

CASE 1

宇宙線の種をまく

宇宙から地球には、宇宙線と呼ばれる超高エネルギーの荷電粒子が絶えず降り続けている。宇宙線は10桁以上に渡る幅広いエネルギー帯にわたって冪(べき)型の分布をしており、これは宇宙が熱平衡状態から大きくかけ離れていることを意味している。このような「非熱的」粒子の生成メカニズムとしては、フェルミ加速と呼ばれる理論が広く受け入れられた標準モデルである。フェルミ加速は最初にある程度高いエネルギーを持つ「種」となる粒子をより高エネルギーに加速する。では、その「種」はどのように作られるのだろうか？



地球で観測される宇宙線のエネルギー密度を説明するには、星が進化の最終段階で引き起こす超新星爆発のエネルギーの10%程度を宇宙線のエネルギーに変換することが出来ればよい。実際に超新星残骸から相対論的電子のシンクロトロン放射が観測されており、宇宙線の超新星爆発起源説はもっともらしい仮説である。超新星爆発が起こると爆風によって衝撃波が発生し、超音速で周囲に伝播する。衝撃波では超音速流の運動エネルギーが熱エネルギーに変換され、1億度を超える超高温のガスが形成する。一見すると非常に高いエネルギーのように思われるかもしれないが、宇宙線のエネルギーはこれを遥かに凌ぐ。流体力学的な衝撃波の性質では宇宙線は説明できないのである。

この衝撃波が伝播する媒質(星間物質)は極めて希薄で高温な電離したプラズマ状態のガスである。プラズマ中の衝撃波の興味深い特徴は、単に高温の熱的なガスを作るだけでなく、一部の非熱的な超高エネルギー粒子を生成することである。標準理論のフェルミ加速は衝撃波を介した粒子加

速のモデルであり、種粒子の存在を仮定すれば、宇宙線の生成が自然に説明できる。ところが、超新星残骸で観測されるような宇宙線電子の種に必要とされるエネルギーは、衝撃波で加熱されたガスの熱エネルギーよりも3桁は高い。そんなに高エネルギーの種粒子をどうやって作ればよいのだろうか？この難問は40年以上にも渡って多くの研究者を悩ませてきた。

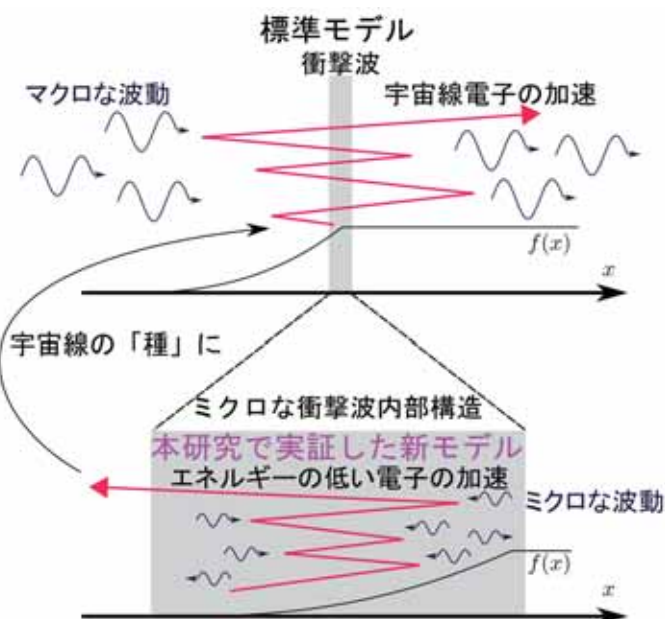
衝撃波面前後の比較的広い領域で起こる標準フェルミ加速とは対照的に、低エネルギー粒子の加速には衝撃波のマイクロな物理が重要となる。われわれは、最近の第一原理数値シミュレーションの結果にヒントを得て、電子がマイクロな波動によって散乱され、衝撃波の内部に閉じ込められたまま加速されるというモデルを考えた(図)。この種粒子生成モデルを検証するには、マイクロな衝撃波の構造を分解することが必要であるが、天文観測では到底できそうにない。では、もっと地球に近い衝撃波ではどうだろうか？

太陽から吹き出す超音速の太陽風が地球にぶつかることで地球の前面(高度約10万km)には定常的に衝撃波が形成されている。この衝撃波で宇宙線が生成されていないことはよく知られているが、種粒子生成モデルの検証には十分使うことができる。この場合は人工衛星がその場に出向いてプラズマの直接観測を行うことができるため、天文観測に比べると遥かに多くの情報が得られる。さらに幸運なことに、最近になって観測精度が飛躍的に向上したため、理論の検証に耐えうる観測データが得られていた。結論から言えば、理論モデルは最新の観測データを非常によく説明することができた。直接観測で実証された我々のモデルは、超新星残骸のパラメータでは宇宙線電子の種粒子生成を十分に説明することができる。我々は長年の大問題を解決するための大きな一歩を踏み出すことができたのかもしれない。

本研究成果は、T. Amano *et al.*, *Physical Review Letters* 124, 065101 (2020) に掲載された。

(2020年2月14日プレスリリース)

図：標準的な宇宙線加速のモデル(上)と、マイクロな衝撃波の構造を考慮した新たな種粒子の加速モデル(下)



CASE 2

植物の成長促進に成功 気孔をすばやく開かせて

野外では、雲が太陽の光を遮ったり、風に揺れる他の葉の陰になったりして、葉の受ける光の強さはダイナミックに変動し、それにともなって光合成速度も大きく上下する。光が一定の環境で光合成能力を強化した例はいくつかあるが、野外のような「変動する光環境」で植物の光合成能力を強化するにはどうしたらいいだろうか？カギとなるのは光合成において重要な役割を持つ気孔の動きだ。われわれは、光が強くなった時の気孔が開くスピードを上げることで、変動光環境における光合成や植物の成長を促進することに成功した。



世界レベルで増え続ける人口を養うためには、2050年までに主要作物の生産量を現在よりも大幅に増加させる必要があると警告されている。光合成は植物の成長量や収量を決定する最も重要な代謝であるため、高い光合成能力を有する作物の開発は、食料生産を増大させる手段の一つとして注目されている。これまでも光合成機構の解明やその改良を目指した研究は行われてきたが、その大部分は、実験室内で光強度が一定の条件下における光合成に着目したものだ。これは、栽培環境や実験環境をできる限りコントロールし、より緻密な実験系で研究を行うためである。

しかし、植物の本来の生育環境は、実験室ではなく自然環境である。農地や林床などでは、雲の切れ間から降り注ぐ光や、風に揺らぐ植物の葉の間から差し込む光の明るさは数秒～数分単位で変化する。このようなダイナミックな光の変動に対して、光合成速度は瞬時には応答できず、タイム

ラグが生じてしまう。光の変動に追いつくまでの時間、植物にとって光のエネルギーは無駄になるということだ。もし、光合成応答を迅速化することができれば、変動する光環境下における作物生産性の向上に大きく貢献するはずである。

「変動する光環境」で植物の光合成能力を強化するにはどうしたらいいだろうか？カギとなるのは光合成において重要な役割を持つ気孔の動きである。光合成に必要なCO₂は気孔から葉内に取り込まれる。気孔の開口速度は光の変動速度にくらべて遅いので、光が強くなってから気孔が開くまでの間に葉内でCO₂が不足し、光合成が大きく制限されることがわかった。また、PATROL1というタンパク質が遺伝子操作によって過剰に作られる個体（過剰発現体）では、光の変動に対して気孔が迅速に開口し、野外環境を模した変動光環境下では、光合成速度が最大で40%、植物体の成長量も50%増加することが明らかとなった。PATROL1は、PROTON ATPase TRANSLLOCATION CONTROL 1の略で、広く動植物に保存されており、動物においては神経伝達物質の分泌に関わる機能を持ち、植物においては気孔開閉の制御に関わる因子であることが知られている。PATROL1遺伝子と非常に似た遺伝子がイネやソルガムなどの作物やポプラなどの樹木にも存在しているため、これらの植物においても同様の遺伝子操作によりPATROL1遺伝子の発現量を高めることで、生産性を向上させられると期待できる。

基礎研究は、まだ知られていない現象を見つけ、そのしくみを明らかにすることを目的としている。どのようなイノベーションも基礎研究なしには成し遂げられない。現在、われわれは、生物が持つ潜在的な能力を解明するべく、野外の変動する光環境に対する光合成の調節メカニズムの全貌解明を目指して研究を行っている。これらの基礎研究による新たな知の蓄積は、食料増産や地球レベルの大気CO₂濃度上昇の抑制など、長期的な社会課題を解決するための基盤になると考えている。

本研究成果は、H. Kimura *et al.*, *Journal of Experimental Botany*, 7, 2339 (2020) に掲載された。

(2020年2月27日プレスリリース)

図：モデル植物であるシロイヌナズナの気孔を迅速に開口させることで、野外の変動する光環境における光合成応答と植物成長の促進に成功した。

