられる。恒星時における異方性は、太陽系近傍の磁場構造と宇宙線との相互作用を反映したものだと考えられる。恒星時で観測された異方性は、0.1% レベルの小さなもので、二つの顕著な特徴が見られる。一つは赤経 150° から 240° あたりに広がる宇宙線強度の欠損 (loss-cone と呼ばれる) であり、もう一つは赤経 40° から 90° あたりに広がる宇宙線強度の超過 (tail-in と呼ばれる) である。様々な電磁流体力学に基づくシミュレーションや理論的考察がなされてきたが、観測された異方性を満足に説明できる太陽系周辺の星間空間の描像は、未だに確立されていない。近年、チベット空気シャワーアレイなどの高統計の実験により、宇宙線異方性が TeV 領域で詳しく調べられるようになっており、観測された異方性から星間空間に関する物理量を引き出すモデルも提案されている。また、米国のミラグロ実験により、上記の loss-cone 領域の深さが 6 TeV において 2000 年から 2007 年にかけて増加しているという報告がなされた。

一方太陽時では、太陽活動の影響のない高エネルギー (\gtrsim 数 TeV) において、地球の公転運動に起因する見掛けの異方性 (Compton-Getting (CG) 異方性と呼ばれる) が存在する。これは恒星時の異方性よりも小さな 0.04 % 程度の振幅を持つものであり、理論的に良く予言されているものである。従って、この CG 異方性を期待値どおりに観測することは、恒星時での観測の正しさを証明する非常に良い基準となる。しかし、振幅の小ささ、および低エネルギー (\lesssim 数 TeV) での太陽活動の影響ゆえに、CG 異方性の高精度な観測に成功した実験は、チベット空気シャワー実験以外にない。

2 研究の目的

チベット空気シャワーアレイは、東経 90.522°、北緯 30.102°、海拔 4,300 m、大気深さ 606 g/cm² に位置する、宇宙線及び宇宙ガンマ線観測装置である。1990 年から続いている実験であり、数 TeV 以上での宇宙線異方性観測においては世界最高統計を誇る。現在宇宙線異方性観測は上記のような状況にあり、チベット空気シャワーアレイによる宇宙線異方性の研究は、非常に大きな意味を持つものである。この論文では、太陽時および恒星時において、世界最高統計で multi-TeV 領域の宇宙線を観測する。

まず、太陽時の CG 異方性を期待値どおりに観測できていることを確認し、我々の観測及び解析方法の正しさを証明する。さらに、CG 異方性の振幅から宇宙線エネルギースペクトルのべきを算出する方法を提案し、12 TeV–70 TeV 領域において実際にべきを求める。この方法を用いれば、従来のスペクトル測定の方法と異なり、シミュレーションに依存せずにべきを導出することができる。エネルギースペクトルの knee を説明する理論の多くは、加速機構や星間空間の伝播などの天体物理学を起源としているが、いくつかの理論は、knee を超える高エネルギーで現れる空気シャワー中の未知の核子相互作用を起源としている。CG 異方性を用いれば、knee が空気シャワー起源だとする理論を検証することができる。今回の観測により、世界で初めて CG 異方性から宇宙線エネルギースペクトルのべきを測定する。

次に、恒星時の異方性を観測し、ミラグロ実験によって観測された 6 TeV における loss-cone 領域の深さの時間変化を検証する。ミラグロ実験は、この時間変化を太陽活動によるものかもしれないと主張しているが、はっきりとした理由はまだわかっていない。

最後に、最近提案されたモデル (“Global Anisotropy and Additional Excess model”; GA+AE モデルと呼ばれる) をもとに、観測された恒星時宇宙線異方性から、太陽系近傍の磁場構造と宇宙線の流れについて議論する。また、高統計を活かし、モデルのパラメータのエネルギー依存性も導出する。今回の観測により、世界で初めて GA+AE モデルを用いて恒星時宇宙線異方性のエネルギー依存性を測定する。

3 観測結果

太陽時の異方性を 12 TeV–70 TeV で観測し、図 1 に示すような宇宙線強度の日周変動を得た。図 1 を正弦関数 $1 + \alpha \cos((\pi/12)(\lambda - \phi))$ (λ : 地方太陽時) でフィットした結果、振幅 $\alpha = (4.06 \pm 0.21_{stat} \pm 0.24_{syst}) \times 10^{-4}$ 、位相 $\phi = 6.1 \pm 0.2$ [hr] を得た。CG 異方性から期待される値は $\alpha = 3.86 \times 10^{-4}$ 、 $\phi = 6.0$ [hr] であり、観測は期待値と良く一致している。この振幅から宇宙線スペクトルのべき γ を求め、 $\gamma = 2.94 \pm 0.25_{stat} \pm 0.30_{syst}$ を得た。これは直接観測による値 2.7 と良く一致している。

次に、恒星時での宇宙線異方性における loss-cone の深さの時間変化を求め、ミラグロ実験の結果と比較した。我々の結果 (図 2 (a)) は、4.4、6.2、11 TeV において、信頼度 6.5σ 、 7.0σ 、 7.1σ でミラグロ実験の結果 (~ 6 TeV) と矛盾するものであった。もしミラグロ実験の観測した loss-cone の深さの時間変化が太陽活動起源であるならば、太陽活動の影響を受けやすい sub-TeV 領域の観測でも同様の傾向が見られているはずである。しかし、松代地下ミューオン観測装置による 0.6 TeV の観測においてもそのような時間変化は見られなかったことが示されている (図 2 (b))。

続いて、得られた全てのデータを用いて、恒星時での宇宙線異方性二次元マップを得た(図3、最頻エネルギーは7.0 TeV)。図3を“Global Anisotropy and Additional Excess model”(GA+AEモデル)でフィットして得たモデルパラメータをもとに、観測された異方性の解釈を試みた。GA成分は、星間空間磁場に沿った二方向からの宇宙線の流れと、それに垂直な一方向からの流れの重ね合わせで解釈した(図4)。一方向からの流れは、星間空間磁場中に宇宙線の密度勾配があると仮定し、それに起因する宇宙線の反磁性ドリフトで説明した。このモデルは、GA成分が太陽系をとりまく数 pc 規模のスケールで作られるものであることを示している。このモデルが正しければ、 $3 \mu\text{G}$ の星間空間磁場強度を仮定して、宇宙線の密度勾配 ($\nabla n/n$) と磁場に垂直方向の拡散係数 (κ_{\perp}) が図5のように推測される。AE成分は、太陽圏尾部方向からの、二成分から成る宇宙線の超過である。簡単なモデルを用いて AE成分の解釈を試み、AE成分はGA成分の1/1000スケール(太陽系近傍数100 AU)で作られていること、AE成分は $\sim 80 \text{ TeV}$ 以上では消えることを示唆した。また、二成分の振幅の比から、Voyager などにより示唆されている太陽圏の南北非対称性を支持する興味深い結果が得られた。AE成分は、TeV宇宙線異方性の観測から、太陽圏の磁場構造に関する情報も得られる可能性があることを示している。

今回の観測により得られた物理量は、将来の実験による追証およびより詳細なシミュレーションや理論的考察を促し、太陽圏とその周辺の星間空間に関するより深い理解へとつながるものであると期待される。

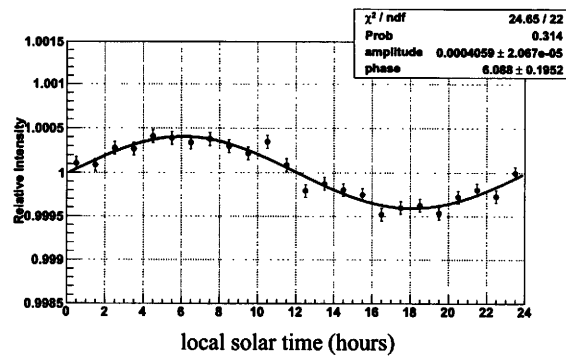


図1: チベット空気シャワーアレイで観測された12 TeV–70 TeVにおける宇宙線強度の太陽時日周変動。誤差は統計誤差のみ。

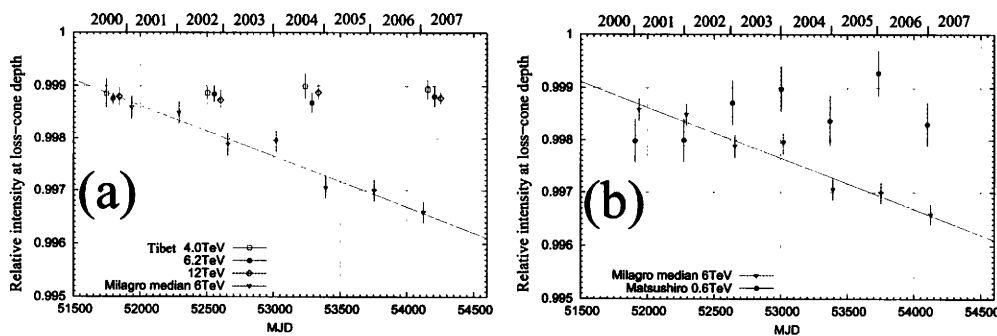


図2: 恒星時での宇宙線異方性における loss-cone の深さの時間変化。(a) チベット空気シャワーアレイとミラグロ実験との比較、(b) 松代地下ミューオン観測装置とミラグロ実験との比較。図中の松代のデータは、振幅、エラーともに3倍されている(sub-TeV領域での振幅の減衰を補正するため)。

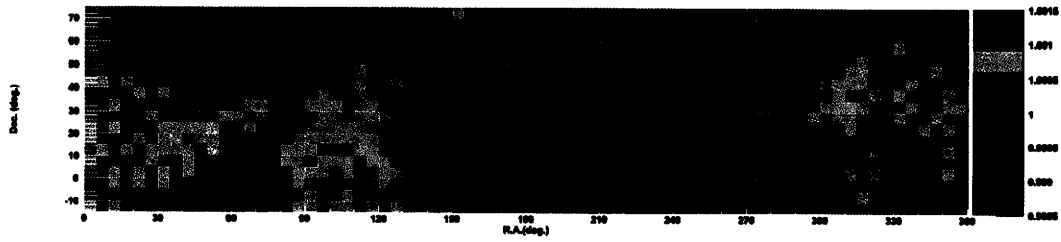


図 3: チベット空気シャワーアレイで観測された恒星時での宇宙線異方性二次元マップ。宇宙線の最頻エネルギーは 7.0 TeV。ピクセルの色は宇宙線の相対強度を表す。

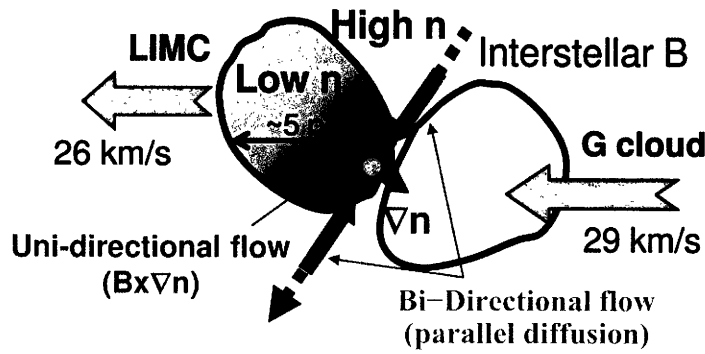


図 4: LIMC モデルの概念図。太陽系 (黄色の丸) は周辺より宇宙線密度の低い雲の縁に位置する。観測された恒星時宇宙線異方性の GA 成分は、星間空間磁場に沿った二方向からの宇宙線の流れ (Bi-Directional flow) と、それに垂直な一方向からの流れ (Uni-directional flow) の重ね合わせで解釈される。

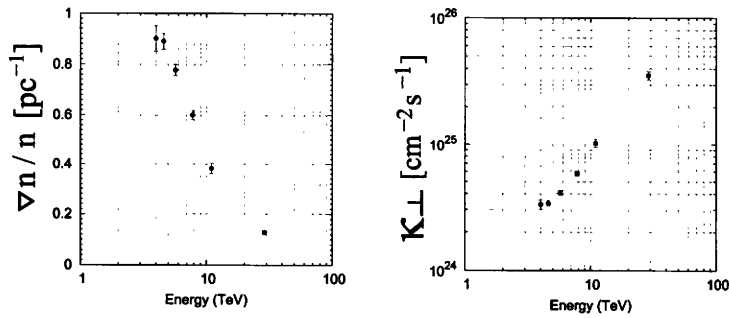


図 5: GA+AE モデルに基づいて導出した、太陽圏周辺における宇宙線の密度勾配 $\nabla n/n$ (左)、および磁場に垂直な方向の宇宙線の拡散係数 κ_{\perp} (右)。