

宇宙を飛び交う超高エネルギー（デカジュール）宇宙線

手嶋政廣

〈東京大学宇宙線研究所／明野観測所 〒 277-8582千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: mteshima@icrr.u-tokyo.ac.jp

宇宙には超高エネルギーの宇宙線が飛び交っている。その中には 10^{20} 電子ボルト（16 ジュール）を超えるエネルギーをもつ宇宙線も存在する。東京大学宇宙線研究所明野観測所の AGASA による観測で理論的境界であるグライセン限界を超えるエネルギーをもつ宇宙線の存在が、最近明らかになった。従来、2.7 K 宇宙背景輻射との衝突によるエネルギー損失の帰結として得られるグライセン限界（ 6×10^{19} 電子ボルト～10 ジュール）が宇宙線のエネルギーの終端であると理論的に考えられてきたが、AGASA の結果はこの予測を裏切るもので、まだまだ先にエネルギーが伸びていることを示している。本稿では、まず超高エネルギーデカジュール（= 10 ジュール）宇宙線のいくつかの重要な特性について述べ、そして AGASA の実験結果について述べ、最後にデカジュール宇宙線の謎を解き明かそうとする将来計画について述べる。

驚くべきことは、50 ジュールを超えるマクロなエネルギーをもった素粒子が宇宙を飛び回っていることである。これらの宇宙線はその運動量のためたとえ電荷をもっていない、磁場では曲げられないはずであるのに、その飛来方向に宇宙線源の候補となるような天体が確認されていない。さらに、そのエネルギーは、素粒子理論でいうところの大統一理論のエネルギースケールからわずか 3 桁下がったところに位置しており、その起源をめぐる宇宙初期に生成された超重粒子の崩壊、超高エネルギー領域における相対性理論の破れ等もまじめに議論されている。

0. 宇宙を飛び交う宇宙線

宇宙線と言っても、そのエネルギー分布は 10 桁を超えて存在している。それらの多くは電荷をもち高速で飛び交う陽子、原子核、電子等である。比較的エネルギーの低い宇宙線の多くは銀河内の超新星残骸で衝撃波により加速されたものであると考えられる。理論的にも 10^{14} 電子ボルトまでは超新星残骸の衝撃波で加速可能であり、バルーン、人工衛星等により測定された化学組成も超新星残骸起源を支持する。宇宙線のエネルギースペクトルは複数のべき関数であらわされる。このべき関数は衝撃波加速などの統計的な加速から自然に導かれる。図 1 に示されるように^{1), 2)}、宇宙

線のエネルギースペクトルは人間の足になぞらえ、Knee（ひざ）、Ankle（足首）とよばれる構造もっている。Knee より低いエネルギー領域は前に述べたように超新星残骸が起源であると考えられている。また、スペクトルがフラットになる Ankle（足首）より先は銀河系外成分と考えられている。

我々の銀河内には、銀河アームに沿うように走っている 2～3 マイクロガウス程度の磁場とランダムな数マイクロガウスの磁場が存在する。これらの磁場に巻きつくように宇宙線は運動する。また、銀河磁場のスケールハイトは 2-3 kpc であり、銀河内の物質スケールハイトと比べて厚い。この磁場により銀河宇宙線は閉じ込められ、エネルギーに依存した滞在時間を持ち、銀河外へ漏れ出してい

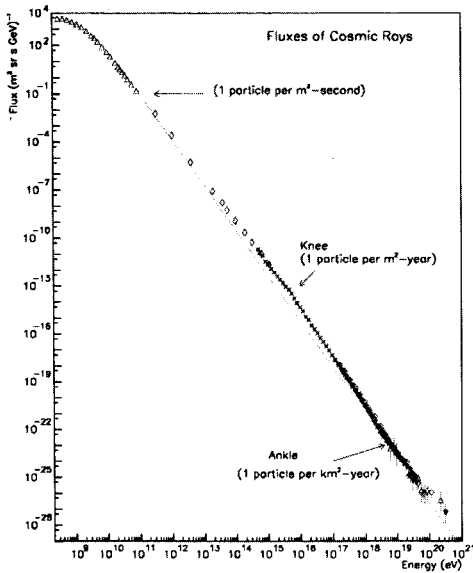


図1 宇宙線のエネルギースペクトル^{1), 2)}. 宇宙線はエネルギースケール 10 桁を超えて存在している。スペクトルは基本的にべき関数で示されるが、特徴的な二つの折れ曲がりが存在し、それぞれひざ (knee $\sim 10^{16}$ eV)、足首 (ankle $\sim 10^{19}$ eV) とよばれている。

くと考えられている。よって、我々が太陽系近傍でみる宇宙線のエネルギースペクトルは宇宙線の生成エネルギースペクトルとその滞在時間を掛け合わせた量を反映することになり、源での生成スペクトルとは異なる。例えば、Knee (ひざ) でのエネルギースペクトルの折れ曲がり、銀河磁場による閉じ込めの効果が効きにくくなる臨界エネルギーであり、宇宙線の銀河からの漏れ出しが急速にすすんでいることを反映している (銀河内での滞在時間が短くなる) として明快に説明ができる。また、Ankle (足首) の部分は銀河系外の成分 (これは源でのエネルギー分布を反映する) が見え出し、スペクトルがフラットになることで説明できる。

本稿では宇宙線の中でもこの足首より先の部分、すなわち超高エネルギーデカジュール宇宙線についてもつづら話をを行う。

1. 超高エネルギー (デカジュール) 宇宙線

1.1 宇宙背景輻射との衝突 (光パイオン生成)

1 ジュールを超える宇宙線はその到来方向が等方的であること、また前に述べたようにスペクトルのべきが緩やかになっていることから銀河系外が起源であると考えられている。また、フライズアイによる化学組成の研究³⁾では軽い元素 (たぶん陽子) が主成分であるとする結果が得られているが、銀河系外成分であることを強く支持している。宇宙線のエネルギーがグライセン限界、10 ジュールを超えると、宇宙を満たす 2.7 K 宇宙背景輻射との衝突によりパイオンを作ることにより、激しくエネルギーを失う。このため、エネルギー損失による宇宙線の平均自由行程は 20 ~ 30 Mpc となり、揺らぎを考へても 100 Mpc (3 億光年) を超えて飛来することはできない^{4), 5), 6)}。すなわち、源までの距離に強い制限がつく。この議論は、宇宙背景輻射が宇宙を満たしていること、ローレンツ因子 10^{11} の領域で相対性理論が成り立っていることに立脚している。逆に述べると 100 Mpc 以内に源がなければ、相対性理論が超高エネルギー領域で成り立たない可能性も考えられる^{7), 8)}。

1.2 直進する宇宙線

一般に電荷を持つ宇宙線は磁場によって曲げられるが、エネルギーが高くなると事情が異なってくる。超高エネルギー宇宙線の銀河内での伝播シミュレーションを図 2 に示す⁹⁾。我々の銀河を上から見た図である。これは反陽子を地球から打ち出すことにより、地球に入射する陽子をシミュレートしている。 10^{20} 電子ボルト (16 ジュール) になると、銀河面内を走る宇宙線ですらほとんど曲げられることがないのがわかる。定量的な計算では銀河内では平均的に 0.2-0.3 度曲げられる。また、銀河

系外では磁場の強度には大きな不定性があるものの、1 nG 強度の磁場を仮定した場合に、上で述べた 30 Mpc-100 Mpc の伝播でも 2 ~ 4 度程度しか曲げられない。すなわち、デカジュール宇宙線はその寿命の間は数度の曲がりはあるものの、ほとんど直進するということになる。

ただし、このわずかの曲がり、伝播時間にすれば直進する光と比べるとおよそ 1000 年ほど遅れて到達することになる。たとえば、ガンマ線バーストが超高エネルギー宇宙線の起源であるとすると、今我々が見ているのは平安時代に地球で観測されたであろうガンマ線バースト (GRB) から放出されたデカジュール超高エネルギー粒子を見ていることになる。

1.3 未知の加速源候補

このような宇宙線は宇宙のどこかで高エネルギーへと加速されているはずである。いったいどのような天体で 10^{20} 電子ボルトを超える宇宙線を加速できるのであろうか？ 既知の天体による粒子加速について考えてみる。ショック加速であれ、パルサー等でのワン・ショット加速にせよ、加速領域のサイズは、加速領域の磁場強度と宇宙線の運動量から決まるラーモア半径より大きくなくてはならない。この条件を図示すると図3のようになる^{2), 10)}。 10^{20} 電子ボルトまで加速できる天体は右下がりの直線の右上側に位置する。AGN (活動銀河中心核) および GRB が有力な天体である。中性子星は磁場の強度が強すぎて、シンクロトロン放射によるエネルギー損失が加速を凌駕している。また銀河団、電波銀河等での加速では、システムが大きくなるため、上で述べた光パイオン生成が無視できないエネルギー損失となる。加速時間が3億年以下でなければならない。よって、適度な磁場強度、大きさを持つガンマ線バースト (GRB)^{11), 12)}、活動銀河中心核 (AGN)¹³⁾ が最も有力な天体といえる。

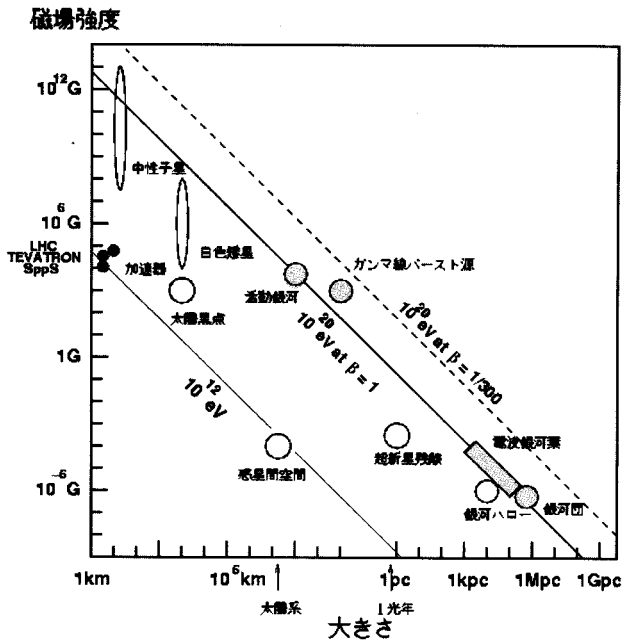


図3 宇宙線源候補^{2), 10)}。既知の天体 (人工加速器も含む) をその大きさと磁場強度の面内で示している。右上にある天体ほど最大加速エネルギーを高くできる可能性がある。例えば、右下に下がる斜めの線は 10^{12} 電子ボルト、 10^{20} 電子ボルトまで可能な天体の領域を示している。この線の右上の領域が許される範囲である。この許容領域は、天体サイズが荷電粒子の磁場中でのラーモア半径の2倍よりも大きくないといけないという必要条件を示している。

以上、超高エネルギー宇宙線の特徴を述べたが、上のことから我々が期待できるのは、宇宙線のエネルギースペクトルにグライセン限界に伴う折れ曲がりが見えること、そして、グライセン限界を超える宇宙線が存在しても、それは近傍 100 Mpc 以内の天体からの寄与であり、それらの到来方向は宇宙線の源から角度で数度以上離れることはないことである。

2. 空気シャワー観測装置 AGASA ができるまで^{14), 15)}

1980 年頃、明野観測所に 1 平方キロアレイが完成し、次の計画として宇宙線のエネルギー終端 (グライセン限界) を研究するための巨大空気シャ



ワーアレイを作ろうとする気運が盛り上がり、議論が活発に行われていた。わたしはこのころ京都大学の大学院生でありながら、宇宙線研究所の空気シャワー部に机をおかせてもらい、明野観測所での研究に参加をはじめたころであった。故菅浩一先生、東大名誉教授永野元彦先生を囲み月例で空気シャワー談話会を開き、関東近郊にいる研究者が集まりその計画内容を深めていった。

この議論の中で、当時はまだそれほど普及していなかったマイクロプロセッサ技術、光ファイバー技術を使えば、スケラブルな（拡張性の高い）空気シャワーアレイを作ることが可能であるという結論にいたった。それまでの空気シャワーアレイでは、アナログ信号を同軸ケーブルで運び、中央の観測棟でデータを記録するという方式がとられており、同軸ケーブルで信号を伝送できる距離（～1 km 程度）で空気シャワーアレイの大きさが制限を受けていた。また、雷や地電位により検出器、記録システムの故障がつきものであった。

我々はマイクロプロセッサと光ファイバーを採用し、検出器のすぐ側（フロントエンド）でデータをデジタル化し、光ファイバーによるネットワークで中央にデータを転送する。また、システム全体の同期をとるために、中央から同期信号を送り出し1億分の1秒の精度でフロントエンドシステムの時計を同期することにした。検出器に入射する信号の時間差から到来方向を決定するため、システムの同期は必要であり、従来の遠距離を同軸ケーブルでアナログ信号を運ぶ空気シャワーアレイと比べ格段によい到来方向決定精度を得ることが可能となった。また、雷などの被害からは無縁のシステムが構築できた。現在ではこのような技術は平凡であるが、光ファイバーケーブルが市場に現われたばかりで、8ビットマイクロプロセッサしかなかった当時としては、革新的な技術導入であったといえる。観測を開始して10年たつ現在も全くトラブル無く脈々とデータを排出しているAGASAは、このようにフィールドで使われている他の観測

装置と比べ、驚くべき安定性を示している。

2.1 空気シャワー現象とAGASA

図4に計算機シミュレーションにより生成された空気シャワーを示す。これは 10^{18} eVの宇宙線陽子が大気で起こす巨大空気シャワーを示している。ひとつの超高エネルギー宇宙線が大気中で大気原子核と衝突し巨大な空気シャワー現象を引き起こす。地上に検出器の網を設置すれば、この空気シャワーからの二次粒子を捕らえることができる。エネルギーの高い宇宙線は頻度が少なく直接つかまえることは不可能である。大気というターゲットを使い、宇宙線を多数の二次粒子に分解し、これらを地上の検出器アレイ（検出器の網）で捕らえるのが有効である。このような装置を空気シャワーアレイと呼ぶ。

図5にAGASAの検出器配置図を示す。111台の検出器が1 km 間隔でおよそ100平方キロの領域に設置されている。それぞれの検出器は2.2平方メートルのシンチレーション検出器とミュオン検出器からなる。これら検出器からの信号は即座にデジタル化され、光ファイバーケーブルを通して、明野観測所中央までデータが運ばれてくる。空気シャワー中の二次粒子の粒子密度分布から大気中に飛び込んだ宇宙線のエネルギーが推定される。例えばAGASAではシャワー中心から600 mのところでの粒子数密度を使いエネルギーを推定しているが、そのエネルギー推定の誤差は25%–30%と宇宙線のエネルギー測定としては驚くほど小さい。これはイギリスの物理学者Hillasの提案した方法である。

宇宙線の到来方向はどのようにして決めるのであろう。親の宇宙線から作られた二次粒子は大気原子核と相互作用を繰り返しながら、粒子群として光速度で地上まで到達する。実はこれらの粒子は1枚のパンケーキ状平面の中に含まれている。この二次粒子パンケーキが検出器に次々と信号を落としてゆく。この過程は光の速度で進むが、宇

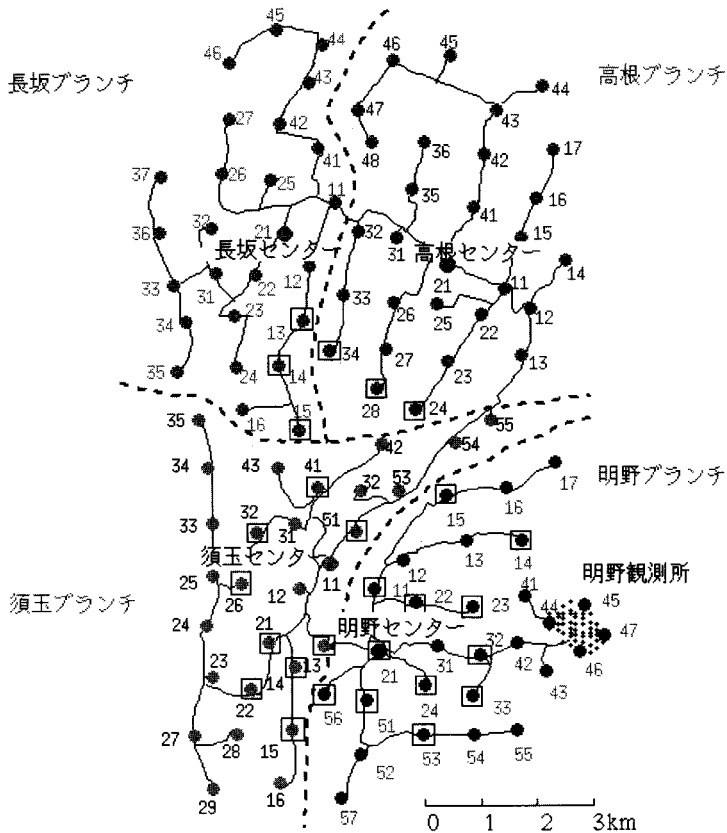


図5 世界最大の空気シャワーアレイ AGASA^{14), 15)}. 100 平方キロの領域に 111 台の検出器を設置しそれらの間を総延長 200 km の光ファイバケーブルでつないでいる。各検出器にはインテリジェントなフロントエンドが実装されており、デジタル化されたデータが光ファイバを通して中央の明野観測所まで送られてくる。

宇宙線の侵入角度によって、それぞれの検出器に記録される信号の時間が変わってくる。この時間差間隔から宇宙線の到来方向を決定する。方向の決定精度は 1° である。

3. 観測結果

3.1 グライセン限界を超える宇宙線の発見

およそ 10 年間にわたる AGASA による観測により得られたエネルギー分布を図 6 (=表紙) に示

す^{16), 17)}。図中に示される曲線は宇宙に一様に源が存在するとして期待されるエネルギー分布である。 10^{20} 電子ボルトあたりから急速にスペクトルが折れ曲がり頻度が減少する。これが上で説明したグライセン限界であり、宇宙線が伝播中に宇宙背景輻射と衝突し、光パイオン生成でエネルギーを激しく損失し始めるからである。しかし、AGASA により観測されたエネルギー分布は明らかにこの予測を破っている。 10^{20} 電子ボルトを超える宇宙線の数は期待値 ~ 1 に対して 8 ヶ観測されている。これは非常に単純で大きな矛盾である。このグライセン限界を超える宇宙線の存在は重要な物理と結びついているかもしれない。これらの宇宙線のエネルギーが、素粒子論でいうところの大統一理論のエネルギースケールまで数桁で迫っていることから、最近では、宇宙初期に生成された位相欠陥 (モノポール, コズミックストリング) の崩壊^{18), 19), 20), 21), 22), 23)} や、我々の銀河ハローに存在するかもしれない超重粒子

子^{24), 25), 26), 27)} 等の、様々なエキゾチックなモデルが真面目に議論されている。

3.2 デカジュール宇宙線の起源

図 7 (=表紙) に超高エネルギー宇宙線の到来方向分布を示す。グライセン限界を超える宇宙線の到来方向を示している^{16), 28)}。これら宇宙線の源までの距離は遠くないと考えられる。 10^{20} 電子ボルトを超えるものは赤い四角で示されている。銀河内、銀河系外での磁場による宇宙線の軌道の曲

がりは2-3度程度であり、その到来方向に宇宙線の源が同定されるはずである。しかし、 10^{20} 電子ボルトを超える宇宙線の到来方向と天体は現在のところ同定されていない。また、これら超高エネルギー宇宙線のグローバルな到来方向分布は統計の範囲内で等方的であるといえる。しかし、角度分解能の範囲内で同一方向から到来していると思える複数のイベントが存在する。3つのイベントが重なっている領域が1箇所、2つのイベントが重なっている領域が6箇所存在する。全イベント数は58イベントで2つのイベントの重なりが2-3ヶ所程度で起こるのは統計的に十分ありえるが、上のようなクラスターは0.1%以下の確率でしか起こらない。点源の存在を強く示唆している。これらの到来方向を調べると唯一3イベントが重なっている方向80 Mpc先にVV141というInteracting Galaxyが存在しており、これが源のひとつかもしれない。

3.3 10^{18} 電子ボルト宇宙線の銀河内起源の証拠

図8 (=表紙)には、 10^{18} - $10^{18.5}$ 電子ボルトの宇宙線到来方向分布を赤道座標で示す²⁹⁾。実線が銀河面を示している。AGASAは北半球にあるので、銀河中心方向を直接見ることはできない。しかし、銀河中心に近い領域、銀河アーム方向(赤経20時、赤緯40度方向)に統計的に有意なイベント数の増加が見られる。また、銀河外向きに向かってイベント数の有意な減少が見られる。これは、銀河中心-反銀河中心方向への双極的な宇宙線の流れと銀河アーム方向からの二次的な流れの足し合わせで近似できる。これらは4-10%のフラックスの増減であるが、銀河内起源の宇宙線陽子を仮定した場合にシミュレーションにより期待される異方性の強度は10%であり、このエネルギー領域で銀河内起源の宇宙線陽子が主成分であると考えられる。また、装置のシステムティックによる影響は1%以下である。これは、銀河内宇宙線が 10^{18} 電子ボルトまで延びていることを明快に示す初めての

実験結果である。

これらの実験結果は、より統計精度の高い実験、より高精度の実験を希求させる。特にグライセン限界を超える宇宙線の存在の発見は、大きなインパクトを世界中の研究者に与え、日本の宇宙線望遠鏡計画、国際共同実験であるピエール・オージェ計画、宇宙から大気を見下ろし広大な検出面積を得ようとするEUSO計画、OWL計画が立案され、予備実験、一部においては建設が開始されている。

4. 宇宙線望遠鏡計画および他の計画

4.1 宇宙線望遠鏡計画²⁾

デカジュール宇宙線の起源を明らかにするには、ただ単に観測数を増やすだけでなく測定の精度を向上する必要がある。具体的には、宇宙線望遠鏡計画ではAGASAの100倍の検出効率、より高いエネルギー分解能(6%)、角度分解能(0.6度)を目指すものである。また、宇宙線の親粒子が陽子であるかガンマ線であるかを確実に区別することが、次世代の検出器には重要なことであり、宇宙線望遠鏡計画では可能である。図9にイメージ図をしめすが、このようなステーションを米国ユタ州の砂漠に30-40 km間隔で10ヶ所設置することを予定している。検出総面積は $60,000 \text{ km}^2 \text{ sr}$ となり、日本全土の1/6の面積を覆う巨大な検出器となる。各ステーションは40台の口径3 mの反射望遠鏡からなる。各望遠鏡の焦点面には256 chの光電子増倍管からなるカメラが設置されている。このようなステーション1台により周囲50-60 km以遠まで検出エリアになる。当然デカジュール宇宙線が検出エリアに入射すると複数ステーションに信号が記録される。複数のステーションで同一の空気シャワーイメージを測定することによりステレオ観測を行い、立体的に空気シャワーを再構成する。この方法により、より高精度の到来方向の決定、化学組成の研究が可能となる。

特にデカジュール宇宙線の起源を決定する上で、

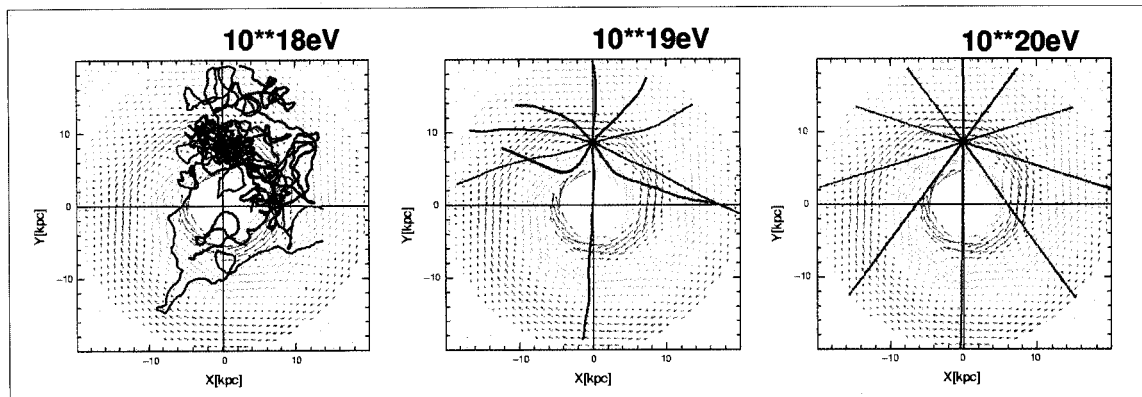


図2 銀河内での超高エネルギー宇宙線の伝播の様子⁹⁾。エネルギーとともに磁場の影響は小さくなり 10^{20} 電子ボルトでは曲がりはほとんど無視できる様子がわかる。銀河系外磁場も含めて考えて、30-100 Mpc の伝播距離では曲がりの効果は数度以内である。

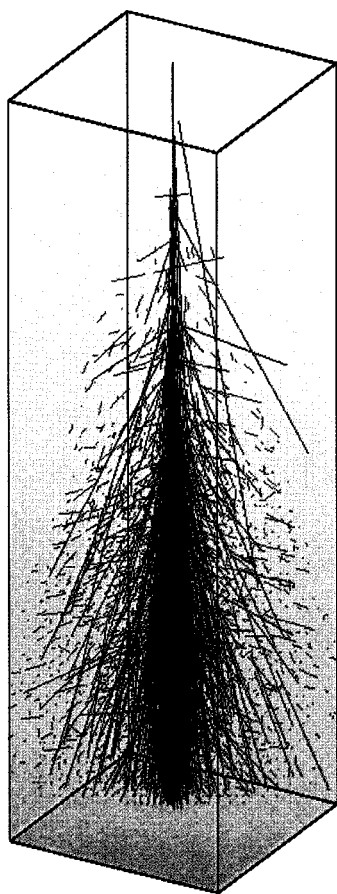


図4 計算機シミュレーションにより生成された空気シャワー。親のエネルギーは 10^{18} 電子ボルト。四角柱は縦 25 km、横 6 km の大気に対応している。地上での二次粒子の数は 10 億個にもなる。デカジュール宇宙線の場合、1000 億個程度の二次粒子を作り出す。

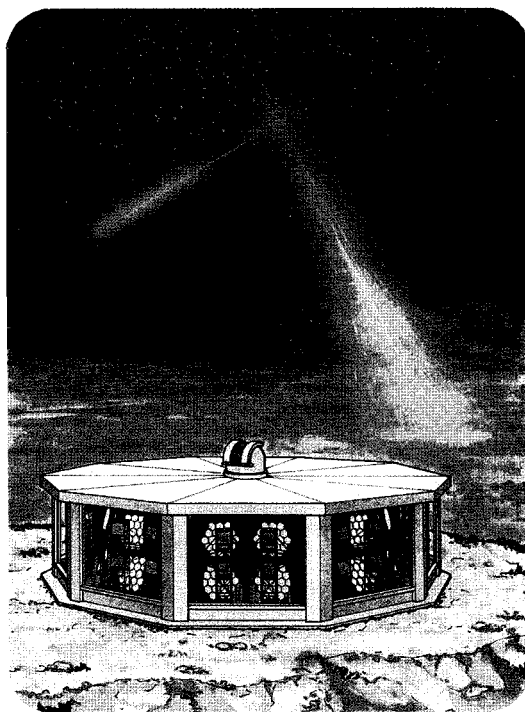
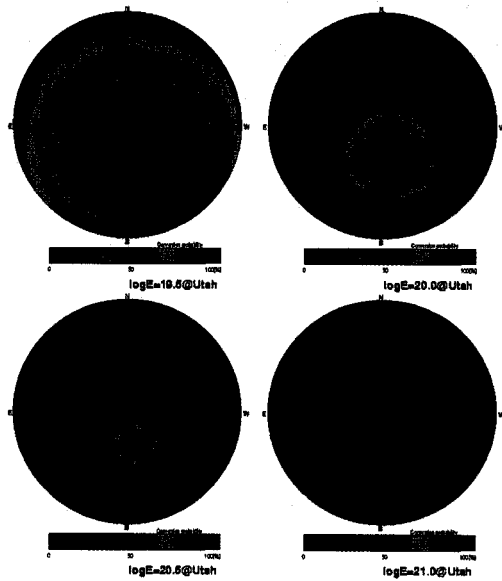
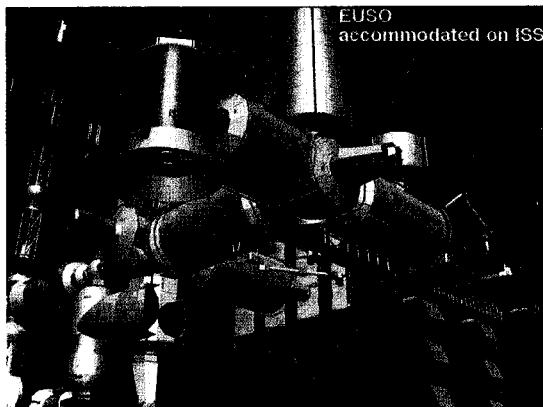
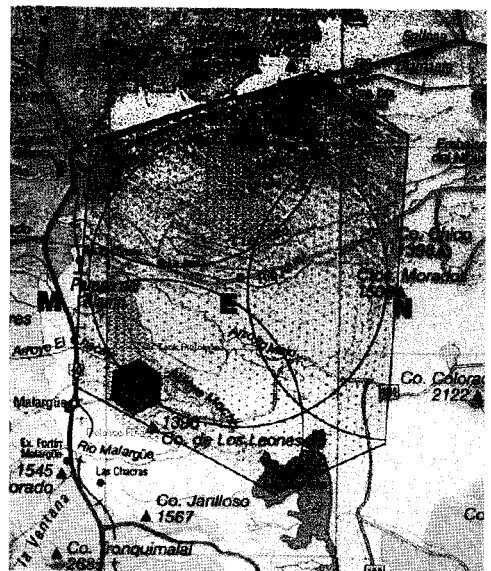


図9 宇宙線望遠鏡ステーションのイメージ図²⁾。宇宙線望遠鏡システムは 30-40 km 間隔で設置されたこのようなステーション 10 ヶからなる。それぞれのステーションは口径 3 m の反射望遠鏡 40 台からなり、方位 360 度、仰角 3-34 度を覆う視野をもつ。周囲 50-60 km に入射する超高エネルギー宇宙線空気シャワーから発光される微弱な蛍光を測定する。有効検出面積は $60,000 \text{ km}^2 \text{ sr}$ となり日本の国土の $1/6$ に匹敵する大きさをもつ。



← 図 10 超高エネルギーガンマ線と地球磁場による電子対生成の発生確率（井上，篠崎，Vankof による計算）²⁾。4つのエネルギーレンジでの計算結果を示している。ユタでの地平座標で計算がなされており，円の中心は天頂方向，天頂角 30 度，60 度，90 度の円が描かれている。上が北，左が東である。エネルギーとともに相互作用確率が上がっていくのと，南北の非対称性が現われることがわかる。電子対生成で発生した電子対は地球磁場中でのシンクロトン過程により大量の超高エネルギーガンマ線を放射する。親のガンマ線エネルギーの $1/1000 \sim 1/100$ のエネルギーをもつ二次ガンマ線が 100-1000 ヶ生成される。これらの過程は地球の磁気圏のスケール（～高度 6000 km）でおこり，大気に入射する前に既に多数の二次粒子に壊れていることになり，発生することになる。このような空気シャワーは宇宙線望遠鏡で十分識別可能となる。

図 11 ビエール・オージェ計画¹⁾。宇宙線望遠鏡とはほぼ同規模の計画。Auger アレイの検出器配置図。下は最初に設置された 10 平方メートルの水チェレンコフ検出器。→



↑ 図 12 スペースステーションに取り付けられた EUSO 検出器の想像図³⁾。ESA コロンブスモジュールの先に取り付けられる予定。60 度の視野角をもつ広視野望遠鏡により地球大気を眺め，大気中での超高エネルギー宇宙線による空気シャワーを蛍光で測定する。 10^{20} 電子ボルト宇宙線に対して直径 500 km の円内を検出エリアとする。その巨大なターゲットボリュームにより，超高エネルギーニュートリノの検出が期待される。



その親粒子がガンマ線であるのか陽子であるのかを特定することが非常に重要である。超重粒子等の崩壊などのトップダウンモデルでは主成分がガンマ線であると考えられる。一方、ボトムアップモデルの場合は陽子が主成分であることが期待される。テカジュール宇宙線のうちガンマ線の含有量を決定することは、トップダウンモデルとボトムアップモデルとを識別する上で非常に有用である。また、トップダウンモデルでは、ガンマ線と同様、大量のニュートリノフラックスが期待される。ニュートリノの反応断面積は小さいので検出は容易ではないが、ニュートリノイベントの検出も、テカジュール宇宙線の起源を特定できる鍵となる。 10^{20} 電子ボルトのガンマ線は地球の磁気圏に入射すると地磁気と衝突し、電子対生成を起こし電子・陽電子のペアを作る。これらの電子・陽電子は地球磁場中でシンクロトロン放射により 10^{17} - 10^{18} 電子ボルトのガンマ線を100-1000ヶ作る。すなわち、大気に入射する前に、この磁場中でのカスケードによりエネルギーの細分化が進んでいる。このような地磁気によるカスケードは 3×10^{19} 電子ボルトから始まる。図10には、ユタ州における地平座標において電子対生成の確率を示している。ユタでの地平座標では北側から入射するガンマ線がよりこの影響を受けることがわかる。この効果は地平座標で、シャワー発達の南北の差異となって現れる。また、この効果はエネルギーの強い関数であることもわかる。この南北の対称性の破れと、エネルギーに対する変化によりガンマ線の含有量を明確に得ることが可能となる。

4.2 ピエール・オージェ計画¹⁾

この計画はアルゼンチンの広大な平原に水タンク地上検出器1600台をアレイ状に設置し、 3000 km^2 の有効面積を得るものである。CP非保存の研究でノーベル賞を受賞したJ. W. Cronin博士を中心とした国際共同実験であり、現在、プロトタイプシステムである40数台の水チェレンコフ検出器からな

るエンジニアリングアレイを現地に建設中である。検出器は10平方メートルの水チェレンコフ検出器1600台からなる。エネルギーキャリアレーションの目的で大気蛍光もアレイの周辺部に設置され内側を見るようになっており、水チェレンコフ検出器アレイにより観測されたイベントのうち1/10は大気蛍光も同時に観測される。

宇宙線望遠鏡計画は北天を測定するが、オージェ計画は南天を観測する。宇宙線望遠鏡計画は宇宙線の化学組成の測定を得意とし、オージェ計画はグローバルな宇宙線異方性の測定を得意とする。すなわち、相互に相補的なデータを出すことになる。

4.3 EUSO 計画 / OWL 計画³⁰⁾

宇宙線望遠鏡計画・オージェ計画と比べ、大変チャレンジングな計画がEUSO / OWL計画である。これは、衛星軌道に巨大な超広視野望遠鏡を上げ、地球大気を上空から眺め、その中で起こる宇宙線空気シャワー現象を測定するものである。大気上空から眺めることにより、直径500~1000kmの領域を検出エリアにすることができる。望遠鏡口径に依存するが、検出エネルギー閾値は 10^{20} 電子ボルトと高くなるが、宇宙線望遠鏡・オージェ計画と比較して10-100倍の検出効率を得ることができる。その巨大なターゲットボリューム(10^{13} - 10^{14} トン)を利用して超高エネルギーニュートリノの検出が期待される。

5. 最後に

超高エネルギー宇宙線の観測は非常に興味深い局面にさしかかったといえる。グライセン限界の破れをどのように理解すればよいのであろうか？現状では様々な可能性がありえる。我々の銀河ハローに存在するダークマター(超重粒子)の崩壊、ローレンツ不変性の破れ等、大変興味深いシナリオもありえる。また、AGASAデータは強くクラスターの存在を示唆しているが、それらは何を意味しているのであろうか？今はアクティビティーを



失っている AGN なのか, 1000 年も前に起こったガンマ線バーストなのか? 興味はつきない. この文章をまとめるにあたり, AGASA の解析データ及び, 宇宙線望遠鏡計画, Auger 計画, EUSO 計画の資料を利用した. 各研究計画の研究者に深く感謝したい.

- 27) Hamaguchi K., Nomura Y., Yanagida T., 1998, Phys. Rev. D 58, 103503
- 28) Takeda M., et al., 1999, Astrophys. J. 522, 225
- 29) Hayashida N., et al., 1999, Astroparticle Phys. 10, 303
- 30) EUSO proposal is available in <http://www.ifcai.pa.cnr.it/Ifcai/euso.html>
- 31) This EUSO C.G. was made by Takahei T.

参考文献

- 1) Pierre Auger Project Design Report, 1997
- 2) Telescope Array Project Design Report 2000, <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 3) Bird D. B., et al., 1988, Phys. Rev. Lett. 71, 3401
- 4) Greisen K., 1966, Phys. Rev. Lett. 16, 748
- 5) Zatsepin G.T., Kuzmin V.A., 1966, JETP Lett. 4, 178
- 6) Yoshida S., Teshima M., 1993, Prog. Theo. Phys. 89, 833
- 7) Sato F., Tati T., 1972, Prog. Theor. Phys. 47, 1788
Sato F., 1998, in Proc. of 49th Yamada Conference
- 8) Coleman S., Glashow S.L., 1999, Phys. Rev. D 59, 116008
- 9) Takeda M., 1997, Doctor Thesis
- 10) Hillas A.M., 1984, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 22, 425
- 11) Waxman E., 1999, Astro-ph/9911395
- 12) Totani T., 1999, Astropart. Phys. 11, 451
- 13) Blandford R.D., 1999, astro-ph/9906026
- 14) Teshima M., Ohoka H., et al., 1986, Nucl. Instr. & Meth. A247, 399
- 15) Ohoka H., Takeda M., et al., 1997, Nucl. Instr. & Meth. A385, 268
- 16) Hayashida N., et al., 2000, astro-ph/0008102
- 17) Takeda M., et al., 1998, Phys. Rev. Lett. 81, 1163
- 18) Hill C.T., 1983, Nucl. Phys. B 224 469
- 19) Bhattacharjee P., Hill C.T., Schramm D.N., 1992, Phys. Rev. Lett., 69, 567
- 20) Sigl G., Schramm D.N., Bhattacharjee P., 1994, Astropart. Phys., 2, 401
- 21) Sigl G., Schramm D.N., Bhattacharjee P., 1995, Science, 270, 1977
- 22) Sigl G., Lee S., Schramm D.N., Coppi P.S., 1997, Phys. Lett. B 392, 129
- 23) Sigl G., Lee S., Bhattacharjee P., Yoshida S., 1999, Phys. Rev. D 59, 043504
- 24) Berezhinsky V., Kachelriess M., Vilenkin A., 1997, Phys. Rev. Lett. 79, 4302
- 25) Kuzmin V., Tkachev I., 1999, Phys. Rev. D, 59, 123006
- 26) Chung D.J.H., Kolb E.W., Riotto A., 1998, Phys. Rev. Lett. 81, 4048

Ultra High Energy Cosmic Rays in the Universe

Masahiro TESHIMA

*Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo
Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa-shi, Chiba 277-8582, Japan*

Abstract: Ultra High Energy Cosmic Rays are traveling the Universe. Most of them are high-energy protons, nuclei or electrons. Among them, the cosmic rays with energies exceeding 10^{20} eV exist. Recently, the clear evidence of cosmic rays beyond the theoretical energy limit of Greisen cut off (6×10^{19} eV \sim 10 joules = Deca-Joule) was obtained by AGASA experiment in Japan. So far, this Greisen cut off has been considered as the high energy end of cosmic ray energy spectrum, however, the AGASA experiment shows the result clearly contradict with this theory and suggests the extension of energy spectrum further higher energy region. In this paper, we will discuss about important features of deca-joule energy cosmic rays, results from AGASA experiment and then, future projects, which will clarify the origin of deca-joule cosmic rays.

The surprising fact is that cosmic rays with energies greater than 50 joules are traveling the universe. These charged particles should travel linearly even in the magnetic field fulfilled in the universe due to their ultra-high momenta, however, we can not identify any astronomical objects in their arrival directions. Furthermore, the energy of these cosmic rays is very close to the energy scale of Grand Unification Theory of elementary particles. Therefore, not only astronomical origin, but also the exotic scenarios such as a decay of super heavy relics in our Dark Halo and the break of Lorentz invariance are seriously discussed recently.