

宇宙線発見から 100 年 —幕を開けた極高エネルギー宇宙線天文学—

藤井 俊博 (大阪市立大学 D3)

2012 年 8 月 1 日 ~ 4 日, 第 42 回天文・天体物理若手 夏の学校

概要

ちょうど 100 年前, V.F.Hess の気球実験によって宇宙空間に存在する高エネルギーの放射線「宇宙線」が発見された. この発見をきっかけとし, 現在まで 10^8 eV から 10^{20} eV を超えるエネルギーの宇宙線観測が世界各地で始まった. 一般的に宇宙線の大部分は電荷を持った原子核であり, 銀河磁場で曲げられるため, 天体起源であった場合でも相関が見えにくいと考えられている. しかし, 頻度が極端に少ない 10^{19} eV を超える巨視的なエネルギーを持つ極高エネルギー宇宙線は銀河磁場で曲げられにくく, その到来方向と起源天体との相関が期待され, 次世代の天文学として非常に注目されている. 本公演では宇宙線の発見から 100 年にわたる観測の歴史をレビューし, さらに最新の天文学的な観測結果について報告する.

1 宇宙線観測の歴史

1912 年, V.F.Hess は気球を使い高度 5 km までの放射線量を測定し, 高度が高くなるにつれて放射線量が増加することを発見した. この発見により宇宙から放射線が入射していることが明らかになった. 宇宙空間に起源を持つ高エネルギーの放射線は宇宙線と呼ばれ, 1936 年, 宇宙線の発見により V.F.Hess はノーベル賞を受賞した.

1930 年には地磁気を用いた東西効果から, 宇宙線がガンマ線などの中性粒子ではなく荷電粒子であることが明らかになり, 1932 年には霧箱を使った写真の中に電子線が増殖する現象が発見され, シャワーと名付けられた. その後, 1937 年には透過性の強い μ 中間子 (ミューオン), 1947 年には原子核乾板 (エマル

ジョンチェンバー) を使い π 中間子 (パイオン) が発見された. 1941 年には気球を使い, 宇宙線の成分を測定し大部分が正の電荷を持った陽子であることが発見され, 1948 年には陽子以外にも, ヘリウム, ホウ素, 炭素や鉄といった多くの種類の宇宙線が発見された. これらの業績から, 1949 年には π 中間子の予言により湯川秀樹が, 1950 年には原子核乾板の開発と中間子の発見により C.F.Powell がそれぞれノーベル賞を受賞した.

1945 年頃から, ガイガーミュラー計数管, シンチレーション検出器, チェレンコフ検出器を使ったエネルギースペクトルの測定が始まった. そして, 測定で得られたスペクトルが $dN/dE \propto E^{-\gamma}$ のべき関数となっていることが明らかになった. その後も宇宙線のエネルギースペクトルの測定は続けられ, 1958 年には $\sim 10^{15}$ eV までのエネルギースペクトル, 1962 年には 12 km^2 の有効検出面積を持つ, 地表に等間隔で検出器を並べた地表検出器検出器アレイによって $\sim 10^{20}$ eV の宇宙線が観測された.

1965 年に宇宙背景放射が発見されるとすぐに, 10^{20} eV のエネルギーを持つ宇宙線は宇宙背景放射と相互作用し, エネルギーを大きく失うため, 宇宙空間の比較的近傍からしか到来せず, その結果スペクトルが減少することが予測された. この 10^{20} eV 付近で到来頻度が急激に減少することを, 理論を提唱した K. Greisen, G. Zatsepin, V. Kuzumin らの頭文字を取って, GZK カットオフと名付けられた.

1979 年には地表検出器アレイ型の明野空気シャワー観測装置 (Akeno) の稼働が開始され, 1981 年には Fly's Eye 実験が開始され, 空気シャワーの粒子数の増減を大気蛍光発光によって撮像する大気蛍光

法が確立された。さらに 1990 年には当時世界最大の 100 km² の有効検出面積を持つ、明野広域空気シャワー観測装置 (AGASA) の稼働が開始され、1994 年には High Resolution Fly's Eye (HiRes) 実験も開始された。

また、2004 年には地表検出器アレイと大気蛍光法を組み合わせた 3000 km² の有効検出面積をもつ Pierre Auger Observatory (Auger) が南半球で観測を開始し、2007 年には同じタイプで 700 km² の有効検出面積を持つ Telescope Array Experiment (TA) が北半球で観測を開始し、現在も宇宙線の定常観測を続けている。

そして 2012 年現在、宇宙線発見から 100 年の間に有効検出面積が飛躍的に向上し、到来頻度が少ない 10¹⁹ eV 以上の宇宙線を豊富な統計量で測定可能になった。そして、その豊富な極高エネルギー宇宙線の到来方向と既知の天体との相関や、点源探査という天文学的なアプローチが可能となった。つまり、極高エネルギー宇宙線による天文学の幕開けである。現在まではまだ有意な相関が報告されていないが、今後の観測に注目が集まっている。

2 エネルギースペクトル

図 1 は、宇宙線発見から 100 年の間に測定された宇宙線のエネルギースペクトルである。10 桁を越える幅広いエネルギー領域で宇宙線が観測されており、この中で 10²⁰ eV を越える宇宙線は極高エネルギー宇宙線と呼ばれている。その運動エネルギーは、現在の人類最大の加速器で到達可能な、実験室系のエネルギーよりも 3 桁も大きく、この巨視的なエネルギーを持つ宇宙線が、どこで加速されどのように地球へ到来するのかは明らかになっていない。また、現在までに測定されたフラックスはエネルギーのべき乗にしたがって減少するため、この極高エネルギー宇宙線の到来頻度は 100 km² あたり年間 1 粒子と極端に少なく、観測には広大な有効検出面積をもつ検出器と長期的な安定観測が不可欠である。

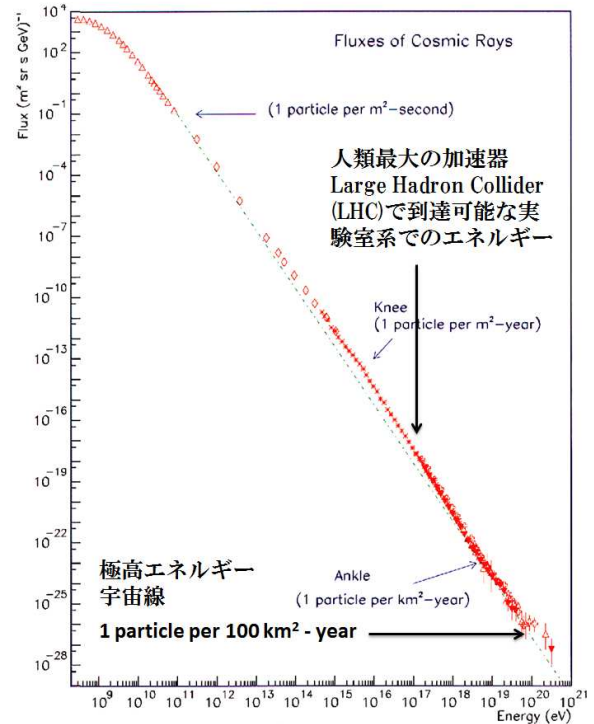


図 1 宇宙線のエネルギースペクトル。

3 極高エネルギー宇宙線による天文学

宇宙線の大部分の組成は電荷を持った陽子であるため、ガンマ線や中性子といった中性粒子とは異なり銀河磁場によって曲げられてしまう。しかし極高エネルギー宇宙線になると、その巨視的な運動エネルギーのために磁場によってほとんど曲げられずに宇宙空間を伝播するメリットを持つ。図 2 は、陽子宇宙線による銀河間空間での伝播をシミュレートしたものである。エネルギーが低い宇宙線は磁場によって曲げられてしまうが、10²⁰ eV の極高エネルギー宇宙線は、ほとんど曲げられずに伝播することがわかる。そのため、天体起源加速だった場合は既知の天体との極高エネルギー宇宙線との相関が期待され、宇宙線を使った天文学が可能となる。

4 空気シャワー事象、観測手法

大気中に入射した極高エネルギー宇宙線は、地球大気との相互作用によって大量の 2 次粒子群 (空気シャ

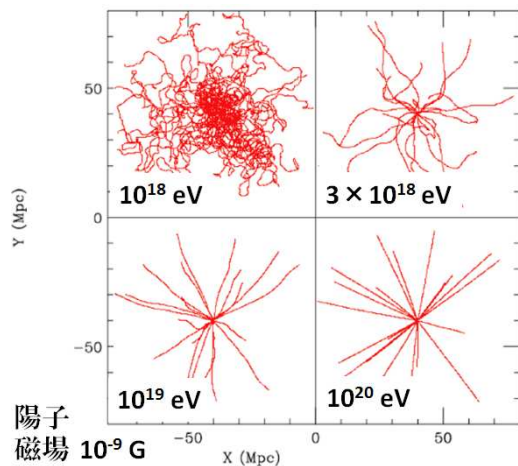


図 2 銀河間空間中の陽子宇宙線の伝播. エネルギーが高くなるにつれて, 銀河間空間を直進することがわかる.

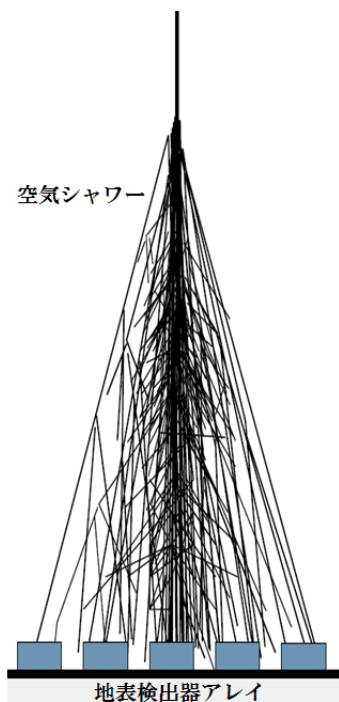


図 3 空気シャワーの観測手法のイメージ図. 地表に等間隔で並べられた地表粒子検出器アレイによって, 到来する空気シャワー粒子を 24 時間定常観測する.

ワー粒子) を生成し, 図 4 にあるように一定範囲に広がった粒子群となって地表に到達する. この空気シャワー粒子を一定間隔ごとに地表に並べられた地表粒子検出器アレイによって検出する.(図 4) この手法では 24 時間定常的に到来する宇宙線を観測できることに加え, さらには広大な有効検出面積を達成できる. 地表粒子検出器アレイによって測定された検出器ごとの空気シャワー粒子の到来時間差と入射した粒子数密度から宇宙線の到来方向, およびエネルギーを決定する.

5 Telescope Array 実験による最新結果

Telescope Array (TA) 実験は, 米国ユタ州で稼働中の北半球最大の宇宙線観測装置である. 有効検出面積 700 km^2 を誇り, 2008 年から定常観測を続けている. その TA 実験で観測された $5.7 \times 10^{19} \text{ eV}$ 以上の極高エネルギー宇宙線の到来方向と近傍の活動銀河核 (AGN) の方向を図 4 の上図に示す [4]. 観測された 25 事象の極高エネルギー宇宙線のうち, 近傍の AGN と 11 事象の宇宙線の到来方向が 3.1° 以内で相関している. 図 4 の下図には, 観測された極高エネルギー宇宙線の AGN と相関を持つ数と総数の関係を示す [4]. この値は, 2007 年に Auger 実験によって報告された近傍 AGN と極高エネルギー宇宙線の到来方向との有意な相関 [5] よりも小さい値を持つ. だが, TA 実験では観測された極高エネルギー宇宙線と到来方向のうち近傍 AGN と 3.1° 以内で相関を持つ割合は 44% である. この 44% の相関が等方的な分布から偶然観測される確率は 2% と, 有意ではないが小さい値となっている.

6 Pierre Auger 実験による最新結果

Pierre Auger (Auger) 実験は, アルゼンチンで稼働中の世界最大の 3000 km^2 の有効検出面積を持つ宇宙線観測実験である. Auger 実験は 2004 年から稼働しており, 2007 年には近傍 AGN との有意な相関が報告されたが, 統計量が増えるにつれ有意度は減少し, 近年報告された結果では, 観測された 55 事象の $5.5 \times 10^{19} \text{ eV}$ 以上の極高エネルギー宇宙線のうち 21 事象が近傍の AGN と 3.1° 以内で相関を持つ結果

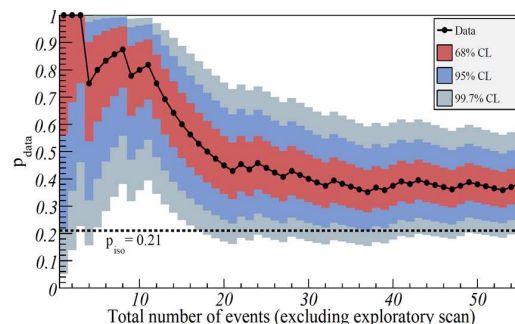
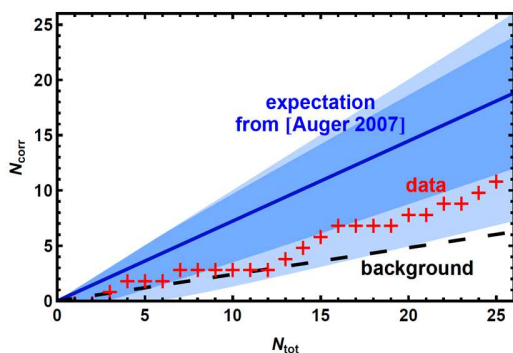
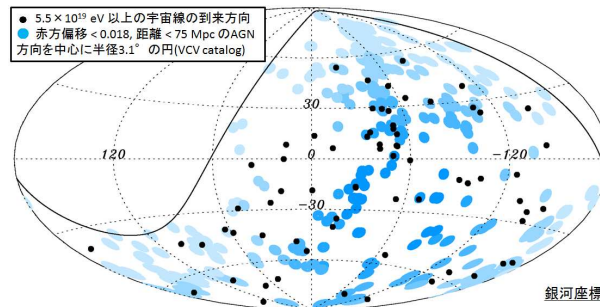
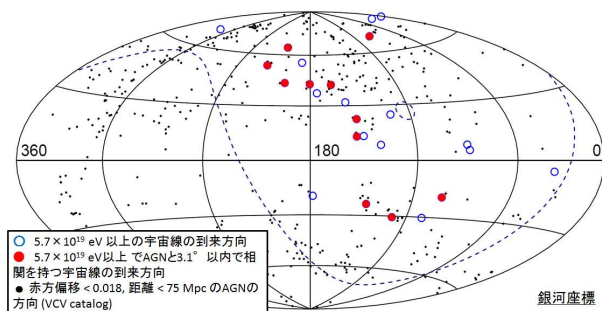


図4 Telescope Array 実験によって観測された極高エネルギー宇宙線の到来方向と近傍 AGN の方向との全天マップ (上図) と、観測された極高エネルギー宇宙線に対して近傍 AGN と相関を持つ宇宙線の割合 (下図)[4].

図5 Pierre Auger 実験によって観測された極高エネルギー宇宙線の到来方向と近傍 AGN の方向との全天マップ (上図) と、観測された極高エネルギー宇宙線のうち近傍 AGN と相関を持つ割合と宇宙線事象数の総数の推移 (下図)[5].

となっている。図5の上図は観測された宇宙線の方向と近傍 AGN の方向の全天マップであり、図5の下図には観測された極高エネルギー宇宙線のうち、相関を持つ割合と宇宙線事象数の総数の推移を示す [5]。等方的な分布から 38% の宇宙線が近傍 AGN と 3.1° 以内で相関を持つ偶然確率は 0.3% であり、この値も TA 実験と同じで有意ではないが小さい値を示している。また、近傍の電波銀河である Centaurus A (銀経 310° , 銀緯 19°) 付近は有意ではないが宇宙線が集まっているように見える。

7 まとめと今後

宇宙線発見から 100 年の間に宇宙線の有効検出面積が飛躍的に向上し、到来頻度が少ない極高エネルギー宇宙線を数多く観測できるようになった。その結果、北半球の TA 実験と南半球の Auger 実験によって定常的に極高エネルギー宇宙線が数多く観測され、

天文学的な解析が始まっている。現在のところ両者とも有意な点源は見つかっていないが、近傍 AGN との相関を調べると、等方的な分布から期待される相関よりはどちらも大きな値を持つがどちらもそれほど有意ではない。ただ、南北両方に感度を持つ方向である銀経 36° , 銀緯 -4° の方向から観測された極高エネルギー宇宙線は TA 実験と Auger 実験の到来方向の違いがわずかに 1.7° であり、なおかつエネルギーはどちらも 10^{20} eV を超えている。しかし、銀河円盤近傍のために銀河系外の天体を観測することは不可能であり、銀河系外にどのような天体があるのかは調べることができない。宇宙線発見から 100 年、ついに起源解明まであと一步のところ到我々はいるのかも知らない。

謝辞

第 42 回天文・天体物理若手夏の学校を開催するにあたり、補助金をご支援くださった宇宙線研究者

会議 (CRC) に深く感謝致します。さらには、夏の学校の準備、管理、運営に携わった事務局スタッフをはじめとする全ての人たちに感謝致します。また、本研究を行うにあたって多くのご支援とご指導いただいた Telescope Array 実験の共同研究者たちに感謝致します。

参考文献

- [1] J. Blumer et al., *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **63** (2009) 293
- [2] シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III ー高エネルギー天文学
- [3] Telescope Array Experiment, <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>, *The Telescope Array Project Design Report* (2000)
- [4] The Telescope Array Collaboration, arXiv 1205.5984v1, submitting to *Astrophysical Journal*
- [5] The Pierre Auger Collaboration, *Astroparticle Physics*, **34** (2010) 314
The Pierre Auger Collaboration, *Science*, **304** (2007) 938