

2-2 太陽圏における高エネルギー粒子加速

2-2 High Energy Particle Acceleration in the Heliosphere

岡 光夫、寺沢敏夫 (東京大学大学院理学系研究科)

OKA Mitsuo and TERASAWA Toshio

要旨

宇宙天気予報のためには太陽面における爆発的エネルギー解放現象(太陽フレア・CME)に伴って大きな増大を示す太陽高エネルギー粒子フラックスの予測を実現しなければならない。これらの粒子の成因には太陽面現象に伴って放出された惑星間空間衝撃波が深く係わっていることが明らかになってきた。そして惑星間空間における粒子加速機構の研究は天体における非熱的粒子の起源、特に高エネルギー宇宙線粒子の起源解明に重要な貢献をしてきた。この小論では惑星間空間における粒子加速現象についてその一端を紹介する。

For the development of space weather forecast, it is important to achieve the prediction of the flux of high energy particles which are associated with solar flares and CMEs. Recent studies have revealed that the cause of the high energy particles is deeply related to the interplanetary shocks originated from these eruptive phenomena. The investigations of particle acceleration mechanisms in the interplanetary space have also contributed to the elucidation of the origin of the high energy cosmic particles. In this report, some topics from the interplanetary observations are presented.

[キーワード]

宇宙線異常成分, 太陽高エネルギー粒子, 衝撃波統計加速, ピックアップイオン, 惑星間空間
Anomalous cosmic rays, SEP, Diffusive shock acceleration, Pickup ions, Interplanetary space

1 はじめに

宇宙空間の希薄なプラズマ中では粒子同士のクーロン二体衝突はほとんど起こらず、電磁力を介した間接的な集団相互作用が支配的となる。そのため、宇宙プラズマでは熱平衡状態からの逸脱は日常茶飯事であり、熱エネルギーよりはるかに大きなエネルギーを持つ粒子、非熱的粒子が激しい動的現象に伴って生成され、それらが系の発展に本質的な役割を果たしていることが明らかになってきた。特に顕著なのは数十 MeV から数 $\times 10^{20}$ eV の広いエネルギーにわたって観測される宇宙線粒子である。これらの粒子は前世紀初頭に発見されたが数十年間その起源が不明であった。エネルギー収支の勘定から超新星起源が有力であると考えられていたものの、GeV (10^9 eV) から PeV (10^{15} eV) に及ぶ6桁ものエ

ネルギー範囲でほぼ単一の冪 $E^{-2.7}$ のエネルギースペクトルを持つという著しい特徴を説明することができなかったからである。しかし、フェルミの古典的な統計的加速理論を洗練して衝撃波環境に適用した Blandford and Ostriker (1978) に代表される理論家の仕事[1]により、冪型エネルギースペクトルが極めて自然に説明され、超新星爆発に伴う衝撃波が宇宙線粒子加速の現場であるとする現在の標準モデルが構築された。一方、観測的には、まず PeV 程度までの電子の衝撃波加速の証拠が超新星残骸 SN1006 において見いだされた。そして最近、別の超新星残骸 RX J1713.7-3946 の観測により、10 TeV (10^{13} eV) 程度までの陽子の加速の証拠も得られた(これらはいずれも日本の研究者が主体となった X・ γ 線観測プロジェクトの重要な成果である[2][3][4])。

このようにして受け入れられた宇宙線超新星

衝撃波起源論は20世紀最後の四半世紀における宇宙プラズマ物理学の最大の成果であるといっても過言ではないだろう。しかし、その加速の舞台は、現在の観測技術をもっては時空構造を分解できない遠隔の領域であり、加速の物理機構を特定するためには我々の持つ理論的手段を最大限に外挿してモデルを構築するしかない。実験科学としての物理学には理論の検証を行う場が不可欠であり、70年代後期から80年代前期の衝撃波加速理論の構築期にあたっては、ほぼ同時進行で行われた太陽圏における衝撃波観測が大きな役割を果たしたと言える[5][6]。

衝撃波と言っても、太陽圏には様々な衝撃波が存在し、非熱的粒子加速の舞台を提供している。例えば、1) 地球・惑星磁気圏の前面に形成される定在衝撃波、2) 太陽風の高速領域が低速領域に追いつくことによって形成される共回転衝撃波、3) 太陽から100AU程度のところで太陽風が超音速から亜音速に遷移する太陽風終端衝撃波、4) 太陽面での爆発的エネルギー解放現象に伴う惑星間空間衝撃波が挙げられる。本稿ではまず、終端衝撃波で生成されているとされる宇宙線異常成分(Anomalous Cosmic Rays, ACR)を取り上げ、衝撃波加速標準理論の適用が最も成功した例の一つを紹介する。そして続く第3章で、宇宙天気予報にとって重要な太陽高エネルギー粒子の加速について述べる。

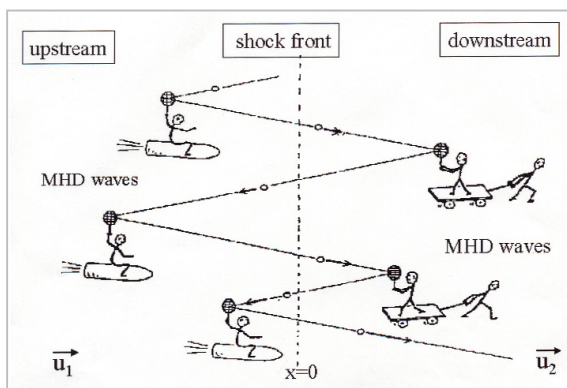


図1 統計的加速の本質は宇宙線輸送方程式(移流拡散方程式)におけるプラズマ速度場の発散・収束項に集約されている

衝撃波の場合は上流と下流の速度差が乱流磁場によって散乱される粒子に速度増分を与える。ただし、標準理論では被加速粒子の等方向性が仮定され、反作用効果も無視されていることに注意。

2 宇宙線異常成分(ACR)

2.1 基本モデルと標準加速理論

ACRと呼ばれる粒子(He, N, Oなど)は宇宙線の低エネルギー帯(数十~百 MeV/核子)において、銀河宇宙線変調モデルでは説明できない理論値超過成分として70年代に発見された[7][8][9](図2)。これらの粒子は星間空間ガスに起源を持つとされている。電気的に中性のガス粒子が太陽圏に侵入すると太陽紫外光などによって電離される。すると太陽風によってピックアップ(捕捉)され、終端衝撃波まで運ばれてそこで統計的衝撃波加速を受ける。以上が一般的に受け入れられている基本シナリオである[10][11]。加速領域として終端衝撃波が受け入れられたのはACRの強度が太陽からの距離と相関があったためである。また、星間空間起源ピックアップイオン(Pickup Ions, PUI)は通常荷電数が1である。したがって、シナリオは数~20MeV/核子のACR酸素の荷電数が1であることが観測的に証明されて確立した。また、もしACR粒子が太陽圏内に数年以上とどまると荷電が1から2へ増大することが期待される。酸素成分について30 MeV/核子以上では実際に O^{2+} 、 O^{3+} の成分が卓越することが観測され、加速効率についての直接的デー

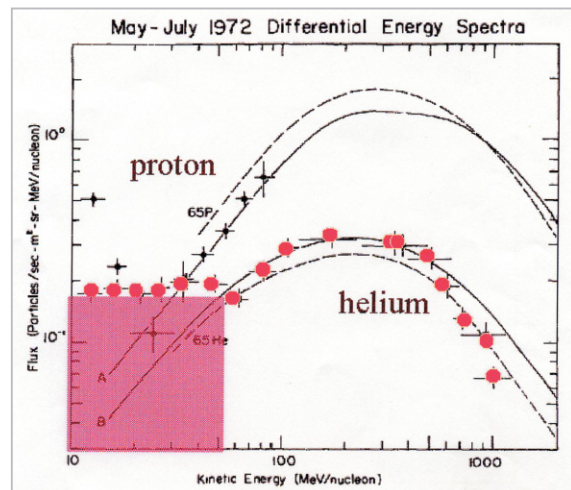


図2 左 IMP-5衛星により得られた宇宙線異常成分(ACR)のエネルギースペクトル[7]

IMP-5は銀河宇宙線を観測していたが、低エネルギー帯(10-30 MeV/核子)に太陽風変調モデル(直線と点線)では説明できないフラックスの増加(ハッチ部分)を検出した。小丸と大丸はそれぞれ水素とヘリウムであるが、30 MeV/核子以下で $He/H > 1$ となっている。

タが得られた(図3)。それによれば、1年当たり10 MeV/核子程度の加速効率が必要である[12]。この加速効率は、終端衝撃波のうち準垂直衝撃波となる部分での加速を考える理論での期待と大体一致している[13]。

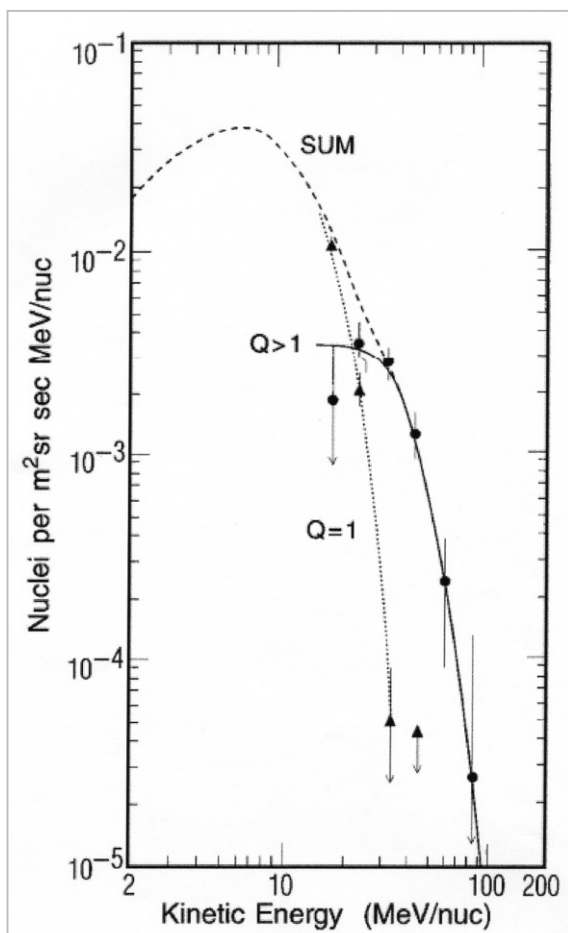


図3 右 SAMPEX 衛星により得られた宇宙線異常成分(ACR)の荷電数についての観測的証拠[12]

SAMPEX 衛星は極軌道衛星であり、核子あたりエネルギーの観測値とリジディティに依存した地磁気によるカットオフの位置の観測を組み合わせると入射粒子の荷電数を決定できる。これにより 30 MeV/核子以上の ACR 酸素の荷電数は 2 以上であることが明らかとなった。

2.2 注入段階

PUI が発見されたのは 1985 年のことだが[14]、ACR の発見当初から PUI は ACR の起源として期待されていた。統計的加速機構が有効となるには被加速粒子は衝撃波の上流と下流を自由に行き来できる必要があるが、宇宙プラズマにおける衝撃波はその遷移層の厚みがほぼ熱速度程度

であるため、被加速粒子はあらかじめ非熱的でなければならない。PUI は広いピッチ角分布と最大で太陽風速度の 2 倍の速度を持つため、加速領域への「注入」効率が太陽風プラズマのそれと比較して高いと考えられたのである (PUI の速度分布関数についてはこれまで観測が 1,2 次元に限られていたために球殻状分布を仮定して議論されていたが、最近の 3 次元観測によって PUI の実際的な分布形状が明らかになってきている (図 4、[15] より))。しかし、前節で述べた加速効率を実現できる垂直衝撃波は特に高い注入効率を要求するため、現実的には PUI を 1 MeV 程度以上にまであらかじめ加速しておく必要がある。その

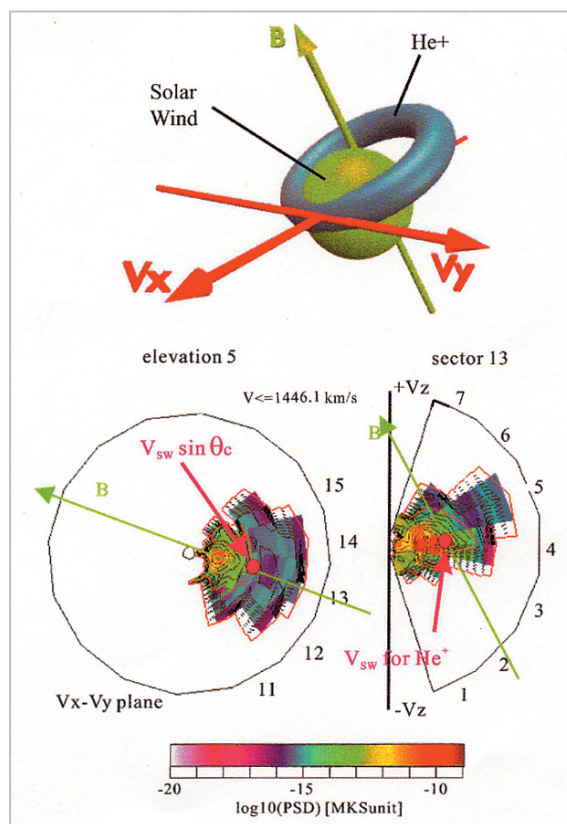


図4 GEOTAIL 衛星が発見したトーラス型速度分布を呈する PUI [15]

上図は模式図。太陽風の重元素イオンと一部重なっているものの、PUI は広いピッチ角分布と最大で太陽風速度の約 2 倍程度の速度を持つ。下図はトーラスの中心軸に垂直(左)と平行(右)な面での断面図。PUI は ACR の起源として終端衝撃波で加速されていることが期待されている。終端衝撃波の観測はいまだなされていないが Voyager がもうすぐ到達するはずである。また、共回転衝撃波や地球前面定衝撃波では PUI の加速が報告されており、太陽面爆発現象に伴う惑星間空間衝撃波でも強い加速を受けていると考えられている。

予備的な加速機構は何か？それを求める問題、injection problem、は難問としてしばらく残されていたが、最近以下の進展があった。

PUIの衝撃波加速に関する最初の観測的検証は共回転衝撃波において得られた(図5、[16]より)。それによれば、衝撃波通過後に5 keVのH⁺フラックスが急激に増大し、太陽風中は1 keV程度のPUIが衝撃波面において初期加速を受けていたことを示していた。一方、200 keVのH⁺フラックスは衝撃波通過前より緩やかな増大を示しており、衝撃波統計加速理論を支持するものであった。この観測により、衝撃波加速を低エネルギーにおける注入段階と高エネルギーにおける標準加速理論による段階とに区別するツー・ステップ加速モデルが実証された。最近では、地球前面定在衝撃波においてもPUIの初期加速が報告されており[17]、太陽圏における多くの衝撃波で強い加速を受けていると考えられている。

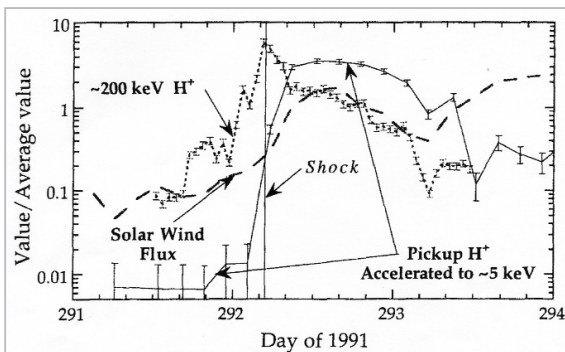


図5 探査機 Ulysses が 1991 年 10 月 18 日に観測した PUI の共回転衝撃波による加速 [16]

同日 4 時過ぎに衝撃波を通過しているが、低エネルギー(5 keV)のPUIは通過後にフラックスが増大しているのに対し、高エネルギー(200 keV)のPUIは通過前より標準理論から期待される exponential 型の増大を示している。

2.3 非線形段階

強い衝撃波は極めて効率的に非熱的粒子を作り出すので、非熱的粒子の占めるエネルギーが、熱的粒子や磁場の持つエネルギーと同程度かあるいはそれらを凌駕する可能性がある。そのような場合、衝撃波の構造は通常 MHD ランキン・ユゴニオ条件におけるように熱的粒子や磁場だけによって決まるのではなく、加速された非熱的粒子の寄与がかかわることになる。太陽

風終端衝撃波の場合も太陽風プラズマに対して非熱的 PUI の占める割合が増加するため同様である。これらの可能性は理論的には早くから指摘されており、そうした反作用 (= 非線型効果) を示す衝撃波は「宇宙線変成衝撃波」(Cosmic-Ray-Modified Shocks = CRMS) と呼ばれてきた [18]。ただし、観測的検証例は少なく、ごく最近になって比較的大きな太陽フレア・CME に伴う惑星間空間衝撃波の一つが CRMS と同定されている [19]。

3 太陽高エネルギー粒子の加速

太陽面でのエネルギー解放現象に伴い高エネルギー粒子の加速が起きることは、地上の中性子計の観測による 1946 年 7 月 25 日のイベント (大きな Ha フレアと同期) に関する Forbush の論文が最初の報告である [20]。以後、IGY 期間の観測を経て、太陽高エネルギー (Solar Energetic Particles = SEP) 粒子の物理学は現在知られている姿に大きく発展してきた。

SEP には数時間以上にわたって続く long duration events と、1 時間程度以下の短時間しか続かない impulsive events の 2 種類があることが知られている。2 種類の events のうち CME に伴うものは long duration events (LDE) であり、まずこれについて述べよう。多くの LDE の観測例が得られるにつれて明らかになってきたのは、加速の親 (= CME に先行する惑星間空間衝撃波、IPS = InterPlanetary shock) と観測者の相対的な経度差により SEP の時間プロファイルが分類されることである。現在のこの分類についての理解を図 6 に示す ([21] の Fig.2 より)。CME 先頭の経度 ('nose') 付近で衝撃波強度が最大で加速効率も最大となっているのが普通である。図 6 には IPS 通過時刻付近には顕著な特徴がない例が集められているが、強い IPS の場合、その通過時刻付近の数時間にわたってフラックスが極大を示すことがある。図 7 ([21] の Fig.1 より) はこれを模式的に描いたもので、IPS 付近で局所的に乱流が励起される結果、粒子が捕捉・加速され続けてフラックスが増大を示すものと理解されている。このような IPS 付近数時間の粒子フラックスの増大は歴史的に Energetic Storm Particles = ESP の

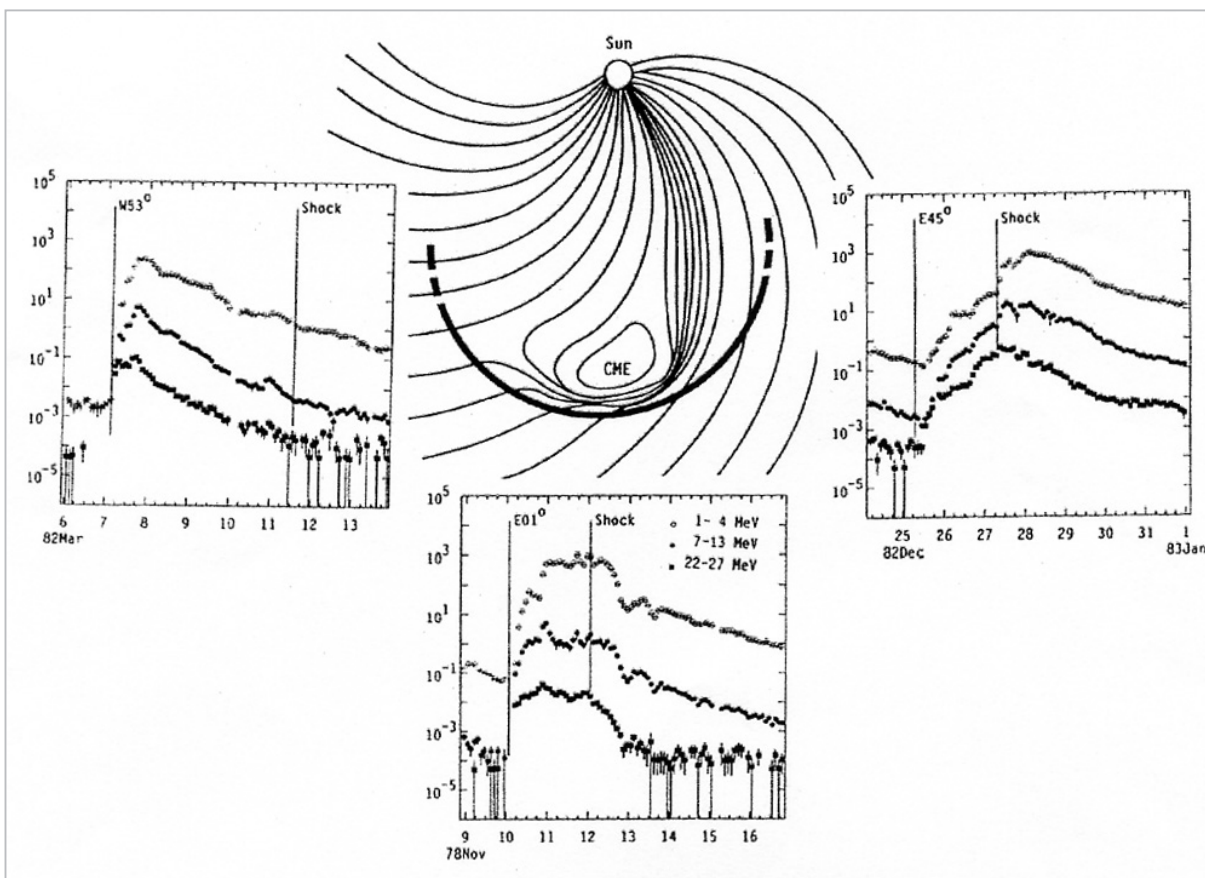


図6 CMEとそれに先行するIPS(太い実線で描かれたカーブ)と観測者の位置関係により観測される粒子フラックス(三つの挿入図の縦軸)の時間プロファイルは定性的に異なる

観測者から見てCMEが西側(左の挿入図)の場合、観測者は加速領域と磁力線によりつながれているため、速やかなフラックス増大を観測する。CMEが観測者と同じ太陽経度の場合(中央の挿入図)、IPSの通過頃までは磁力線によりつながり、通過後につながりが切れる。一方、CMEが東側(右の挿入図)の場合には、IPSの通過頃までは磁力線は直接つながっておらず、むしろ通過後にCMEのnose領域とつながるためフラックスのピークは遅れる。

略称で呼ばれてきた。10年以上前の理解ではESPのみがIPSによる加速の結果であり、CME放出直後に立ち上がる粒子フラックスは別の加速機構(例えば太陽フレア領域での統計的加速など)によるものと思われていたが、現在ではすべてをCMEに伴う衝撃波統計加速に起源が求めるのが通説である。

次に、LDE(long duration events)とimpulsive eventsの違いについて述べよう。1980年代初期以前にはこれらの違いを惑星間空間における粒子の伝搬の違いに求める考え方が強かった。この考え方では、惑星間空間での粒子の散乱(Alfvén波によるサイクロトロン共鳴散乱と考えるのが定説)が強い時には粒子の伝搬は拡散的となり、観測されるLDEの時間プロファイルが説明されるとする。一方、散乱が弱い時には、粒

子が磁力線に沿ってビーム状に運動しimpulsive eventを作るとする。(実際、impulsive eventsにおける粒子のピッチ角分布はビーム状である。)この考え方への異議申立ては、二つのeventsで粒子の組成が違うという観測(LDEの組成はコロナの普通の組成とほぼ同じであるのに対し、impulsive eventsでは $^3\text{He}/^4\text{He}$ が異常に高い)の提示から始まった。そして、散乱の程度が成因を分けるとすると、本来共存するはずのない二つのeventsの同時観測例が報告[22]されるに及んで、全く新しい考え方が必要とされるに至った。現在では、impulsive eventsはLDEとは加速機構が違い、コロナの比較的低い場所におけるリコネクション領域などでの加速を考えるのが通説である(^3He の増加はそこでのイオン・サイクロトロン共鳴加熱に起源を求める)。この考え方は

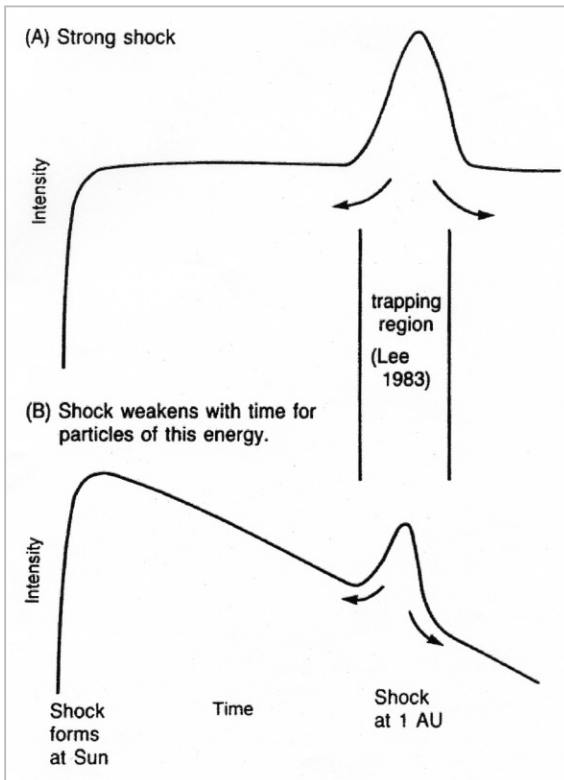


図7 1AUで観測される粒子フラックスの時間変化

(A)強いIPS、もしくは比較的低エネルギーの粒子の場合。(B)比較的弱いIPS、もしくは比較的高エネルギーの粒子の場合。1AU付近に衝撃波が到着した時、フラックスの盛り上がりがあるとESPと呼ばれてきた。ごく弱いIPSの場合には、太陽の近くにある時のみ加速が効率的に起き、1AUに到着した頃には既に加速機構がOFFになっていることがある(衝撃波加速に必要な乱流が消滅するなどのため)。その時にはESPは観測されない。

impulsive events と LDE における加速領域の温度の違いの観測によっても支持されている。LDE での鉄の荷電数は 14 程度で通常のコロナの荷電数と一致しているのに対し、impulsive events の平均的荷電数は 19 であり、加速領域の温度が 500 万度以上にも達したことを示している[23]。

なお、SEP に関する最近の話題として CME を

伴うイベントにおける数十 keV の He^+ フラックスの増大が挙げられる(例えば[24])。通常では He^+ は He^{2+} に対して数%しか占めないのに対し、CME を伴う SEP イベントでは両者の比が 1 を超える場合があることが知られている。この He^+ の起源としては、太陽面爆発現象に伴って放出された太陽大気中の低温成分と、前章で取り上げた星間空間起源 PUI が挙げられる。後者はその特徴的な速度分布のために加速されやすく有力であり、宇宙線異常成分の起源としてのみならず太陽高エネルギー粒子の起源としても注目されている。

4 結語

惑星間空間における加速現象として宇宙線異常成分を例にとって標準加速理論について概説した上で、太陽面爆発に伴う粒子加速現象に関連した事項について駆け足の review を試みた。ここで、宇宙線異常成分の研究に代表されるように、注入段階から非線形段階に至るすべての段階で粒子加速に関する実証的な研究が行われるようになったのはごく最近であることに留意しよう。今太陽サイクルはその最盛期を過ぎたとはいえ今後数年間は活動が高い時期が続くだろう。その間に多数の衛星により、高質のデータが多量に取得されることが予想される。また、日本でも L5 や BepiColombo ミッションなど惑星間空間を広く観測する計画が立案中で、今太陽サイクル～次太陽サイクルにかけ、太陽圏規模での多点観測が実現する見込みである。これらから得られる知見は太陽と地球を結ぶ惑星間空間における粒子加速現象の定量的議論を進展させるものであり、宇宙天気予報の更なる精度向上が期待される。

参考文献

- 1 Blandford, R.D. and J. P. Ostriker, *Astrophys. J.* 221, L29, 1978.
- 2 Koyama, K. et al., *Nature*, 378, 255, 1995.
- 3 Tanimori, T. et al., *Astrophys. J.*, 497, L25, 1998.
- 4 Enomoto, R., et al., *Nature* 416, 823, 2002.
- 5 Terasawa, T., *Science and Technology of Advanced Materials* 2, 461, 2001.

- 6 Tsurutani, B. T. and R. G. Stone, editors, Geophysical Monograph Vol. 34 and 35, American Geophysical Union, 1985.
- 7 Garcia-Munoz, M. et al., Astrophys. J. Lett., 182, L81, 1973.
- 8 Hovestadt, D. et al., Phys. Rev. Lett., 31, 650, 1973.
- 9 McDonald, F. B. et al., Astrophys. J. Lett., 187, L105, 1974.
- 10 Fisk, L. A. et al., Astrophys. J. Lett., 190, L35, 1974.
- 11 Pesses, M. E. et al., Astrophys. J. Lett., 246, L85, 1981.
- 12 Mewaldt, R. A. et al., Astrophys. J. 466, L43, 1996.
- 13 Jokipii, J. R., Astrophys. J. 393, L41, 1992.
- 14 Möbius, E. et al., Nature, 318, 426, 1985.
- 15 Oka, M. et al., Geophys. Res. Lett., in press, 2002a.
- 16 Gloeckler, G. et al., Geophys. Res. Lett., 99, 17637, 1994.
- 17 Oka, M. et al., Geophys. Res. Lett., in press, 2002b.
- 18 Drury, L. O. C. and H. J. Voelk, Astrophys. J. 248, 344, 1981.
- 19 Terasawa, T. et al., Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf. (Salt Lake City), 6, 528, 1998.
- 20 Forbush, S. E., Phys. Rev. 70, 771, 1946.
- 21 Reams, D. V. et al., Astrophys. J. 466, 473, 1996.
- 22 Mason, G. M. et al., Astrophys. J. 339, 529, 1989.
- 23 Klecker, B. et al., Astrophys. J. 281, 458, 1984.
- 24 Kucharek, H. et al., Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf. (Hamburg), 8, 3439, 2001.

おかみつ お
岡光夫東京大学理学系研究科博士課程
宇宙プラズマ物理学てらさわ とし お
寺沢敏夫東京大学大学院理学系研究科教授
理学博士
宇宙プラズマ物理学