

SEDA-AP/HIT による太陽フレアからの重イオンの観測

○上野遥、松本晴久、古賀清一 (JAXA)

Abstract

宇宙環境計測ミッション装置(SEDA-AP)に搭載されている重イオン観測装置(HIT)は、2009年から約6年間銀河宇宙線と太陽粒子線からのリチウムから鉄までの重イオンを計測してきた。特徴的な観測例は、2012年3月7日のX5.4クラスの太陽フレアに同期した重イオンの検出である。その元素存在比は銀河宇宙線よりも太陽表面での元素存在比と近く、太陽から放出された元素を観測した可能性がある。またこのフレアからは窒素の検出数が多く、銀河宇宙線や太陽での存在比においては前後の原子番号より存在比が下がるはずだが、HITの観測では明らかに高くなっている。太陽フレア粒子の観測により加速機構の制限がつけられる可能性があると言える。

1. イントロダクション

地球を取り巻く宇宙放射線環境は主に、太陽粒子線(Solar Energetic Particle: SEP)や銀河宇宙線(Galactic Cosmic Ray: GCR)、捕捉粒子線(trapped particle)がある。他にも太陽風や異常宇宙線といった放射線環境がある。図1は酸素イオンにおけるこれらのエネルギー分布を示す¹⁾。帯電、シングルイベントによる電子回路の故障やエラー、人体への被ばくというように、宇宙放射線は宇宙活動へ大きく影響を与える。特に、銀河宇宙線や太陽粒子線からの陽子や重イオンは線エネルギー付与(Linear Energy Transfer: LET)が高く、フラックスは低いが電子部品や人体に照射されたときの損傷は大きく、フラックスやエネルギーを計測することは、我々の宇宙活動において重要となる。

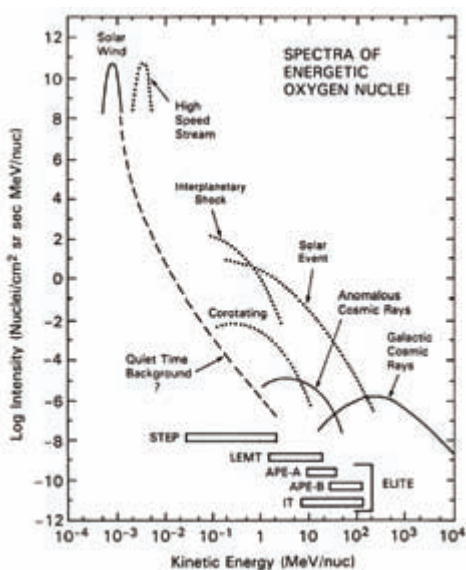


図1 酸素原子核のエネルギースペクトル

2. 重イオン観測装置

重イオンの計測はJAXAで開発した重イオン観測装置(Heavy Ion Telescope: HIT)によりなされている。計測原理として、 $\Delta E \times E$ 法を用いる³⁾。二つ以上のセンサにおいて入射粒子が停止したとき、単位長さあたりの損失エネルギー(dE/dx)は、Bethe-Blochの式から

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{mZ^2}{E}, \tag{1}$$

のように表される。 m, Z, E はそれぞれ粒子の質量、原子番号、トータルエネルギーである。つまり、 $(dE/dx) \times E$ は入射粒子の原子番号固有の値となり、この値を利用して粒子弁別ができる。HITでは複数枚のシリコンセンサから ΔE と E を求めている。

表1に現在までにHITが搭載された衛星をまとめた。低軌道であるISS高度での重イオン観測がミッションの一つとされているのが、宇宙環境計測ミッション装置(Space Environment Data Acquisition Equipment-Attached Payload: SEDA-AP)である。

表1 HIT搭載ミッション

衛星	高度	計測期間
ETS-VI	8000-38000 km	1994.9-1995.1
ADEOS	~ 800 km	1996.10-1997.9
MDS-1	209-35204 km	2002.2-2003.9
ALOS	690 km	2006.1-2011.4
GOSAT	665.9 km	2009.1-present
ISS/JEM	~400 km	2009.8-present

3. SEDA-AP

JAXA は ISS 周回軌道における中性子、重イオン、プラズマ、高エネルギー軽粒子、原子状酸素、ダストといった宇宙環境の計測、材料曝露実験や電子部品評価実験を目的に、SEDA-AP を開発し、2009 年より運用してきた³⁾。SEDA-AP は「きぼう」モジュールの船外実験プラットフォームに搭載されている(図 2)。大きさはマスト伸展時で 3 m×0.8 m×1.0 m であり、総重量は 450 kg、電力は平常時で 220 W である。各搭載機器の名称と位置を図 3 に示す。

4. SEDA-AP/HIT

SEDA-AP に搭載されている HIT の概略図を図 4 に示す。HIT は 2 枚の位置有感シリコン検出器(PSD)と 16 枚の PIN 型シリコン検出器(SSD)から構成されている。電子の遮蔽窓として 50 μm のアルミシールドが 2 枚取り付けられている。HIT の仕様を表 2 に示す。なお、エネルギー範囲は PHITS⁴⁾と言われる粒子輸送シミュレーションコードを用いて計算した。

入射粒子はシリコンセンサに落とすエネルギーに比例した電圧パルスを発生させる。HIT では 2 枚の PSD でパルスを検出したときにトリガをかけ、プリアンプによって全センサでの信号が、読み出し回路に送られる。HIT が低フラックス領域を通過する際には HK は 4 秒ごとに送られる。

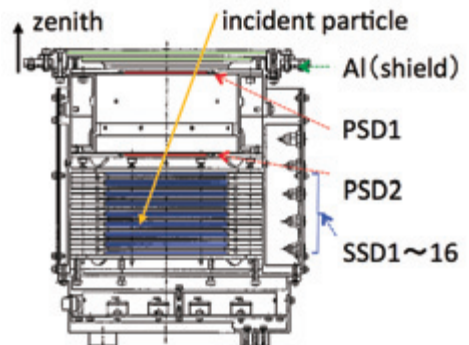


図 4 HIT の概略図

表 2 HIT の仕様

Sensors	PSD1: 200 μm, 62 × 62 mm ² PSD2: 400 μm, 62 × 62 mm ² SSD1-SSD16: 420 μm, 85 mm φ
Shielding film	Al: 50 μm + 50 μm
G-factor	25 cm ² sr
Energy range	Li: 10-43 MeV/n C: 16-68 MeV/n O: 18-81 MeV/n Si: 25-111 MeV/n Fe: 34-152 MeV/n
Time resolution	0.1 s/event
Operating temperature	-30 to +75 °C. (Elec.) -55 to +40 °C. (Sensor)
Dimensions	52 cm × 42 cm × 23 cm
Mass	25 kg
Power dissipation	36 W

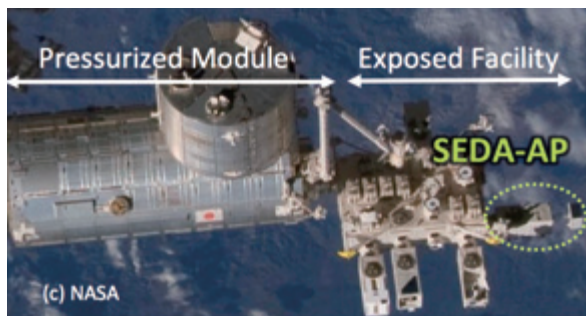


図 2 JEM/EF 上での SEDA-AP の位置

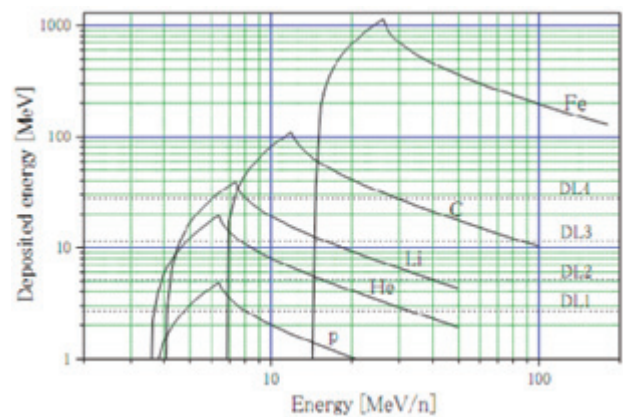


図 5 PSD1 での DL と検出可能粒子

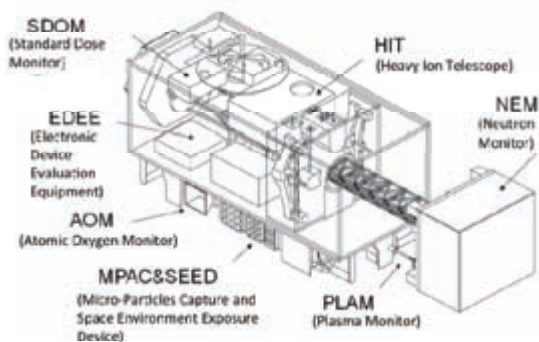


図 3 SEDA-AP 各機器の位置と名称

表 3 DL の値と設定期間

Start-End	2009.8-2010.7	2010.7-2012.8	2012.8-2014.7	2014.7-present
DL	1	2	3	1

5. 観測

計測のトリガとなる PSD1,2 において、陽子入射による計測処理の飽和が起きないように 4 段階の閾値 (Discrimination Level: DL) が設けられている。DL を高く設定すると検出可能な粒子の原子番号も高くなる。PSD1 での DL と検出可能粒子の対応を図 5 に、各 DL の設定期間とレベルの対応を表 3 に示す。

また、その他の変動パラメータとして、観測期間中の太陽活動の変動を図 6 に示す。観測期間中では太陽活動は極小期から極大期に移っており、極大期のピークは 2014 年 1 月頃となっている。

HIT の計測率のトレンドを図 7 に示す。DL ごとの計測率の平均値はそれぞれ 2.14×10^{-2} (DL1), 5.39×10^{-3} (DL2) と 8.96×10^{-4} (DL3) であり、一桁 DL 上昇で一桁計数率は低くなる。所々計測されていない時間帯があるが、これは SEDA-AP の β 角が高いことに起因しており、HIT のセンサ部の上限温度を超えてしまうために度々機器を OFF にしなければならない。よって、全体での運用率は約 53% となっている。図 7 の赤い矢印で示された箇所は太陽フレアプロトンイベントが観測されている時刻と同期した HIT でのカウントレート上昇を示している。

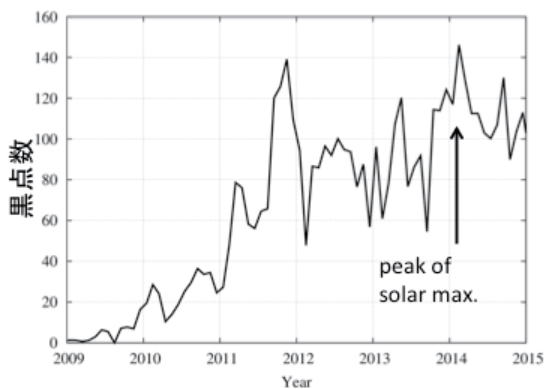


図 6 観測期間中の太陽活動の変動

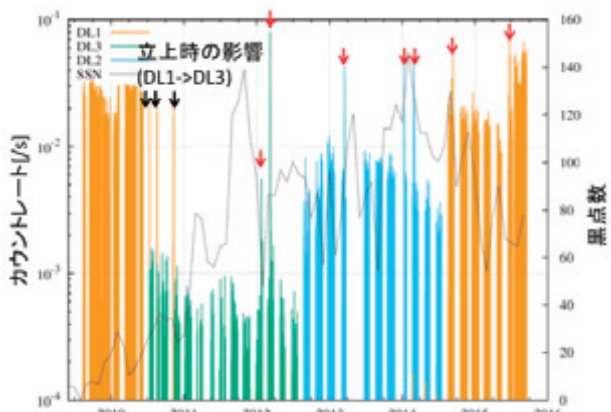


図 7 DL ごとの HIT の計測率のトレンド

6. データ処理

HIT は約 6 年間の観測で、1,074,272 回入射粒子を計測した。これらのデータは地上でデータ処理ツールを用いて処理される。粒子弁別を用いる $\Delta E \times E$ 法における ΔE と E について、 E を止まったセンサから 2 つ手前までのセンサの損失エネルギーの合計、 ΔE を止まったセンサの 3 つ手前での損失エネルギーと決定した。また、SSD16 または検出器を横に抜けたとき、または核反応を起こした入射粒子をノイズイベントと判定し、粒子弁別の対象から外している。 $\Delta E \times E$ プロットの観測値と原子番号ごとのシミュレーションを用いた計算値の位置関係から原子番号が判定される。

粒子弁別およびノイズ除去の結果、原子番号が判定されたイベント数は 12,633 個で、トリガ数の約 1.2% であった。SSD2 で停止したイベントについての $\Delta E \times E$ プロットを図 8 に示す。おおよそ理論曲線上にプロットされていることから、粒子弁別が正しくできていると言える。

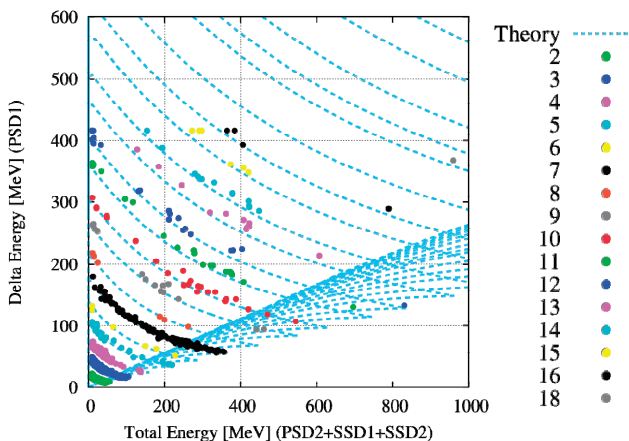


図 8 SSD2 で停止したイベントに対する $\Delta E \times E$ プロット。数字は原子番号、青い点線は計算値を示す。

7. データ解析

まず、粒子弁別されたイベントについて元素存在比を求めた。図 9 は DL ごとの元素存在比と、銀河宇宙線モデルである CREME96⁵⁾⁻⁷⁾ から求めた存在比を示す。CREME96 は、銀河宇宙線スペクトルのモデルから電子部品のシングルイベントアップセットの確率を求める計算ツールとして標準的に用いられている。比較から、奇数核よりも偶数核で存在比が高いという銀河宇宙線の傾向が HIT の観測データからも見えている。しかし、 $6 < Z < 17$ については、CREME よりも存在比が高い傾向にある。これは 2012 年 3 月

に発生した X5.4 クラスの太陽フレアの影響を受けていると考えられるが、これは次節にて議論する。

8. 太陽フレアからの重イオンの観測

まず、4章で見てきたように、LET 分布と元素存在比について DL3 の期間で他の期間と異なるデータ傾向が見られた。これは 2012 年 3 月に発生した X5.4 クラスの太陽フレアによる影響を受けていることが考えられる。このフレアの発生位置は N18E31 であり、コロナ質量放出が地球方向に到来していたことが分かっている。図 10 が GOES 衛星による X 線およびプロトンフラックスと、HIT の計数率のトレンドであり、プロトンフラックスの増加と同時に、HIT の計数率の増加が 100 count/min 以上まで増加している。これは HIT がフレアからの重イオンを計測していることが示唆される。最初の HIT フラックス上昇時について 13 の時間領域に分け、それぞれの期間で粒子弁別をした結果を図 11 に示す。

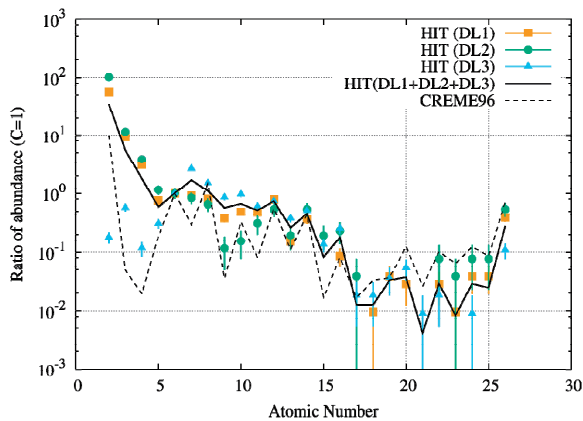


図 9 DL 期間ごとの元素存在比(DL1:四角,DL2:丸, DL3:三角)と CREME96(線)の比較

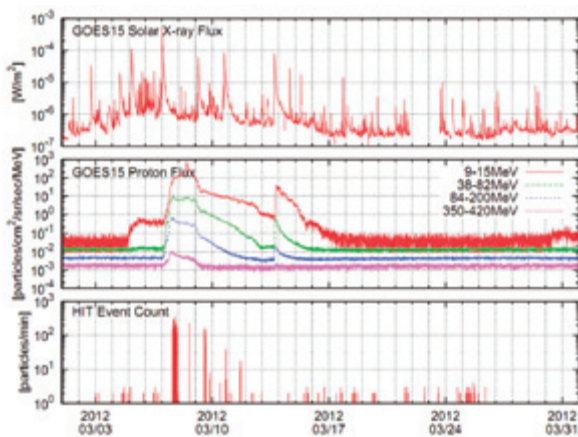


図 10 X5.4 太陽フレアの GOES 衛星データ (上: X 線、中: プロトン) と HIT の計数率 (下)

元素存在比について、計数率の上昇が起きている時間帯でデータを抜き出し、抜き出した後のデータと比較した結果を図 12 に示す。存在比はシリコンについて対数を取り、それを 6 に規格化してある。比較のために、CREME モデルと太陽の元素存在比^{8),9)}を同時に示しており、計数率の上昇期間でのデータ(only flare)では抜き出す前(exclude flare)に比べて、太陽の元素存在比に近く、また抜き出す前の存在比では CREME モデルにより近い分布をとる傾向が見られる。つまり、HIT で太陽フレアからの重イオンの計測がされている可能性が高いといえる。

9. 結論

約 6 年の観測により、HIT は 100 万イベント以上の陽子ならびに重イオンを観測してきた。そのうち 1.2% について地上解析により粒子弁別され、その元素存在比は銀河宇宙線の標準モデルである CREME96 と同じ傾向を示しており、HIT での計測の妥当性が示された。さらに、X5.4 クラスという大きい太陽フレアからの重イオン観測の可能性があることが示唆された。今後重イオンの加速機構について制限を付けるよう更なる解析を続ける。

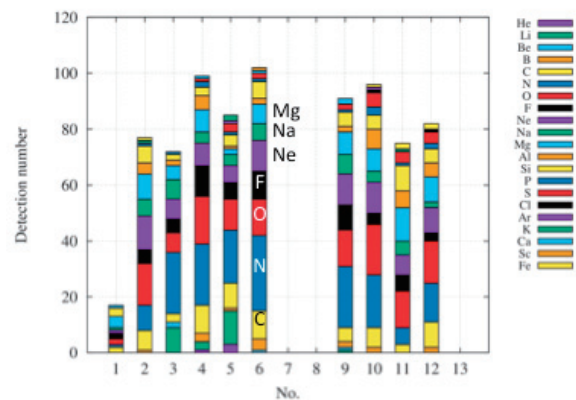


図 11 弁別粒子の時間変動

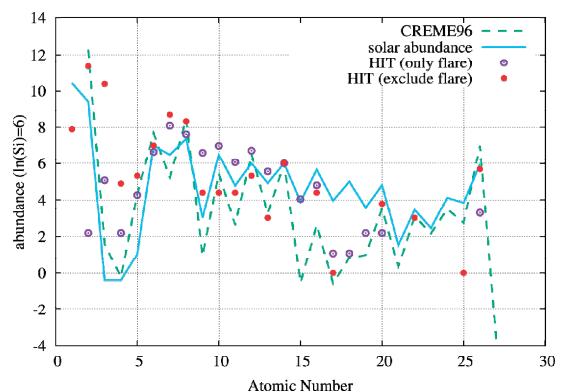


図 12 フレア期間(白丸)、フレア期間を除外した後(丸)の元素存在比と CREME96(破線)、太陽の元素存在比(実線)

参考文献

- 1) Von Rosenvinge, T. T., Barbier, L. M., Karsch, J., Liberman, R., Madden, M. P., Nolan, T., Reames, D. V., Ryan, L., Singh, S., Trexel, H., Winkert, G., Mason, G. M., Hamilton, D. C., Walpole, P.: The energetic particles: Acceleration, composition, and transport (EPACT) investigation on the Wind spacecraft. *Space Science Reviews*, 71(1995), pp. 155-206.
- 2) Goka, T., & Matsumoto, H.: High Energy Particle Environment. *Review of the Communications Research Laboratory*, 43(1997), pp. 249, 43, 249.
- 3) Koga, K., Matsumoto, H., Obara, T., Kimoto, Y., Yamada, N., Watanabe, H., Endo, M., Sakoh, D., Matsueda, T., Yamamoto, T., and Muraki, Y.: Initial Result of Space Environment Data Acquisition Equipment-Attached Payload (SEDA-AP) on the ISS - Kibo Exposed Facility, *Proc, RASEDA-9th(2010)*.
- 4) Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Noda, S., ... & Sihver, L.: Particle and heavy ion transport code system, PHITS. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 50(2013), pp. 913-923.
- 5) Tylka, A. J., Adams Jr, J. H., Boberg, P. R., Brownstein, B., Dietrich, W. F., Flueckiger, E. O., Flueckiger, E. L. Petersen, M. A. Shea, D. F. Smart, Smith, E. C.: CREME96: A revision of the cosmic ray effects on micro-electronics code. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 44(1997), 2150-2160.
- 6) Weller, R., Mendenhall, M. H., Reed, R., Schrimpf, R. D., Warren, K. M., Sierawski, B. D., & Massengill, L. W.: Monte Carlo simulation of single event effects. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 57(2010), pp. 1726-1746.
- 7) Mendenhall, M. H., & Weller, R. A.. A probability-conserving cross-section biasing mechanism for variance reduction in Monte Carlo particle transport calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 667(2012), pp. 38-43.
- 8) N. Grevesse and E. Anders (1988) in *Cosmic Abundances of Matter* (ed. J. Waddington), Amer. Inst. Phys., New York, p. 1.
- 9) Holweger, H., Bard, A., Kock, M., & Kock, A.. A redetermination of the solar iron abundance based on new Fe I oscillator strengths. *Astronomy and Astrophysics*, 249(1991), pp. 545-549.