

## カッシーニ土星探査機データから、 銀河系における高エネルギー粒子加速に迫る

(下線部については、より詳しい解説が後述されています)

土星探査機カッシーニのデータ解析から、われわれの銀河系においてどのように高エネルギー粒子が作り出されているのかという問題に関して、新しい知見を得られた。



図提供 : ESA – C. Carreau

われわれの銀河系空間は高エネルギー粒子（宇宙線）で満たされており、その強度は宇宙環境を規定する上での最も重要な量のひとつである。エネルギーの高い宇宙線粒子がどのようにして作りだされているのかという問題は、宇宙物理の最重要課題のひとつである。最有力の学説は、宇宙空間ガス中にある強い（マッハ数の高い）衝撃波における加速というものである。特に、星がその一生の最期に超新星爆発を起こすと強い衝撃波が発生するので、超新星残骸が宇宙線生成の場であると考えることができる。

宇宙空間の衝撃波は、よく知られる超音速飛行機の前面に形成する例からも類推できるように、音速よりも速い流れが障害物や静止したガスに衝突することで発生する。ただし、宇宙空間における流体现象がわれわれの身の回りで起きているものと大きく異なるのは、宇宙ガスはイオンと電子からなる電離状態にあり、磁場の効果がきわめて重要であるという点である。宇宙線加速の問題解決にも磁場の効果を理解することが必須である。そして、磁場の効果を地上の常識から予想することは不可能であり、データに基づいてのみ、われわれの理解を確実に深めることができる。

超新星爆発に伴う強い衝撃波に関する十分に詳細な情報を得ることは、不可能である。一方で、より身近な宇宙空間である太陽系においても電離ガスの超音速流は存在するので、太陽系を飛翔する探査機が衝撃波を、磁場の効果も含めて、「その場」で詳細観測することは可能である。ただし、太陽系空

間における衝撃波は弱いものがほとんどであり、そこから超新星残骸における強い衝撃波に関する知見を得ることは困難であった。

2007年2月3日、土星を周回するカッシーニ探査機は土星の前面に生じた強い衝撃波の詳細観測を実施することに成功した。きわめて希な条件が強い衝撃波を発生させ、幸運にもその時に「その場」観測が実施され、はじめて実証に基づいて強い衝撃波での粒子加速に迫ることが可能となったのである。

観測されたことは、従来の常識を書き換えるものであった。

太陽系における観測史上最高のエネルギーを持つ電子（相対論的電子）が、確かに強い衝撃波に伴って観測された。しかし、その時の磁場の状態は、これまでは電子加速を起こさない条件だと考えられてきたものだった。太陽系での過去の観測結果は、電子加速はある特殊な条件下で起きることを示してきたが、今回の条件はその対極にあったのである。これまでの観測対象が弱い衝撃波だったの対し今回の事例は強い衝撃波であることが、この相違の原因であろう。

詳細を知ることのできない超新星残骸における磁場の状態は、論争の的となることがある。その意味で、今回の成果が持つ意味は大きい。強い衝撃波による相対論的電子加速のための条件が実証に基づいて把握され、かつ、それは従来考えられていたものとは逆だとわかったからである。つまり、今回の成果は「ゲームの在り方を変える成果 (game changer)」であると言える。

この研究成果は、**Nature Physics** に掲載された。研究を主導したのは **JAXA 国際トップ若手フェロー** と **JAXA 宇宙科学研究所** の研究者である。国際的な雰囲気の中でトップ・サイエンスを実行することを狙いとする若手フェロー・プログラムが、宇宙科学における普遍的課題の解決へ大きな貢献を成すことを可能にした。

**NASA, ESA, イタリア宇宙機関** の共同計画であるカッシーニ土星探査機は、**1997年10月15日** に打ち上げられ、**2004年** に土星を周回しての観測を開始した。現在も観測継続中である。

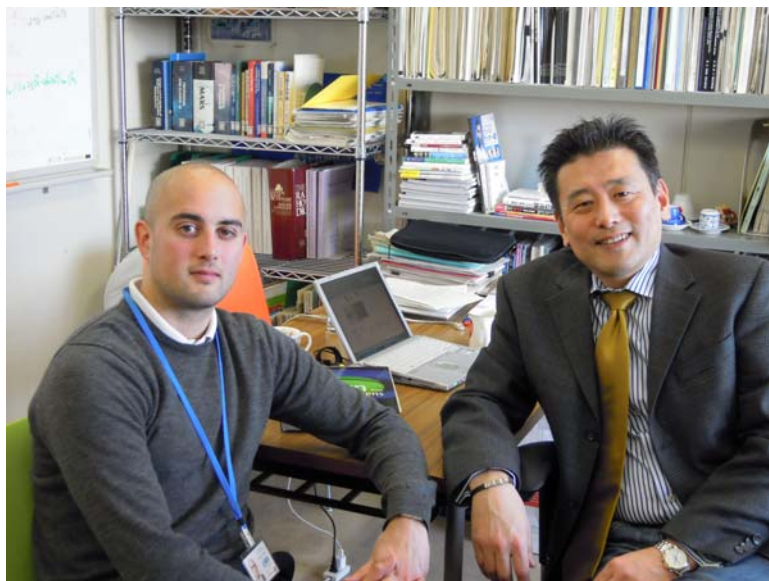
---

**Electron acceleration to relativistic energies at a strong quasi-parallel shock wave**  
(強い準平行衝撃波による相対論的電子加速)

**A. Masters, L. Stawarz**(JAXA 宇宙科学研究所)、**藤本正樹** (JAXA 宇宙科学研究所/東工大 ELSI)、**S. J. Schwartz** (インペリアル・カレッジ・ロンドン)、**N. Sergis** (アテネアカデミー)、**M. F. Thomsen** (ロスアラモス国立研究所)、**A. Retinò** (フランス国立科学研究センター)、**長谷川洋** (JAXA 宇宙科学研究所)、**B. Zieger** (ボストン大学)、**G. R. Lewis, A. J. Coates** (ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン)、**P. Canu** (フランス国立科学研究センター)、**M. K. Dougherty** (インペリアル・カレッジ・ロンドン)

**2013年2月17日**、**Nature Physics** にオンライン出版

## より詳しい解説



Adam Masters（左、論文筆頭著者）と藤本正樹（右、本解説執筆）

### 最も重要な量のひとつ

宇宙線は大気層を突きぬけて地球の表層に達することが出来る。したがって、宇宙線強度は地球の表層の自然放射線環境を規定する量であるということが出来る。興味深い例としては、太陽活動が弱まり宇宙線の太陽系内への侵入が容易になるとその強度は強まるが、より多くの宇宙線粒子が降り注いで大気分子と衝突することで雲形成が促進され、地球表面での平均気温が下がるという仮説がある。

### 最有力の学説

これはフェルミ加速と呼ばれるものであり、被加速粒子が衝撃波面とその上流との間の往復を繰り返すうちにエネルギーを獲得するという機構である。衝撃波は、速い流れで満たされた上流、衝撃波面で減速された遅い流れで満たされた下流、上流と下流を隔てる衝撃波面の三つからなる。ほとんどの粒子は上流から下流へと流されるが、加速される少数の粒子は衝撃波面で反射され上流へと逆流する。そして、上流で散乱されて向きを変え再び衝撃波面へと流れる。これが何度も繰り返されるうちに被加速粒子は高いエネルギーを獲得する。

ここで、被加速粒子が上流へと逆流することが必須であることに注意したい。このように、ガスを構成する粒子の内の一部のものだけが平均的な振る舞いから大きく離れた挙動を示すことは、希薄な電離ガスである宇宙流体においては可能である。ただし、この特異な振る舞いを示すためには、その粒子は、まず、ややエネルギーの高い状態（非熱的粒子）へと持ち上げられる必要がある。この前段過程のことを「フェルミ加速への注入過程（injection）」と呼ぶ。

## マッハ数

衝撃波面に対して上流の流速が音速の何倍であることを示した数値。流速が音速を超える（マッハ数が1を超える）と衝撃波が形成される。磁場効果を考える場合、通常の音速とは別に、磁場の効果を表すアルフヴェン速度の何倍であるかも考える必要がある。それをアルフヴェン・マッハ数と呼ぶ。

## 磁場の効果

最も簡単な磁場の効果としては、荷電粒子（イオン、電子）を磁力線に巻きつかせるように運動させるといふものがある。つまり、磁力線方向には粒子は移動し易いが、磁力線を横切る移動は容易ではないという原則がある。また、電離ガスが流れを持つ時、磁力線はガス流とともに動くということも理解しておきたい（電磁流体における「凍結の原理」）。つまり、ガス流が磁場に垂直である場合、ガスを構成する個々の粒子は、それが巻きついている磁力線を横切って移動することは困難であるので、基本的に磁力線に囚われた状態でガス流とともに流れることになる。

また、フェルミ加速に必要な被加速粒子の反射や散乱のためには、乱れた磁場が必須である。

## 「その場」で詳細観測

太陽系を探索する宇宙機には、粒子観測機器と磁場観測機器を搭載するものがある。そのような探査機が電磁流体现象の起きている現場を通過すると、「その場」の状態が、イオン・電子が運動する様相が個々の粒子を捕獲することで示され、それに加えて磁場も計測されるので、明らかにされることになる。衝撃波の場合、上流の状態、下流の状態、衝撃波面での磁場の乱れ具合、加速途中の粒子(注入段階にある粒子)の様相、そして、被加速粒子が得た最高エネルギー等を実際に観測することが出来る。

## 強い衝撃波に伴って観測

カッシーニ探査機による土星前面での衝撃波の「その場」観測例は数多くある。ここでは、精査した 94 例の中に見出した、異常に強い衝撃波(アルフヴェン・マッハ数で約 100)についての報告がされている。なお、ここで報告した事例以外においては、顕著な相対論的電子加速は検出されなかった。

## 磁場の状態

衝撃波面に対して垂直な流れが上流にあるものとする。上流での流れ方向に対して上流の磁場が平行に近い場合を「準平行衝撃波」、垂直に近い場合を「準垂直衝撃波」という。

「フェルミ加速」が起きるには、二つの条件が必要である。（1）粒子が、ある程度、事前に加速されること（非熱的段階への注入過程）。（2）粒子注入後は、衝撃波面から上流への被加速粒子の逆流が容易に起きること。これまでの太陽系における弱い衝撃波での「その場」観測結果は、衝撃波に伴って非熱的粒子が検出されるのは「準垂直衝撃波」がほとんどであるというものであった。そのことから、注入過程は「準垂直衝撃波」でのみ機能し、「準平行衝撃波」には無いものだと考えられてきた。

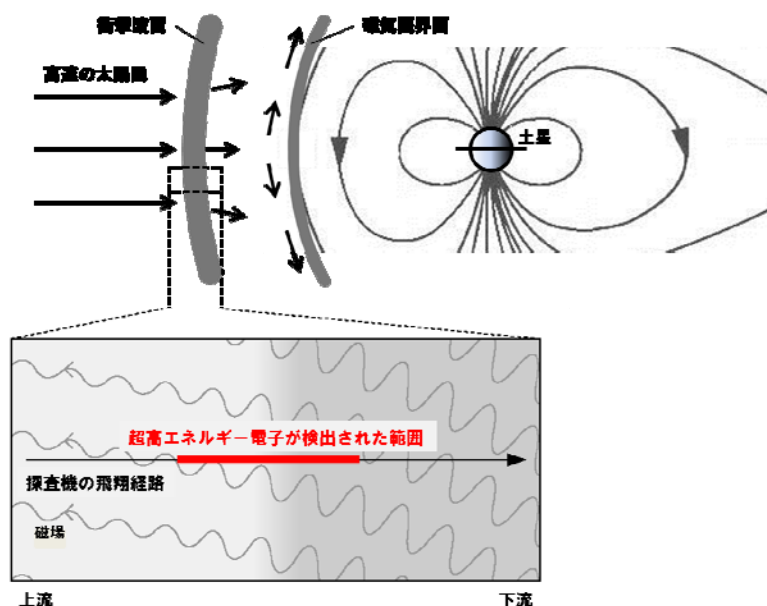
一方で、「準垂直衝撃波」の上流においては、粒子は基本的には上流の流れとともに下流にそのまま流されることになる。つまり、衝撃波面と上流との間を何回も往復して高いエネルギーを稼ぐということはかなり困難なものと考えられる。実際、太陽系の衝撃波において高いエネルギーの電子が検出されることはほとんど無かった。また、「準平行衝撃波」では、衝撃波面と上流との間の往復運動に関しての問題は無いが、この往復運動を開始する非熱的段階へと粒子を送りこむ過程（注入過程）が無いのであれば、加速もあり得ないと考えられてきた。

これが、太陽系での詳細観測が指し示してきた衝撃波における粒子加速に関するディレンマであった。対して、今回の観測は、マッハ数の高い「準平行衝撃波」という、前例がないものに対して行われた。

そこで鮮やかに見えてきたのは、このマッハ数領域では注入過程が「準平行衝撃波」においてもあること、そして、その問題が解決された以上はフェルミ加速にもスイッチが入り、相対論的エネルギーまで電子が加速されていること、の二つである。さらに、フェルミ加速を起こす磁場擾乱（被加速粒子を散乱させるもの）も同定されている。

さて、今回観測された衝撃波のアルフヴェン・マッハ数は **100** である。つまり、流れのエネルギーに対して磁場のエネルギーは、**1/100** の二乗の、**1/10000** しかない。しかし、磁場の効果は大事なのである。つまり、粒子加速にとっては磁場が弱いほど都合がよい、しかし、ゼロになってしまうと困るといふ、ある意味、わかりにくい話となっている。

同様な「磁場が弱い」状況において磁場の効果が大きな役割を果たすことは、他の宇宙流体现象でも見受けられる。これは、磁場の効果を理解することが一筋縄ではいかないことを如実に示しているとも言える。



### JAXA 国際トップ若手フェロー

JAXA 国際トップ若手フェロー・プログラムは、2010年に開始された。厳しい競争を勝ち抜いた世界トップの若手研究者が JAXA 宇宙科学研究所に最長5年間滞在する。そして、宇宙科学研究所の研究者をはじめとする日本の研究者と交流する中で、日本において宇宙科学のトップ・サイエンスを実行する土壌を開拓・進化させること、また、若手フェローらにも、日本に滞在するからこそその刺激を受けて新たに研究マインドを拓けてもらうことを期待している。2013年1月現在で若手フェローは7名である。

ここで紹介したような分野横断的な研究（太陽系でのデータを使って、遠方の超新星残骸における物理過程を論じている）は、多くの研究者がやりたいと思いつつも実際にはうまくいかないことが多い。研究を主導した若手フェローの二人は、それぞれ太陽系科学分野と宇宙物理学分野に所属するのだが、フェロー・プログラムが分野の垣根を取り払い、かつ、大きな成果を生み出すことに効果的であったことを、記しておきたい。