

高エネルギー中性子・ガンマ線からみた 太陽粒子加速についての一考察

村木 綏¹⁾, 神谷 浩紀²⁾, 古賀 清一²⁾, 松本 晴久²⁾, 増田 智¹⁾, 柴田 祥一³⁾

1) 名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE)	464-8601
2) JAXA 筑波宇宙センター・宇宙環境計測グループ	305-8505
3) 中部大学情報工学科	487-8501

Abstract

2017年9月4日から9月10日にかけて、太陽活動極小期では珍しい大きなフレアが太陽表面で数回発生した。これらのフレアのなかでも9月6日と9月10日に発生したフレアでは高エネルギーガンマ線と中性子の両者が観測された。本講演では観測された高エネルギー粒子発生機構について考察した結果を発表した。これはそのレジュメである。GOES 衛星の観測によると、9月6日と9月10日のフレア強度は、それぞれ X2.2 と X9.3 (9月6日)、及び X8.2 (9月10日) であった。

1. Introduction --- 研究目的 ---

太陽物理学・宇宙線研究の大きな課題は高エネルギーの粒子がどのように宇宙で作られるのか、そのメカニズムを解明することにある。すなわち太陽宇宙線 (Solar Cosmic Rays; SCR) や銀河宇宙線 (Galactic Cosmic Rays; GCR) の起源を調べるのが研究の主目的の一つである。その中でも太陽は地球近傍から加速過程を詳細に観測・追跡 (trace) できる可能性を秘めた天体である。それ故、どの加速モデルが太陽表面における粒子加速過程を最もよく説明できるのか、粒子加速理論を検証できる可能性を秘めた研究対象でもある。この検証可能性は物理実験の本質と共有していて魅力的である。

このような研究背景から高エネルギー太陽粒子生成機構 (Solar Energetic Particles; SEP) の研究が盛んに行われてきた。日本では1981年に打ち上げられた人工衛星“ひのとり”がその先駆的存在であろう。観測を積み重ねた結果、フレアは impulsive flare と gradual flare の2種類に大別され、前者のフレアは、継続時間が数時間以内であるのに対して(数分の場合も多々ある)、後者では数日に及ぶことが、現象論として分類されている。Reams によれば、加速される粒子は、前者では He^3/He^4 の比が ~ 1 程度と大きいのに対して、後者では ~ 0.0005 と小さく、かつ H/He の比が ~ 100 と gradual flare には陽子が多く含まれている。一方 impulsive flare ではこの値は ~ 10 程度である。impulsive flare は年 ~ 1000 回程度観測されるのに対して、gradual flare は年 ~ 10 回程度である。もちろんこの頻度は太陽活動の極大期と極小期で異なるので、あくまでもこの数字は目安ということである。詳細は Reams の論文 (1994) に詳しい [1]。

さて上記のような、**impulsive flare** で加速される粒子の化学組成を説明できる有力な理論が 1978 年 Fisk により提案された [2]。この理論では He^3 や Fe イオンが選択的に加速される理由を説明している。この理論は波乗り加速理論とも言われている。詳細は Fisk の論文を見られたい。日本語による解説は寺沢敏夫氏の著書「太陽圏の物理」(岩波, 2002) に詳しい。

一方 **gradual flare** では衝撃波加速が作用していると考えられる。しかしその加速場所が、太陽近傍なのか、太陽から放出されたコロナ質量放出 (CME) の先端部分なのか、あるいは CME の足元部分か、まだ観測で実証されていない。分からない理由は、荷電粒子を閉じ込めていると考えられる磁気 loop が希薄で現在の観測手法では見えないからである。常田・内藤らは粒子が衝撃波で加速される場所は磁気ループ上部の先端部分で磁力線再結合によって打ち出されたプラズマ jet が衝突する箇所と考えている [3]。

もう一つ重要なことは、太陽で加速される粒子のエネルギー限界である。すなわち太陽は素粒子をどこまで加速できるかという問題がある。最高エネルギー太陽宇宙線問題と言えよう。宇宙のあらゆる場所で粒子が加速される限界エネルギー (加速上限値 E_{max}) は、以下の簡単な式で表されると Hillas は提唱している。Hillas の式は $E_{\text{max}} \approx \beta z B L$ で表される [4]。この式の中に太陽表面近傍の磁場の強度 $B \sim 200 \text{ gauss}$ 、荷電粒子が閉じ込められる磁気 loop の典型的な長さ $L \sim 5 \times 10^4 \text{ km}$ を代入すると、太陽表面での加速限界エネルギーは 330 GeV と予想される。この値は過去の観測事実と矛盾しない。今後の研究課題はどの理論が太陽表面で働いているのかを検証することにあると思われる。すなわち理論を観測で証明することであろう。

2. 観測手法 --- ガンマ線と中性子を利用する ---

上記の課題を研究・解明するために、我々は高エネルギー粒子の内、中性のガンマ線と中性子をプローベとして選択し解析することにした。陽子やヘリウム原子核はもちろん地球近傍で受信できるが、加速過程を解明するという課題を研究するためには、他の波長の観測結果と照合する必要がある。しかし荷電粒子の情報からは、加速時間が同定できないという問題が伴う。それは、荷電粒子が地球に飛来するまでに、惑星間磁場に捕獲され移送されるため、直進する光による観測と比較して議論できないからである。光から数時間の **time lag** が生じる。この状況は粒子加速理論の判別を困難にする。それ故、我々は電荷を有しない中性の高エネルギー粒子をプローベとして用いることにした。

しかしこのプローベにも問題がないわけではない。高エネルギーガンマ線は加速された電子からも放出されるので、電子が放射した信号か、イオンが作り出した信号か区別できない。一方中性子の信号は、電子は作らないので、イオンが作った信号であることは確かなのだが、中性子は質量を有しているため、光速で走れない。それ故 X 線の **time profile data** と比較する時、数分の遅れ (**time lag**) がでる。ここでは中性子は硬 X 線 (**hard X-rays**) の **flux** が最大になった時に生成されたと仮定して、飛来時間差から逆にエネルギースペ

クトルを求めている。今回は2017年9月10日に観測されたフレアを解析して、上記課題にどこまで迫れるか、tryしたのでその結果を報告した。

図1は1991年6月15日の巨大 flare に伴って、大型人工衛星、CGRO 衛星に搭載された計測器で観測されたガンマ線のエネルギースペクトルである [5]。30keV から 1MeV の低エネルギー部分（硬 X 線）はべき関数で表される。この部分は 電子の制動放射によって放出されたものである。一方 1 ～ 20MeV 領域の低エネルギーガンマ線 (LE- γ) は、加速されたイオンが太陽大気へのリウムや炭素イオン等に衝突して原子核を励起させ、励起した原子核が基底状態に戻る時に放出されたものである。このように低エネルギーガンマ線スペクトルには電子による部分とイオンによる部分が混在している。さらに今回 2017.9.10 のフレアではっきり示されたことは、20MeV から 1000MeV 領域の高エネルギーガンマ線 (HE- γ) は硬 X 線の peak の 2 分後に観測されたという事実で、20MeV 以下のガンマ線の生成時刻と時間差があることである [6]。

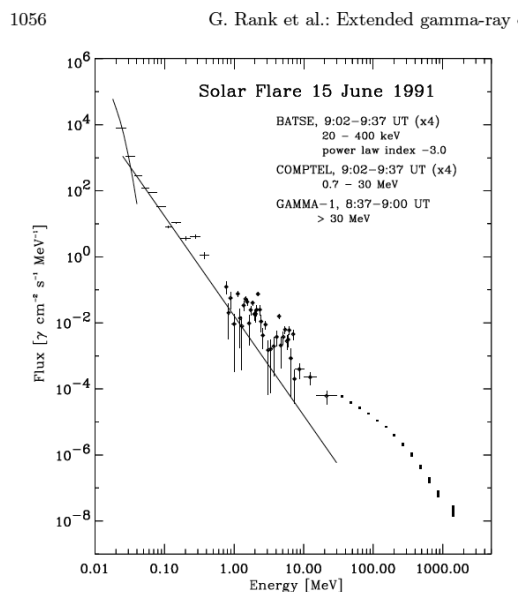


Fig. 10. Extended emission spectrum for the 15 June 1991 flare measured by different instruments.

図1. ガンマ線のエネルギースペクトル

3. 2017年9月10日のイベント

以上が前置きである。2017年9月6日と9月10日の両フレアで高エネルギーガンマ線と中性子がそれぞれ受信されていたが、ここでは2017.9.10 event が limb flare で真横から光学的観測ができ、きれいな data が取得されているので、今回は9月10日のイベントに的を絞って他波長観測と比較しながら、2017.9.10 に得られたガンマ線と中性子の data の解釈を紹介する。

図2はSDO data のスケッチである。生の写真分かりづらいので、スケッチで説明する。15:45UT から 15:55UT の10分間に盛んに磁気 loop 同士の衝突が見られる。これは野辺山の太陽電波観測グループが以前から主張してきた観測事実と同じである [7]。理論の坂井氏らが盛んに取り扱った X-type の衝突である [8]。

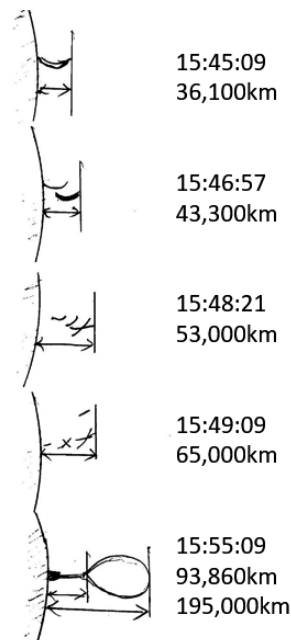


図2

図3は、FERMI-GBM 計測器の観測した硬エネルギー X 線のエネルギースペクトルの時間発展を示している。すなわち上記の 15:45-15:55UT の間に電子の peak energy は数 keV から 40keV まで増加している。電子が加速されている証拠である。最も高いエネルギーの電子は 200keV に至っている。その時刻は 15:56UT である。

図4は FERMI-LAT 衛星が観測した 高エネルギーガンマ線の時間発展を硬 X 線の時間発展と比較したものである。高エネルギーガンマ線 (HE- γ) の peak が硬 X 線の peak と 2 分ずれている点に着目してほしい。この図はさらに粒子を加速するのに 2 分間必要であったことを示している。すなわち高エネルギーへの加速は別の場所で起こっている可能性が高い。

図5は低エネルギーガンマ線 (LE- γ) と高エネルギーガンマ線 (HE- γ) の時間発展を示したものである [6]。15:56UT から低・高エネルギーガンマ線の放射が同じような時間発展をしているが、15:58UT から急激に高エネルギーガンマ線が放出されている。(図5の縦軸は対数であることに注意してほしい。)我々が SEDA-FIB 装置で受信した中性子は、地上 station で高エネルギー中性子が受信されていないことも考慮すると、LE- γ と同時刻に作れたと考えられる。すなわち 15:58UT までは電子とイオンに対して 同じような加速機構が働いていたと言えよう。

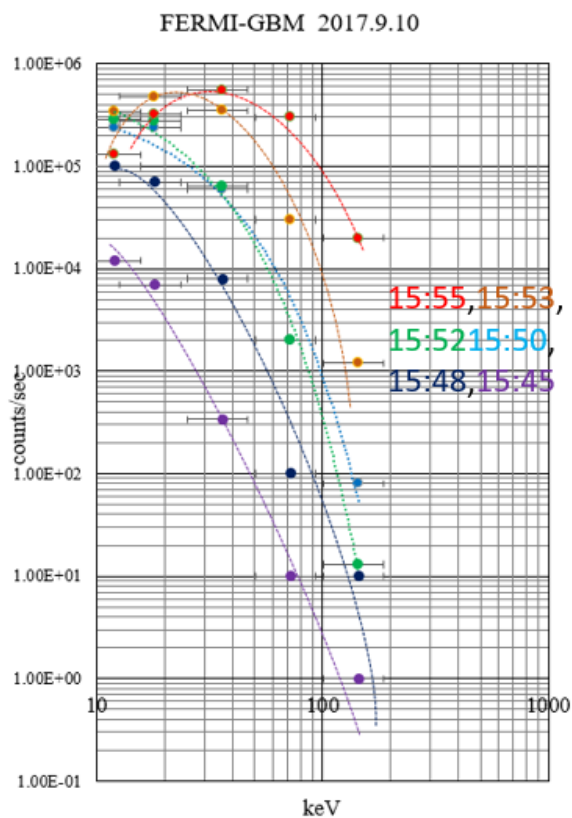


図3

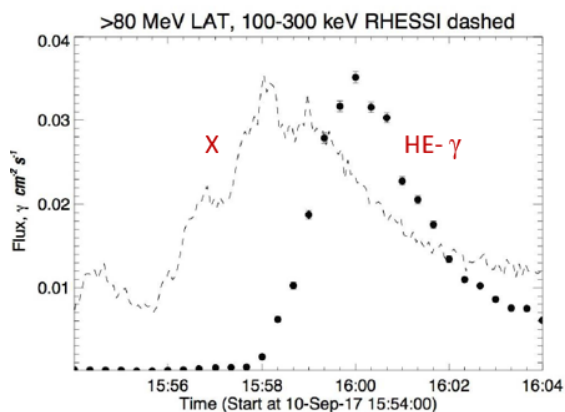


図4

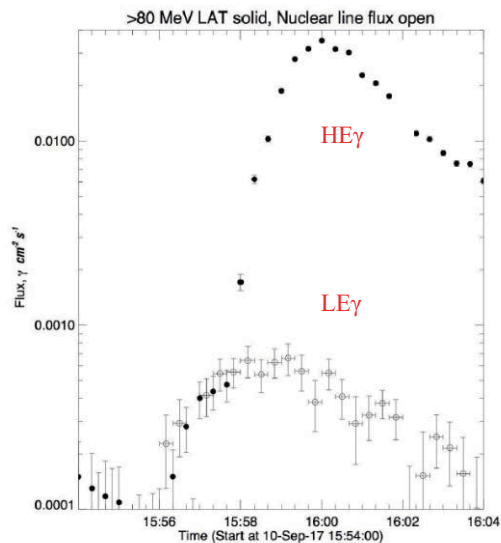


図5

図 6 に SEDA-FIB で受信した中性子の微分エネルギースペクトルを示す。中性子が太陽から地球に飛来する間に崩壊する効果は補正されている。エネルギースペクトルはべき 2 乗で表され、かなり硬いスペクトルであることがわかる。

4. 加速粒子の化学組成

ここで加速された粒子の化学組成について考察する。15:56UT の前と後で比較しよう。15:58UT 以前は、加速された粒子が太陽大気を叩いて低エネルギー・ガンマ線や中性子を作った時間帯である。中性 π 粒子の生成はまだ dominant に生成されていない。293MeV の pion 生成 threshold energy に到達している粒子が非常に少ないことが図 5 からわかる。

一方 15:58UT 以降は中性 π 粒子の生成が dominant になった時間帯である。この両時間帯について、 n/γ の flux の比をとると前者ではその比が ~ 50 であるのに対して、後者の時間帯では 1.6 ± 0.4 である。この比を GEANT4 による simulation の結果 [9] と比較すると (図 7)、前の時間帯ではヘリウム等の原子核が加速された粒子に多く含まれていたことを示唆している。これは impulsive flare の典型である。一方後の時間帯では、陽子が主成

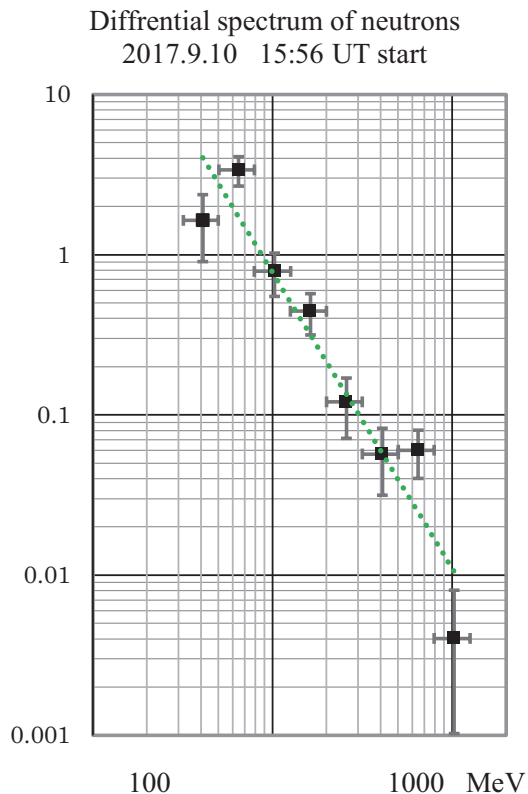


図 6

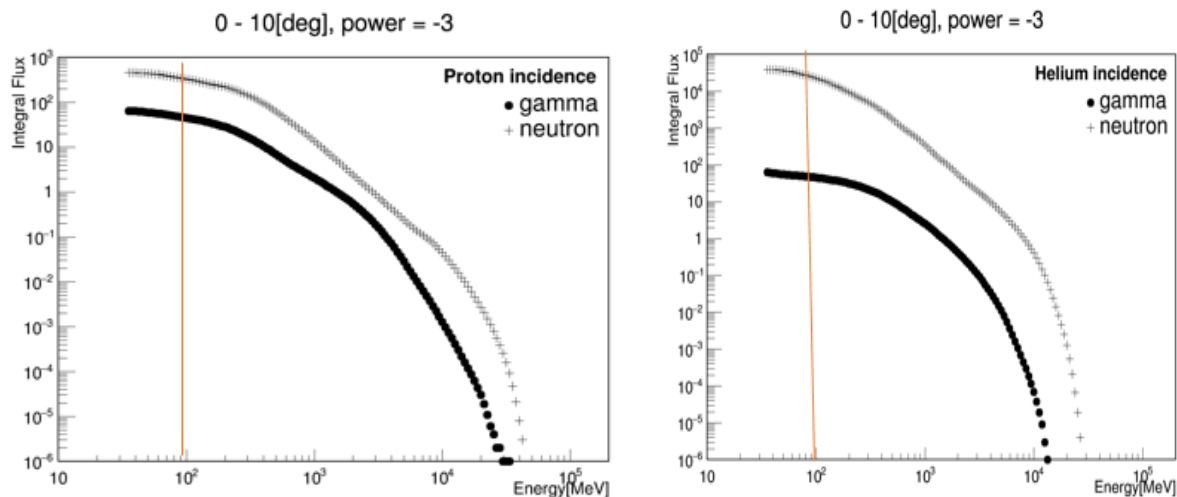


図 7.(左)陽子の衝突の場合(右)ヘリウムの原子核が太陽大気に衝突した時のガンマ線(●)と中性子(+)の期待される頻度分布。横軸は n と γ の閾値で、積分スペクトルである。太陽大気 $10\text{g}/\text{cm}^2$ 通過した時、進行方向から 10 度以内に放出された n と γ の積分 flux である。

分として加速されたことを示しており、これは **gradual flare** の典型的な値である。図 7 の 100MeV に引かれた縦線は FERMI-LAT の観測閾値に対応している。SEDA-FIB は 35MeV 以上の中性子を検出できるが、ここでは FERMI-LAT の閾値と合わせるために >100MeV 以上の中性子を選択している。ヘリウムイオンが太陽大気に衝突した時は n/γ 比が約 1000 倍と予想される。これは加速された原子核が衝突により陽子と中性子に破碎され、その中性子が太陽から地球にやってくるためである。加速イオンのべきは 3 乗 (E_{ion}^3) を仮定し、観測点は太陽大気の厚み 10g/cm^2 の地点としている。現実には様々な化学組成でもって衝突するのでこのグラフのように 1000 倍にはならないだろう。

今回の flare では impulsive phase の中にすでに gradual phase と同じ加速機構が含まれていたことが分かった点が新しい。そして中性子と高エネルギーガンマ線の同時観測から、現象論的に説明されてきた、“impulsive flare では helium ion 等が多く含まれている”という“予測”を、観測で実証できた点が新しい。さらに gradual flare では確かに陽子が主成分となって加速されていることも分かった。我々は 1994 年来の Reames らの予測を、加速現場を反映するその場 (in-situ) 観測で示したと言えるだろう。

5. まとめと今後の課題

1. SEDA-FIB で受信している中性子は、電子とほぼ同時に加速されたヘリウムイオンが太陽大気と衝突した際破碎され、地球近傍に飛来したもので、低エネルギーガンマ線 (a few MeV, LE- γ) と同時に作られたと考えるのが妥当であろう。LE- γ の方は target になった太陽大気の破碎や励起によって作られたものであろう。
2. 一方、高エネルギーガンマ線 (HE- γ) はさらに加速された陽子によって作られたものである。しかしその生成場所は観測では分からなかった。加速過程はおそらく中性の衝撃波によるものであろう。地上観測で高エネルギー中性子の観測例が少ないのは、おそらく次のステップまで加速が進むような磁場構造が太陽表面に実現されにくいからであろう。
3. 電子やイオンの加速が衝撃波波乗り加速モデルによるソリトン波の作る電場による可能性が非常に高いが [10]、その場所、及び時刻が 磁気ループが盛んに発生していた時刻なのか (15:45-15:55UT)、プラズモイドが出現した 15:55UT かまでは同定できなかった。
4. 衝撃波波乗り加速理論 [10] は、リコネクションから放出された jet が、jet 先端で $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ のローレンツ力を受け正イオンと負イオンに分離され、その作り出す電場により 磁気 loop 内に trap されていた加熱されたプラズマが加速された考えと等価のように思われる [11]。
5. 今回のシンポジウムで神戸大学の group がはやぶさイオンエンジンに関して講演された内容は [12]、プラズマの加熱に関する面と共通していると思われ大変興味深いものであった。太陽表面から nano flare, micro flare が原因で作られた Alfvén 波が磁気 loop 内のプラズマをサイクロトロン共鳴により加熱し、加速に必要な warm 粒子をすでに準備していたと思われる。おそらくその平均温度は電子で 10keV 程度であったと思われる。だ

がそこまで加熱できるかはまだ確定していない。ひょっとしたら加熱も jet が他の磁気 loop と衝突する箇所で何度も繰り返し起こっている可能性も考えないといけないだろう。

最後に太陽表面における粒子加速過程、CERN の素粒子加速過程と比較すると分かりやすいので図 8（下図）に比較図を載せる。

References

- 1) Reames, D.V. (1994) Adv. Space Res. 15 (7) 41.
- 2) Fisk, L.A. (1978) ApJ, 224, 1048.
- 3) Tsuneta, S. and Naito, T. (1998) ApJ, 495, L67-L70.
- 4) Hillas, A.M. (1984) Ann. Rev. Astro. Astrophys. 22, 425-444.
- 5) Rank, G et al. (2001) A&A, 378, 1046.
- 6) Share and Murphy (2018) AMS spring meeting での講演スライドより。
- 7) Hanaoka, Y. (1999) PASJ, 51, 483.
- 8) Sakai J.I. and Shimada, K. (2005) A&A, 436, 711-717.
- 9) Kamiya, K. et al.; Proceeding of ISVHECRI2018 (Nagoya, Japan) in press.
- 10) Amano, T. and Hoshino, M (2007) ApJ, 661, 190.
- 11) Chen プラズマ物理入門 page.13, (丸善出版) を参照。
- 12) R. Shirakawa et al., 本講演集。

図 8. 人工加速器と自然加速器の比較図。人工の加速器では例えば陽子は、まず線形加速器で加速され、その後ブースターに挿入され数 GeV まで加速される。加速に使用されるのは電場である。粒子が 加速空洞を通過するたびに $F=eE$ による加速を受ける。そして数 10GeV に加速された陽子を主リングに挿入しさらに加速空洞で高いエネルギーに加速する。地下鉄の名城線一周のトンネルで加速さ

れる陽子は 7000GeV である。一方太陽表面の加速は電子で 2keV, イオンで 20keV 程度の熱的プラズマが、加熱され約 10 倍のエネルギーを有して磁気 loop に蓄積されており、その磁気 loop が衝突することで約 1000 倍に加速されるものと思われる。自然の加速器は colliding machine と言えるだろう。この時低エネルギーガンマ線と中性子が s 作られる。さらに 10~100 倍高いエネルギーへは衝撃波加速が働いていると考えられる。

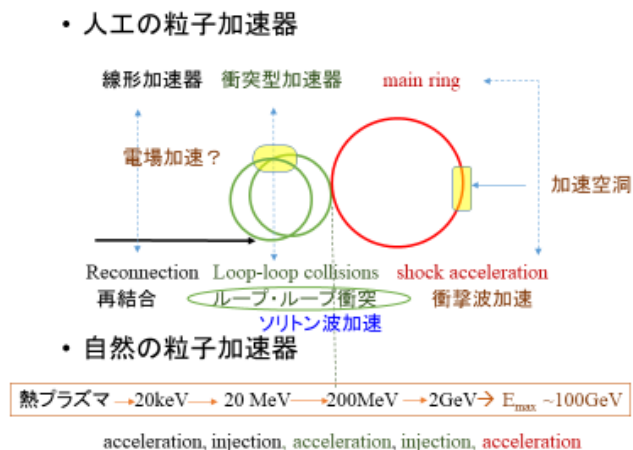


図 8

Appendix SEDA-FIB の歴史

2018.3.31 日でもって SEDA の運用は終了した。ここでこの project の歩みを振り返り、次の世代の計測機器搭載・運用の参考になればと point を思い書き残しておく。

宇宙ステーションに搭載する機器の選定は次のように進んでいった。1991 年 12 月から 1992 年 3 月にかけて JAXA の前進である NASDA は宇宙環境計測装置の外部アドバイザーグループを設置し、JEM 運用上の必要なデータ、宇宙実験に必要な環境データについて計測項目の有りだし、計測の意義と特徴、計測対象の要求計測範囲と精度についてサーベイ研究を行い、20 項目の計測項目をユーザー要求としてまとめた。1994 年度から産学官の 19 名によるフロンティア研究がスタートした。研究テーマは

- 1) 宇宙環境計測用検出器技術の研究。
- 2) 宇宙環境計測データ解析、地上試験、宇宙環境のモデル化等に関する技術研究。
- 3) 部品・材料に関して宇宙環境が及ぼす影響に関する研究、である。

20 項目の中から 11 項目を観測項目として選択した。

この期間、村木は早稲田にあった NASDA の外部機関 JSUP に会議のために何度も足を運んだ。村木が呼ばれたのは、名大に移って間もないころ、名大 STE 研の宇宙線部の仕事として太陽中性子の計測を旗に掲げて研究を始めていたのが、NASDA の五家建夫氏の目に留まったのがきっかけである。そのころの idea の一つに、のちに京大総長になられた松本氏の idea があり、宇宙で発電した電気をマイクロはで地上に送るというものも議論された。また宇宙天気予報という言葉が初めて通信総合研究所の菊池氏によって語られたのもこの JSUP の会議の中であった。JSUP は文部省ではなく、科学技術庁の管轄下にあったように思う。また宇宙における放射線線量の内、中性子の部分が未測定に近い状態でかなりの曖昧さがあったのも必要な条件に考えられたのであろう。当時の早稲田の道家忠義氏の科学朝日 1989 年 9 月号に何が問題かがまとめられている。

特に日本独自の戦略的研究テーマ、いわゆる目玉ミッションとして中性子の計測が一位で選考された。そして 1997 年 4 月に宇宙環境計測が暴露部初期利用テーマとして公募課題の中から採択された。1997 年 5~6 月に予算と ISS の I/F 設計の制約から、11 項目から 8 項目に絞り込みが行われ、2001 年に flight module (FM) が完成した。この FM は順調にいけば、太陽活動最盛期のフレアのモニターができるはずであった。しかし物事は順調には進展しなかった。あの有名な悪夢である、スペースシャトル・チャレンジャーの事故が発生し、安全性が確保されるまで、お預けになった。この間観測装置は NASDA の恒温槽に大切に保管されていた。2008 年再開となり、JAXA 筑波で調整後、2009 年 7 月 16 日スペースシャトル・エンデバーによって打ち上げられ、7 月 25 日暴露部に設置、8 月 25 日から data の取得を開始した。Event rate は 0.047Hz である。提案から観測開始まで実に 18 年の歳月が流れた。この間、暴露部に搭載されるのか否かの再審査もあり、五家建夫氏と共に気をもんだこともあった。

中性子の観測に関してはほぼ得るものは得られたと言えるが、一つやれなかったことは中性子が受信されるような **events** には高エネルギーの荷電粒子が飛来するのが常であるのでその場観測でもって、ISS に滞在する宇宙飛行士に警報を出すことを当初目標に置いていたが実現しなかった。これは宇宙センターで絶えず人を一人貼り付けておく必要があるわけで、今後は AI の技術の発展に伴い、AI を導入するシステムを運用することが必要だろう。なお SEDA は理工学の分野の **mission** として選考されたが、宇宙科学の分野の選考は ISAS が中心で実施され、松岡さんらの MAXI が選ばれた、次のミッションとして鳥居さんたちの CALET が運用中である。

以下に毎日新聞 2017 年 10 月 26 日号の記事を載せておく。今後宇宙での活動は月面上空や火星が主流になっていくであろう。そのとき月面上空での放射線環境のモニターや、月面上の水探査に中性子の信号が利用されるであろう。我々が 9 年近く ISS で観測した know-how はきっと次の日本のミッションに生かされるであろう。

月軌道に宇宙ステーション

米航空宇宙局(NASA)は24日までに、2020年代に月近くの軌道上に、飛行士が長期滞在できる宇宙ステーションを新たに建設する構想を明らかにした。30年代に実現を目指す火星有人探査の中継点とする狙い。

無人探査機を月軌道に送り込んだ後、居住棟などをドッキングさせて段階的に拡張する。既に各国に協力を打診し、宇宙航空研究開発機構(JAXA)も参加の可否について検討を始めた。17年後半に東京で開かれ、各国が宇宙協力を話し合う「国際宇宙探査フォーラム」でも主要議題になる見通し。ただ建設に巨額の費用がかかる上、月面某地を構想するロシアなど思惑の違いもあって先行きは不透明だ。

NASAは火星への往復に3年近くかかると思われている。10月にNASAが公表した報告書によると、新たなステーションは地球と月の重力の作用

金日 10/26
NASA構想 火星探査中継点に



で姿勢制御に必要なエネルギーが少なくて済む月軌道上に建設する。

火星の前段階として小惑星の探査を計画しており、20年代初めに無人探査機で小惑星の岩石を採取し、月軌道に投入。その後、次世代宇宙船オリオンに乗った飛行士2人が訪れて岩石組成を調べ、さらに大型ロケットで必要な資材を運び、順次ドッキングさせて規模を拡張。20年代終わりに数人が長期滞在できる居住空間をつくる。

飛行を続ける。
地球から月までの距離は約40万^キ。地球の支援を受けずに飛行士が活動するための技術を開発するための「試験場」としても月軌道ステーションを位置付けている。