



# Anisotropy of Arrival Direction of Primary Cosmic Rays from $10^{14.8}$ to $10^{18}$ ev Observed at Akeno

Nishijima, Kyoshi

---

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

1986-11-28

(Date of Publication)

2014-03-12

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1048

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001048>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	にし　じま　きょう　し　（三重県） 西　嶋　恭　司
学位の種類	理学博士
学位記番号	理博ろ第5号
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位授与の日付	昭和61年11月28日
学位論文題目	ANISOTROPY OF ARRIVAL DIRECTION OF PRIMARY COSMIC RAYS FROM $10^{14.8}$ TO $10^{18}$ EV OBSERVED AT AKENO (明野で観測された $10^{14.8}$ から $10^{18}$ eV 領域の一次宇宙線到来方向の非等方性)
審査委員	主査 教授 豊田好男 教授 小早川 恵三 教授 宮垣盛男 名古屋大学教授 村上 一 昭

### 論文内容の要旨

1912年に、Hess によって宇宙線が発見されて以来、宇宙線研究は、おもに素粒子物理学の発展に大きな寄与をしてきた。しかしながら、宇宙線の起源、加速、伝播という問題は、多大な努力にもかかわらず、現在にいたってもなお憶測の域を出ていない。その主要な原因は、宇宙線は電磁波と異なり荷電粒子である為、星間磁場によってその軌道が曲げられ、発生の方向を直接的に指摘できない点にある。

しかしながら、 $10^{14}$  eV  $\sim$   $10^{18}$  eV のエネルギー領域で、宇宙線の到来方向の分布を知ることが、宇宙線の起源、伝播及び宇宙磁場を探る重要な情報となり得る。この種の実験は古くから行われてきたが、到来方向の異方性の量が極めて小さいこと、エネルギーとともに強度が急激に小さくなり統計量が稼げないこと、等の理由により信頼できるデータは極めて少ない。本研究は、空気シャワーとして観測される高エネルギー宇宙線の到来方向を調べ、そのランダムな方向の中から統計的手法によって、僅かな異方性を求め、高エネルギー宇宙線の若干の平均的な流れの方向を探り出そうと試みたものであり、その特徴は以下の通りである。

1) 従来はこの方面の観測で、実験グループにより必ずしも一致した結果が得られていない点を考慮し、 $10^{14.8}$  eV から  $10^{18}$  eV にわたる広いエネルギー領域について、系統的にエネルギー依存性を調べたこと。

2) 観測の困難な  $10^{15}$  eV 以下の小空気シャワー領域の宇宙線に対して、温度特性の優れた比例

計数管を用い、シャワー発達の揺らぎの小さいミュオンでトリガーする方法により信頼性のあるデータを得たこと。

3)  $10^{15}$  eV以上の空気シャワーに対して、一般的に行われている電子密度によるトリガーと同時に、ミュオントリガーを併用し、2)で述べた利点を生かすとともに、測定される空気シャワーの特徴による相違を検討したこと。

4) 空気シャワー中に含まれるミュオン数と電子数との割合によってデータを分け、一次宇宙線の組成による異方性を調べたこと。

本論文ではまず、従来の観測結果及び、各種のモデルから期待される異方性をまとめた。従来の観測結果は、その信頼性及び各グループ間の一致という点で疑問が残るものの、 $10^{14}$  eV以下で振幅はほぼ一定で、それ以上では、エネルギーとともに大きくなる傾向が見られる。位相は、 $10^{16}$  eV以上で大きく変化していることが指摘されている。ほとんどのモデルは、振幅のエネルギー依存性を説明することはできても、位相を説明するには至っていない。

次に、観測が行われた東京大学宇宙線研究所附属明野観測所の空気シャワーアレイについて記した。アレイは、北緯 $35^{\circ}8'$ 、大気の深さ約 $930\text{ g cm}^{-2}$ の所にあり、本実験に用いた装置は、 $2\text{ m}^2$ と $1\text{ m}^2$ 合わせて154台のシンチレーション検出器(荷電粒子数測定用)と、比例計数管50本からなる面積 $25\text{ m}^2$ 、臨界エネルギー $1.0\text{ GeV}$ のミュオン粒子数測定用観測棟9棟であり、それ等が、約 $1\text{ km}^2$ にわたって設置されている。また、到来方向決定用として、合計87台のシンチレーション検出器に、速い光電子増倍管が取り付けられており、それより時間情報を得た。

次の二章では、ミュオントリガーによって、1時間当たりの計数率のみを記録した、 $6 \times 10^{14}$  eV領域の1年間の観測と、通常の各種シャワーパラメータを求める方法で $10^{15}$  eV以上の領域に対して行った、一般的な電子成分トリガーによる4年間の観測、及び、すでに述べた利点を持つミュオントリガーによる2年間の観測について、その概要とデータの整理について述べた。前者については、有効観測時間7,043時間、解析に用いたイベント数は、2,662,822であり、後者については、電子成分トリガー、ミュオントリガー、それぞれについて、有効観測時間は、27,317時間、12,430時間、解析に用いたイベント数( $E \geq 10^{15}$  eV)は、324,813, 74,185である。

ついで、観測データから見掛けの非等方性を除くために、大気圧、及び気温の、計数率に及ぼす効果とその補正を検討した。得られた気温効果係数、気圧効果係数は、それぞれ、およそ $-1\%/ \text{deg} \sim 0\%/ \text{deg}$ 、及び $-1.2\%/ \text{mb} \sim -0.6\%/ \text{mb}$ で、エネルギー依存性及びトリガーによる差が見られる。

宇宙線の流れの方向は、一般的には地球の自転にともなう宇宙線強度の恒星時変化の観測から推定される。そこで、おもに恒星時に対する調和解析の手法を用い、観測データから導出した最終的な実験結果を、各エネルギー領域について非等方性の大きさ及びその方向(赤道座標及び銀河座標)について次の2章に示した。結果は、以下の通りである。

$6 \times 10^{14}$  eV領域においては、一次調和振幅は $330^{\circ} \pm 21^{\circ}$ の方向に $0.23 \pm 0.09\%$ の非等方性が、二次成分については $92^{\circ} \pm 8^{\circ}$ の方向に $0.30 \pm 0.09\%$ の非等方性が、それぞれ観測された。特に、二

次成分については、一様分布から偶然に観測された振幅が得られる確率は、 $2.6 \times 10^{-3}$  で、統計的にかなり有意といえる。反恒星時に対する振幅は十分小さく、統計誤差の程度である。また、各月毎の太陽時半日変化のベクトルが調和ダイアグラム上で期待される方向に半年で一回転している。

$10^{15}$  eV 以上の領域においては、二桁以上にわたって、一次成分の位相がおよそ $300^\circ$  に集まっていることがわかった。振幅は、0.8%~2.5%程度である。二次成分については、このエネルギー領域では有意な異方性は得られていない。

総ミュオン数と総電子数の比 ( $N_\mu / N_e$ ) の値で、ミュオン過剰なシャワーを選んで解析した結果は、一次、二次成分ともに統計的に有意性の高い異方性は見られない。しかし、一次成分の  $(3.2-10) \times 10^{15}$  eV 領域での位相が、全シャワーに対するミュオン過剰シャワーの割合で60%を境にして、大きく変わっているように見える。ただし、統計的にはそれほど有意ではない。

電子密度トリガーについて、 $N_\mu / N_e$  比で0.01以下のミュオン不足シャワーを選んで解析した結果、二次成分において数%の比較的高い振幅を持って、およそ $170^\circ$ の位相のところに集まっているように見える。位相の経年変化は、かなりゆらぎがあるが、概ね一定方向にベクトルが向いており、したがって、一時的な、人為的効果ではなさそうである。

最後に、今回の観測結果と従来の結果とを比較し、また、各種のモデルからの期待値との比較検討も行った。

全体的に、位相、振幅ともに他のグループの結果と大きくは違わないが、 $10^{17}$  eV 以上の領域で、一次成分の位相のエネルギー依存性が明らかに異なっている。原因はよくわからないが、この領域の統計量は不足しており、今後の研究に待たねばならない。 $N_\mu / N_e$  比でイベント選別にバイアスをかけた解析は、いままでほとんどなされていない。昔の他のグループは、 $\rho_\mu$  の大きさにイベントを選んだ結果を得ているが、今回の明野の結果とはあまり一致していない。しかし、ミュオン検出器の総面積、イベント数等から、統計的にも質的にも明野のデータのほうがはるかに精度がよく、信頼できると考えられる。

観測された異方性は、 $10^{15} \sim 10^{17}$  eV 領域で、宇宙線の強度の高い方向と、spiral in の方向とが一致しているように見える。これに南半球のデータを加えると、銀河腕に沿った宇宙線の流れで説明できる。 $6 \times 10^{14}$  eV 領域の結果は、銀河腕からやはずれた方向の流れを仮定すれば説明でき、その方向は局所磁場の方向にほぼ一致している。ミュオン不足イベントについては、銀緯の高い方向からの強度が強いように見える。位相と、ミュオン過剰シャワーの全シャワーに対する割合との関係から、 $10^{15.5} - 10^{16}$  eV 領域で、プロトンより重い原子核の寄与があり、更にその起源が、位相の比較から、プロトンと異なる可能性を示している。

以上より得られた結論として、以下の可能性が強く指摘される。

- 1)  $10^{14}$  eV 台のエネルギー領域の宇宙線には、太陽系近傍の局所磁場に沿った流れがある。
- 2)  $10^{15} \sim 10^{17}$  eV の宇宙線には、太陽系近傍の銀河アームに平行な大局的磁場に沿った流れがある。
- 3) ミュオンの割合の多い空気シャワー或いはその非常に少ないシャワーには、一般の空気

シャワーといくらか異なった異方性が見られ、一次宇宙線の組成により異なった寄与がある。

## 論文審査の結果の要旨

近年における宇宙物理学の発展は著しいものがある。しかるに、発見以来既に70年余を経過している宇宙線に関する、その起源及び加速・伝播の機構については幾多の理論的モデルの提唱にもかかわらず、それらの是非を判定するに足る観測資料を得る方法が極めて困難なため未だに憶測の域を出ない。その主因は高エネルギー荷電粒子である宇宙線が宇宙空間磁場によってその軌道が曲げられ、複雑な経路を経て地球に入射すると考えられるため、電波・赤外線・可視光線・X線・ $\gamma$ 線等のいわゆる電磁波の観測のように、その到来方向から直ちに発生場所を指示し得ない点にある。

このような状況の下で一次宇宙線の到来方向の長時間の観測による膨大な資料から、統計的手法を用いて、そのランダムな方向の中に僅かな非等方性を求め、宇宙線の平均的な流れを探る研究は古くから行われている。このような研究は観測される宇宙線のエネルギーが高い程、軌道の曲率が小さくなるため、起源・伝播等の理論的モデルとの対応は簡単になる。

本研究はこれまでにまだ確立されていない  $10^{14}$  eV 以上の高エネルギー宇宙線(空気シャワーとして観測される)の到来方向の非等方性を調べたものであり、論文の概略は以下の通りである。

最初の2章において宇宙線の起源・加速・伝播の問題と高エネルギー宇宙線の到来方向の非等方性との関係について概括し、これまでに断片的に得られている、この方面の観測の結果をまとめている。また、他の報告に対する本研究の特徴について言及している。第3章においては太陽系近傍の磁場について述べると共に、これまでに提唱された各種のモデルからどのような振幅の非等方性が期待されるかをまとめている。しかし、これらのモデルがいずれも非等方性の位相(方向)を説明し得ていないことを指摘している。第4章においては観測の行われた東京大学宇宙線研究所明野観測所の共同利用装置である空気シャワーアレイの説明を行っている。そしてこの装置がミュオンの検出容量の大きいことを強調している。

第5章においては本人が1年間余にわたって独自に行った平均エネルギー  $6 \times 10^{14}$  eV の空気シャワーの観測の方法について述べている。このエネルギー領域の宇宙線は小さな空気シャワーとなるため、測定が比較的困難で、現在迄信頼性のある結果が得られていなかった。本人は温度特性の良い比例計数管を使用し、また気圧の変動や空気シャワーの大気中での発達揺ぎによる影響の少ないシャワー中のミュオンをトリガーとして用いて、シャワーの計数率を測定し信頼性の高い観測資料を得ている。

第6章では本人が共同実験グループの一員として実施した  $10^{15} \sim 10^{18}$  eV の空気シャワーについての4年間の観測結果及び方法について述べている。従来の観測は種々のエネルギー領域についての断片的な結果が多く、当観測のように広いエネルギー領域にわたって同一装置で系統的にエネルギー依存性を調べたものは殆んどない。更に空気シャワーのトリガーに対して、従来から行われている空気シャワーの粒子の主成分である電子の密度による方法に加えて、一次宇宙線のエネルギー

及び組成との対応の良いミュオン密度による方法を用いている。また、これらの粒子の含まれる比率によってシャワーの特性を区分し、非等方性の相異を調べている点は他に例を見ない本観測の特徴である。第7章では気圧及び気温効果による計数率の補正について詳細に述べている。

第8及び第9章において補正された資料を用いて調和解析の方法により各エネルギー領域及びトリガーの種類により区分して到来方向（赤道座標及び銀河座標）の非等方性を求め、その結果の信頼度を十分検討している。その中で特に顕著な点は以下の通りである。

(a)  $6 \times 10^{14}$  eVの平均エネルギー領域で赤径  $92 \pm 8^\circ$  の方向に振幅  $0.30 \pm 0.09\%$  の調和解析の二次成分が偶然確率  $2.6 \times 10^{-3}$  の有意性で観測されていること。

(b)  $10^{15} \sim 10^{17}$  eVの広いエネルギー領域にわたって調和解析の一次成分の位相が  $300^\circ$  近傍に集まっていること（振幅  $0.8 \sim 2.5\%$ ）。

(c) ミュオンの含まれる割合の多い空気シャワー及びその少ないシャワーについての方向性が平均的なシャワーと幾らか異なった傾向を持っていること。

第10章において、この観測によって得られた結果を他のグループの報告及びモデルからの期待値と比較検討し、また拡散モデルによる計算を試みている。更に非等方性のミュオンの割合による依存性をエネルギー別に検討し、ミュオン過剰のシャワーを一次宇宙線の重粒子に対応させて、一次宇宙線の組成のエネルギー依存性が非等方に反映している可能性を指摘している。

上記の結果と太陽系近傍の銀河磁場の様相とを比較し、その主要な物理的内容は以下のようにまとめられる。

(1)  $10^{14}$  eV台のエネルギー領域の宇宙線には（前述の第8章の(a)の結果より）太陽系近傍の局所磁場に沿った流れが示唆される。

(2)  $10^{15} \sim 10^{17}$  eVのエネルギーの宇宙線には（前述の第9章の(b)の結果より）太陽系近傍の銀河腕に沿った流れの存在が考えられる。

(3) 一次宇宙線の組成により異なった非等方性が期待され、将来の一層の研究が必要である。

以上のように本研究は高エネルギー宇宙線の到来方向の非等方性について信頼度の高い観測結果を与えた労作であると共に、有意義な情報を与えており、この方面の研究の発展に十分貢献すると思われる。

当委員会は論文内容を詳細に検討した結果、学位申請者、西嶋恭司は理学博士の学位を得る資格があると認める。