

超強磁場の星と極限エネルギー宇宙線

寺澤敏夫

東京工業大学大学院理工学研究科教授

宇宙には地磁気の 10^{16} 倍（1京=1兆の1万倍）もの超強磁場をもつ中性子星が存在する。それらはまた、 10^{20} eVという極限エネルギーをもった宇宙線の源である可能性があり、実験と観測による検証に期待がかけられている。

超強磁場中性子星の巨大フレア

「宇宙の果て」というと、時空の極限、すなわち宇宙創成の百数十億年前のかなたが念頭に浮かぶのが一般的だろう。本稿では別の「宇宙の果て」、すなわち、強磁場の極限と単独の粒子のもつエネルギーの極限を追求してみたい。

天体における強磁場の極限は、長らく電波パルサーとして知られる中性子星のもつ 10^8 テスラ程度とされていた。ところが最近、それより3桁ほど大きい 10^{11} テスラのオーダーの磁場をもつ超強磁場中性子星「マグネター」の存在がクローズアップされ、話題を呼んでいる。それは、このマグネターのもつ磁場エネルギーが突発的に解放される「巨大フレア」と呼ばれる爆発現象が発見されたことに始まる。

巨大フレアは、硬X線からガンマ線のエネルギー領域でこれまで3回観測された（図1）。そのうち最大の2004年の巨大フレアでは、硬X線の瞬間的な強度は太陽フレアの硬X線強度の1000倍を超えて

いた。発生源となったマグネターまでの距離は3万光年ほどと推定され、太陽までの距離の20億倍もあったことを考えると、この強度は驚くべきものである。幸いX線強度のピークの継続時間が0.2秒以下と短かったため、放射線障害・通信障害などの被害を及ぼすには至らなかったが、地球の電離層の電離度が高まるなど、その影響は地球環境にも及んだ。

巨大フレアの研究はまだ始まったばかりだが、マグネター磁気圏における磁気リコネクション（磁場エネルギーのプラズマエネルギーへの転換現象）が関与していることはほぼ確実視されている。磁気リコネクションの研究は、過去数十年の間に日本の太陽フレア観測衛星「ようこう」と地球磁気圏観測衛星「Geotail」の活躍により飛躍的に進化したものだが、その研究成果はマグネターの研究にも生かされている。

最近打ち上げられたばかりの太陽観測衛星「ひので」による太陽磁場活動の研究、そして計画中の磁気圏観測（Part2 P.25

参照）によって、磁気リコネクションの理解はさらに深まることが期待されている。その成果は、マグネターのような極限天体現象の理解にとってもきわめて重要なものとなるだろう。

超高エネルギー宇宙線UHECR

一方、われわれの周りには、宇宙線（宇宙から飛来する荷電粒子）が大気中の原子核を壊して生成した粒子群（空気シャワーと呼ぶ）が1分間に1回ほど降り注いでいる。シャワーのもとになる宇宙線粒子のもつエネルギーは 10^{10} ~ 10^{12} 電子ボルト（eV）程度である。その高エネルギーの極限を追求すると、銀河系の中に閉じ込め可能な 10^{18} eVをはるかに超えて 10^{20} eVに達し、超高エネルギー宇宙線（Ultra High Energy Cosmic Rays; UHECR）と呼ばれる。

UHECRの正体は実はまだ確定していないのだが、陽子であるとするのが大方の期待である。 10^{20} eVのエネルギーを日常単位に換算すると16ジュールとなり、150g程度の野球の硬球が秒速15m（時速

約50km）で飛ぶときにもつ運動エネルギーと同じである。1個の陽子というミクロな存在がこのような巨視的なエネルギーをもちうるのは大変不思議なことであり、その起源の追求はホットな研究テーマである（図2）。

研究者の立場は大きく二つに分かれる。一派は、 10^{25} eV程度以上の静止エネルギーをもつ未知の素粒子が崩壊してUHECRがつくられたとし、別の一派はずっと低エネルギーの宇宙線粒子が未知の加速過程により何桁も高いエネルギーを獲得してUHECRになったとする。これらの考え方はそれぞれ「トップダウン・シナリオ」、「ボトムアップ・シナリオ」と呼ばれている。この2つのシナリオのどちらをとるべきか、決着はまだついていない。しかし、観測されるUHECRの強度がもっと低エネルギーの宇宙線強度と連続的につながっているように見えることを重視すると、後者のシナリオが有利であると「ボトムアップ派」に属する筆者は考える。

UHECRの生成シナリオ

ボトムアップ・シナリオの場合、加速の舞台を同定する必要があるが、熱的エネルギーをはるかに超えたエネルギーを個々の粒子に与えなければならないから、ほぼ熱平衡にある普通の環境ではだめで、何らかの極限的な環境を探求しなければならない。そのような極限環境の舞台として、銀河団内の衝撃波、活動銀河核などとならび、マグネター周辺も候補の1つである。

いずれの舞台を考えるにせよ、ボトムアップ・シナリオでUHECRをつくるためには、巨視的なエネルギーを少数の粒子に選択的に与える必要がある。人工的な粒子加速器の代表例であるシンクロトロンの場合、この選択はローレンツ因子 γ をもつ粒子に対し、共鳴条件、 $\omega = \Omega c / \gamma$ （ Ωc はサイクロトロン周波数）を満たすように角振動数 ω の交流電場を加え続けることによって実現される。加速に伴って γ が増大するとき、いかにして共鳴条件を維持するか、そこが加速器

実験家の腕の見せ所になるだろう。

一方、そのような微妙な調整は天体爆発現象では期待できないが、その代わりに、爆発に伴って発生するプラズマ乱流内の電磁場（乱流場）が広い波長（ λ ）範囲にわたる成分をもつことが共鳴条件の維持に生かせる。シンクロトロンでは、粒子を加速器内部にとどめるように粒子の平均速度をゼロに調整するが、天体現象では粒子は乱流場に対し、平均速度 $c \cos \alpha$ （ c は粒子速度~光速、 α は乱流場を平均したとき残る背景磁場方向に対するピッチ角）で動いている。そのため、共鳴条件は、ドップラーシフトを考慮して、 $\omega - kc \cos \alpha = \Omega c / \gamma$ となる（ここで $k = 2\pi / \lambda$ と定義し「波数」と呼ぶ）。粒子は、エネルギーが上がるにしたがって次々に共鳴相手の電磁場成分を乗り換えながら、加速され続けることになるのである。

共鳴成分のもつべき角振動数 ω と波数 k は任意であるわけではなく、プラズマ乱流の特性に応じた関係（分散関係）がある。粒子の加速効率、そして最高到達可能エネルギーはプラズマ乱流の特性（強度・存在範囲と分散関係）により決まってくる。

また、加速の間、粒子のピッチ角も変



図2 超高エネルギー宇宙線の観測のため、東京大学宇宙線研究所を中心とする研究グループは、アメリカ・ユタ州の砂漠地帯に大規模な観測網を建設中である。この写真はその建設作業の一コマ。ヘリコプターでつり下げられているのは宇宙線の観測装置で、同型の観測装置を砂漠に数百台展開して超高エネルギー宇宙線を検出する。

化を受けるが、その記述にもプラズマ理論が必要である（ピッチ角散乱理論）。それらの理論には実験による検証が不可欠である。その検証の舞台を与えるのが地球周辺のプラズマ・電磁場の直接観測であり、その意味でも磁気圏観測の重要性が高まってきている。



寺澤敏夫（てらさわ・としお）学部時代に早川幸男先生の宇宙線の入門書を読み、非熱的粒子の加速現象に興味を覚えた。大学院では、加速の舞台を直接探査できる地球周辺の宇宙プラズマを研究するため、西田篤弘先生・大林辰蔵先生に弟子入りした。その後一貫して、宇宙プラズマの二大素過程、無衝突衝撃波形成と磁気リコネクションをテーマの中心とし研究を続けてきた。最近では、初心にかえって、低エネルギーから超高エネルギーまで10数桁にわたって分布する宇宙線の起源解明を志している。

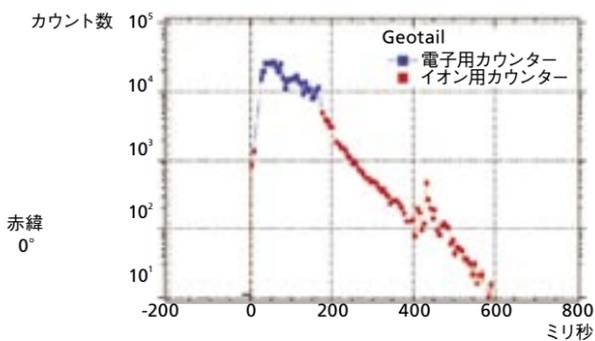
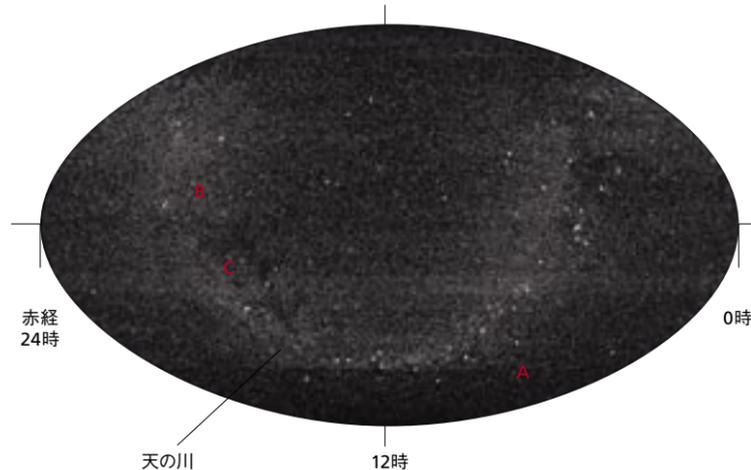


図1 これまでに巨大フレアを起こした3つのマグネターの天球上の位置（A：1979年、B：1998年、C：2004年）。Aはわれわれの銀河系の隣の大マゼラン雲内にあり16万光年ほど離れている。一方、B、Cはいずれも銀河系内にある。右上は2004年のフレア開始前200ミリ秒から開始後800ミリ秒までの硬X線~ガンマ線の光度曲線で、日本のGeotail衛星による観測結果である。