

PSTEP-SEP-CDAW2

太陽高エネルギー粒子の モデリング・火星へ

片岡龍峰

国立極地研究所

2019年8月6日@東北大学

内容：100 MeVより高いか低いかな…

- 基本的なこと（30分）
 - コロナ質量放出と太陽高エネルギー粒子の関係とか、被ばくとか
- 地球上、どうやったか（30分）
 - 100 MeV以上のSEPモデリング、ワサビーズの紹介
- 火星で、どうするか（30分）
 - 100 MeV以下のSEPモデリング、ワサビーズの先へ

基本的なこと

コロナ質量放出と太陽高エネルギー粒子の関係とか、被ばくとか

ややこしい用語から

- CME: Coronal Mass Ejection

- 日本語では、コロナ質量放出。コロナグラフで確認できる、プラズマの爆風や衝撃波のこと。太陽フレアはビカッと光る現象で、区別する。

- SEP: Solar Energetic Particles

- 日本語では、太陽高エネルギー粒子。原因が太陽フレアかコロナ質量放出かわからないけど、太陽圏の内部で加速された非熱的粒子のこと。イオンでも電子でもいい。太陽プロトンとは、プロトン版SEPのこと。

- ESP: Energetic Storm Particles

- 特に、惑星間空間衝撃波が通過するときにSEPが増える現象のこと。

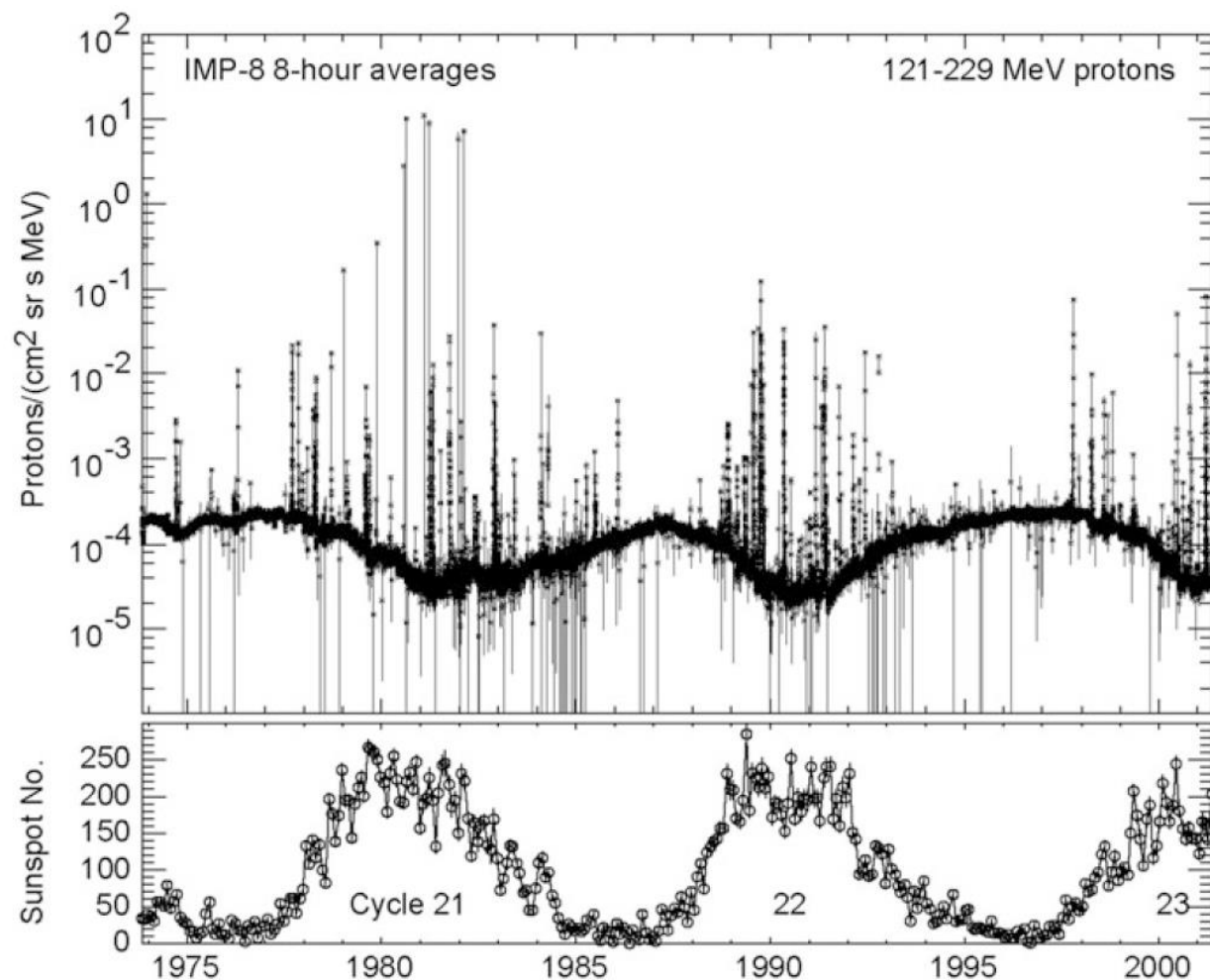


Fig. 1.8 Intensities of 120–230 MeV protons in 8-h averages from the Goddard IMP-8 telescope are shown over 27 years in the upper panel. Spikes from individual SEP events reach a factor of 10^5 above a counter-cyclical baseline of galactic cosmic rays which the instrument also measures well. The monthly international sunspot number is shown in the lower panel for comparison

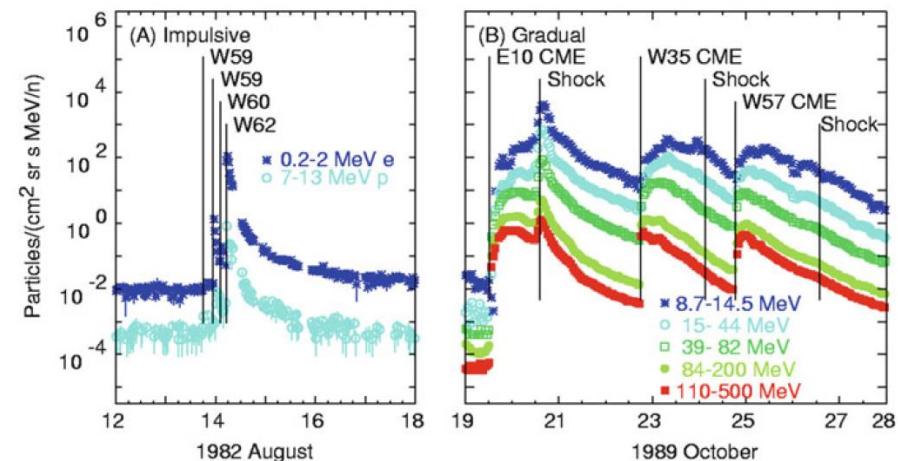


Fig. 1.5 Particle intensities are shown for a series of (a) impulsive and (b) gradual or long-duration SEP events at similar time and intensity scales. *Flags* labeled with the source longitude indicate the onset times of the events; also shown are the times of shock passage. Proton (or electron) energies are listed. It is difficult to obtain comparable proton energies because impulsive events are much less energetic (Reames 1999)

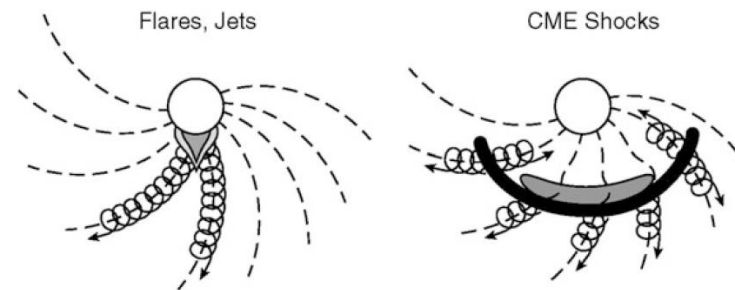


Fig. 1.4 Impulsive (*left*) and gradual (*right*) classes of SEP events are distinguished by the probable sources of particle acceleration in each case (Reames 1999). Impulsive SEP events are accelerated in magnetic-reconnection events on open field lines (i.e. jets) in the corona. Gradual SEP events are accelerated at shock waves (*solid black*) driven out from the Sun by CMEs (*gray*). Particles are shown as spirals along B (*dashed*)

CME運動エネルギーの数割がSEPになる

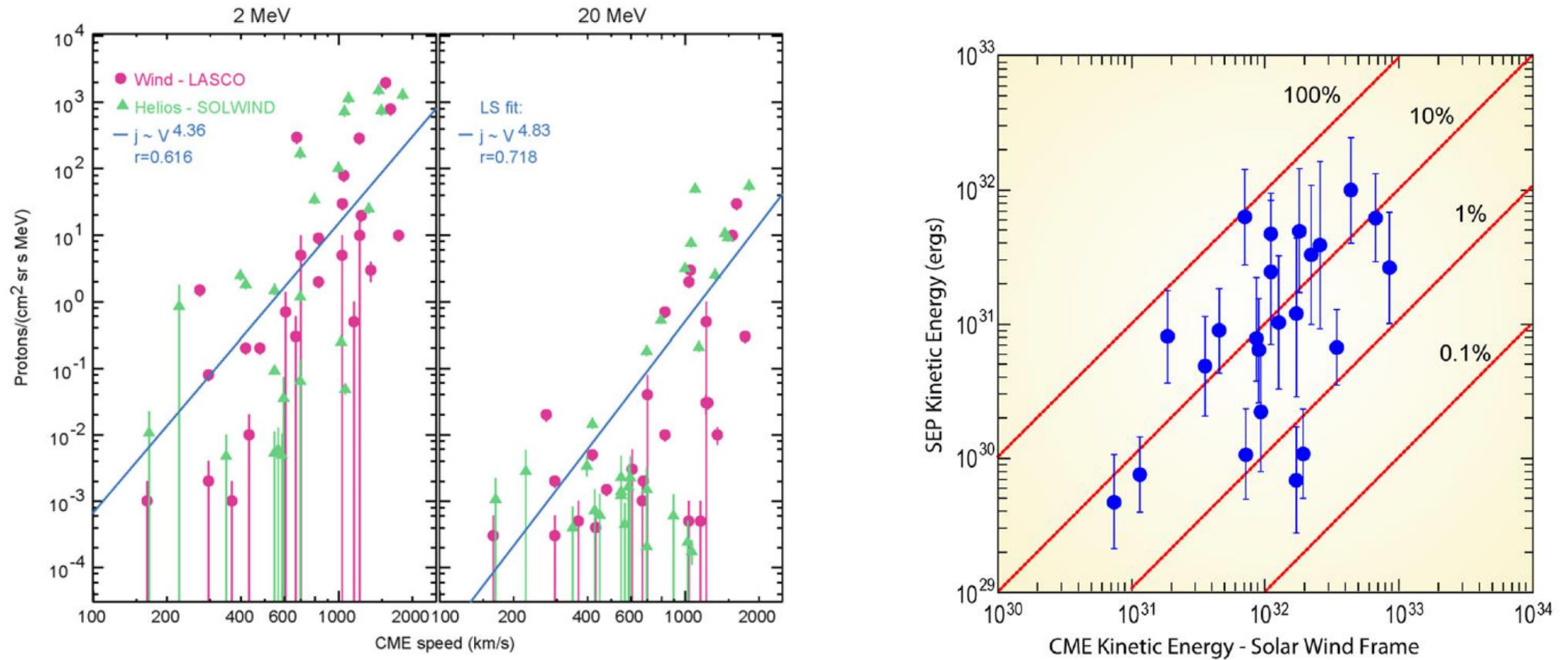


Fig. 2.11 Peak intensity is shown vs. CME speed for 2 MeV (*left*) and 20 MeV (*right*) protons for two event samples (see text). Power-law least-squares fits and correlation coefficients (r) are shown (see Kahler 2001)

フェルミ加速

- 作戦：衝撃波でフェルミ加速された粒子がSEPだと思ってモデリングする。
- 到達できるエネルギーは衝撃波の磁場に比例する。
 - 衝撃波と磁場の角度が変わるとエネルギーアップの効率が変わる

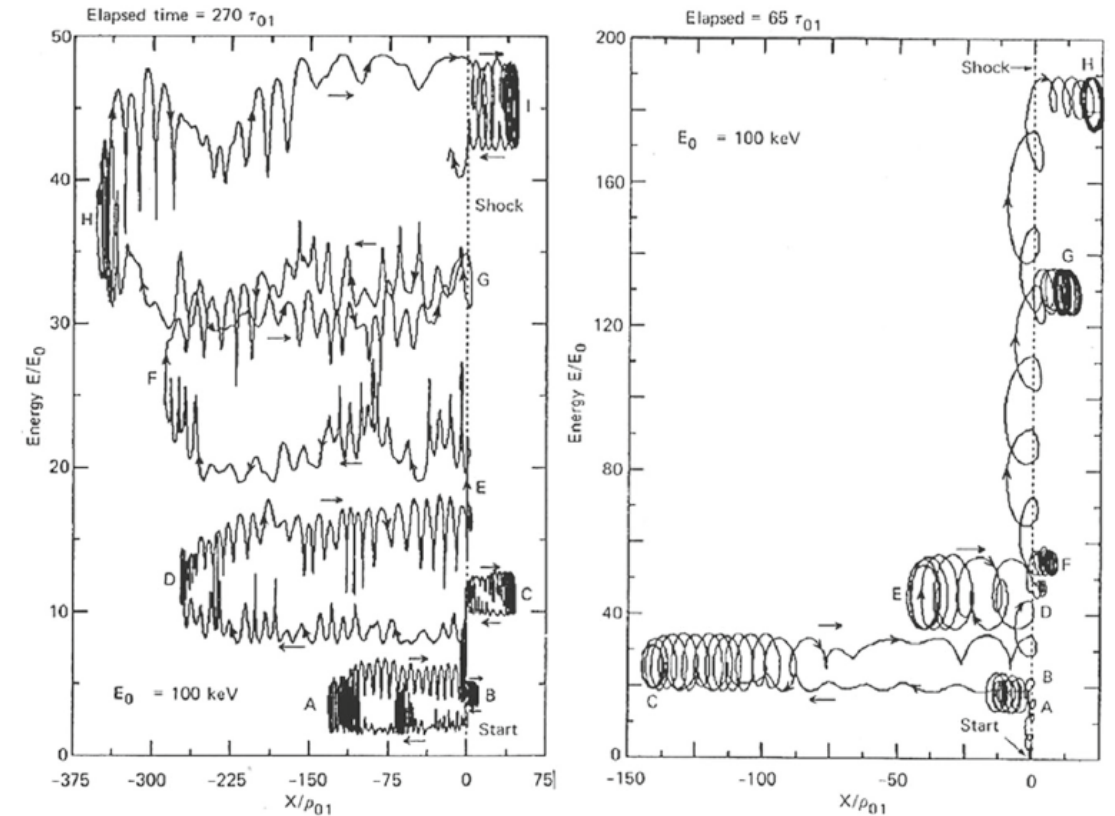


Fig. 61 Numerical simulations of trajectories of individual charged particles moving through kinematically prescribed, turbulent electric and magnetic fields in the vicinity of two different shocks. The trajectories are displayed with kinetic energy along the vertical axis and position, relative to the position of the shock, which is fixed along the *horizontal axis*. In this frame, plasma flows from the upstream region at *left* to the downstream region at *right*. The average upstream magnetic field for the shock on the *left* makes an angle of 15° relative to the shock normal. This is a nearly parallel shock. The shock on the *right* has an average upstream shock-normal angle of 60°, making it a quasi-perpendicular shock. The particle on the *left* was followed for 270 gyro-periods (using the average upstream magnetic field) and the one on the *right* for 65 gyro-periods. See the text for more details. Image reproduced with permission from Decker (1988), copyright by Kluwer, who adapted it from Decker and Vlahos (1986)

フェルミ加速の最大エネルギー

$$E_{\max} = \frac{3}{20} \frac{1}{\xi} V_s Z e B R \quad \text{動電場とサイズの積、} \xi = 1 \text{ がボーム極限}$$

$$E_{\max} \sim 9 \times 10^9 \frac{\xi}{0.1} \frac{V_s}{4 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}} \frac{B}{10^{-5} \text{ T}} \frac{R}{0.1 \text{ AU}} \text{ eV}$$

10 GeVプロトンまで衝撃波加速の可能性（現在の太陽コロナの全力）

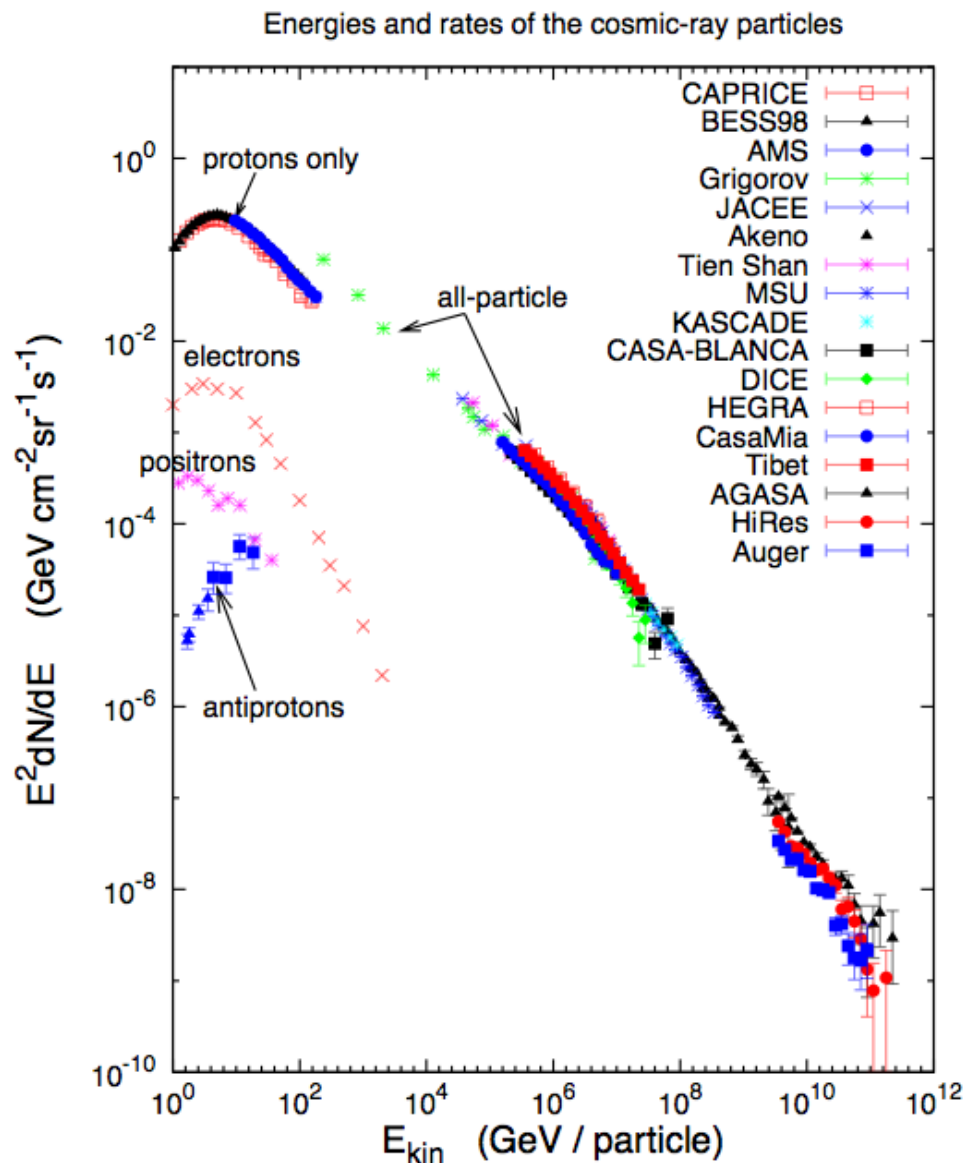
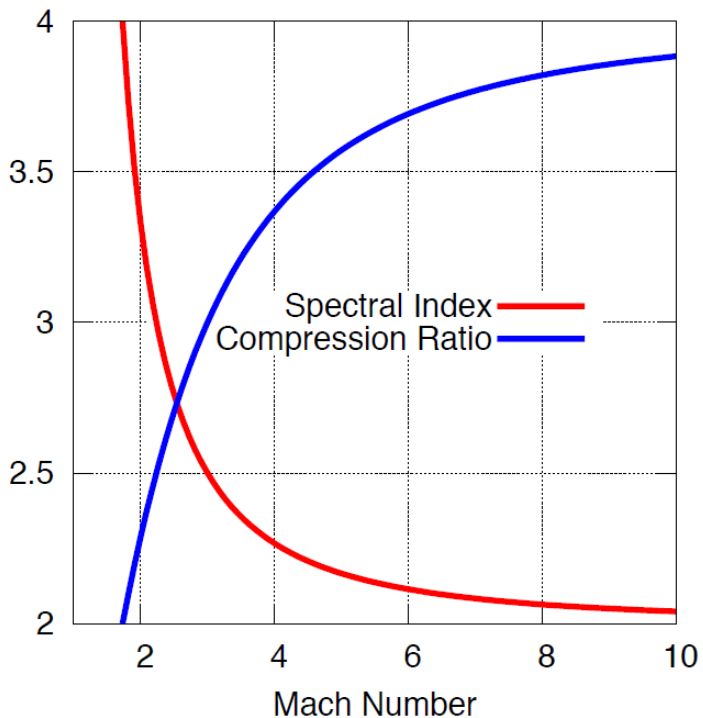
常にある銀河宇宙線 GCR: Galactic Cosmic Raysもフェルミ加速なので、まあ時定数など違うが同じ仲間である。

$$dN/dE \propto E^{-s}$$

単に「宇宙線」は銀河宇宙線のことを言うことが多い

$$s = \frac{u_1 + 2u_2}{u_1 - u_2} = 2 \frac{1 + M^{-2}}{1 - M^{-2}}$$

「宇宙放射線」というと、銀河宇宙線+SEP+地球の放射線帯粒子、のことを言うことが多い



Gaisser 2006

宇宙天気のプロフローチャート

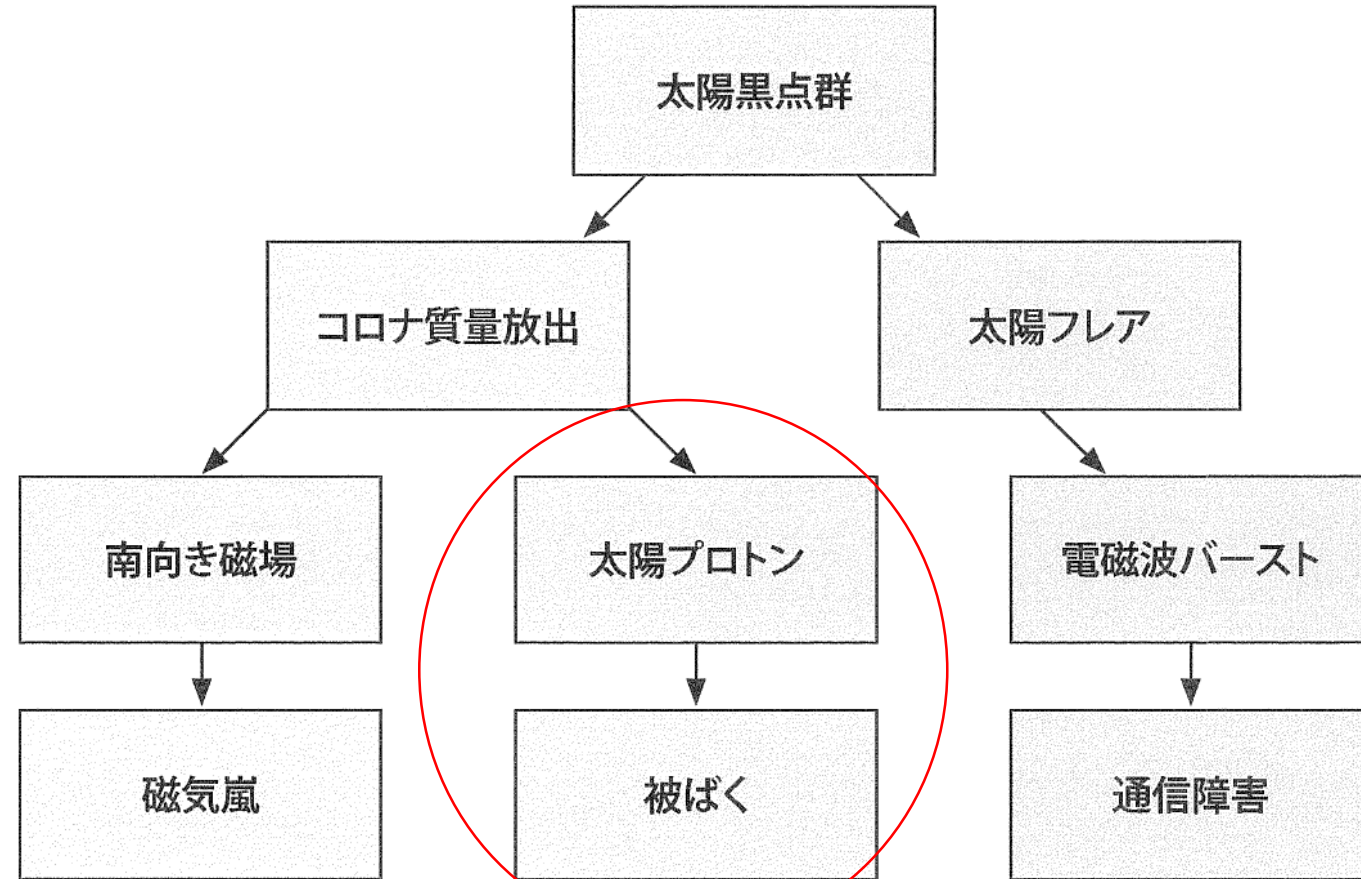


図1-3 太陽活動と宇宙災害。南向き磁場とは、地球磁場とは逆向きの太陽からの磁場

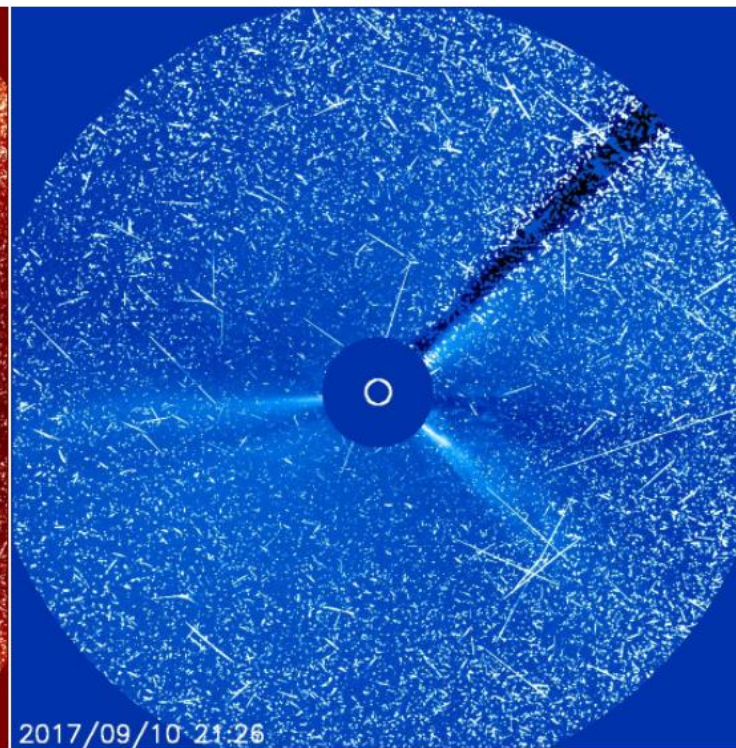
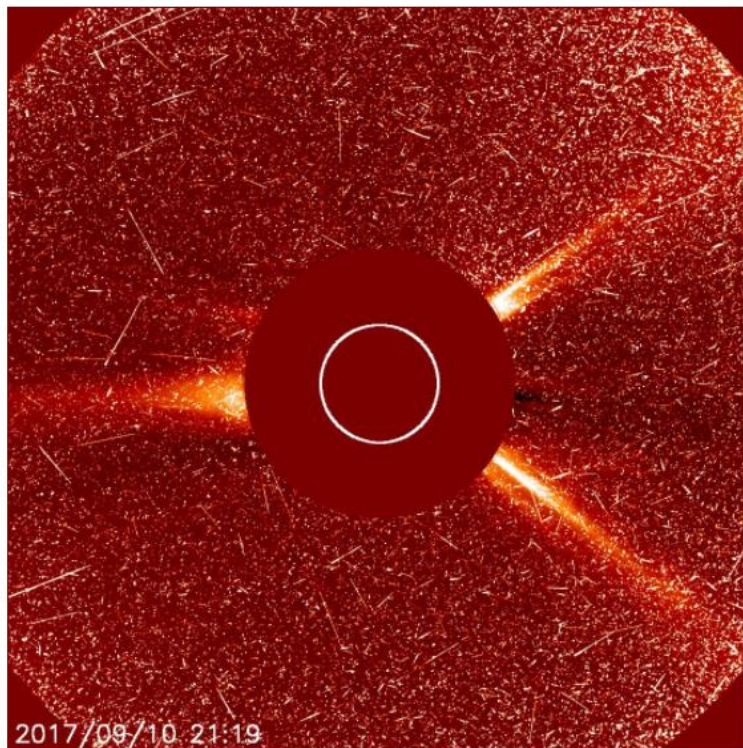


片岡龍峰

@ryuhokataoka



放射線が大量に来て雪景色のようになっています！



7:26 - 2017年9月11日

641件のリツイート 835件のいいね



アポロ、ミール、あかつき

- 1972年4月27日、アポロ16号が月から帰還
 - 1972年8月4日、大量の太陽プロトンが発生
 - このときもし月面で船外活動していたら致死量の10 Svを超える被ばく量
- 1989年10月19日、宇宙ステーションで避難
 - 1972年8月に匹敵する太陽プロトン
 - このとき新潟でもオーロラ。1958年2月11日以来の事件。
- 2012年7月23日、あかつきが被ばく
 - 1972年8月に匹敵するスピードのコロナ質量放出
 - 太陽電池が劣化

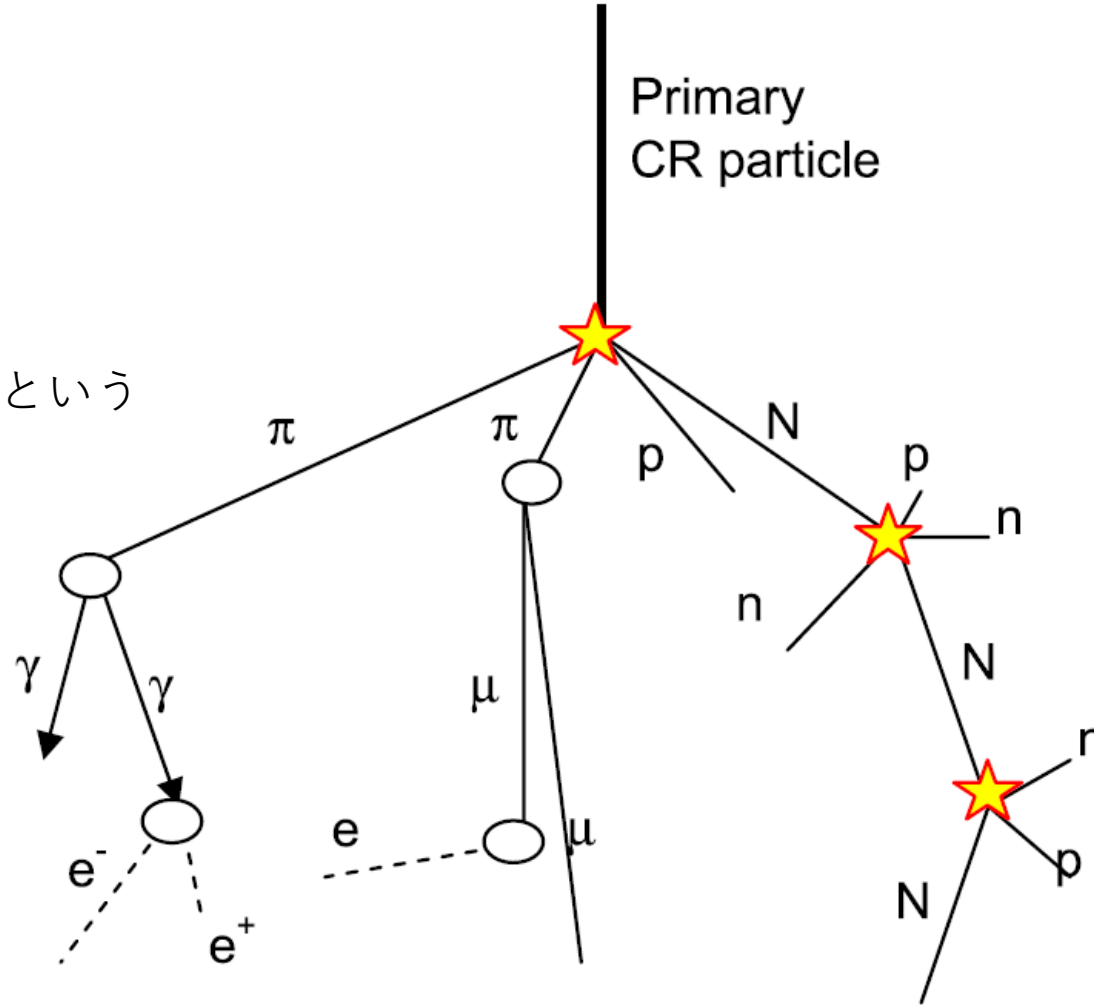
いずれも極大期付近

宇宙でなく、大気中の航空機では？

見えない「空気シャワー」の中を進んでいる

空気シャワー = 2次宇宙線

「核破砕反応」という



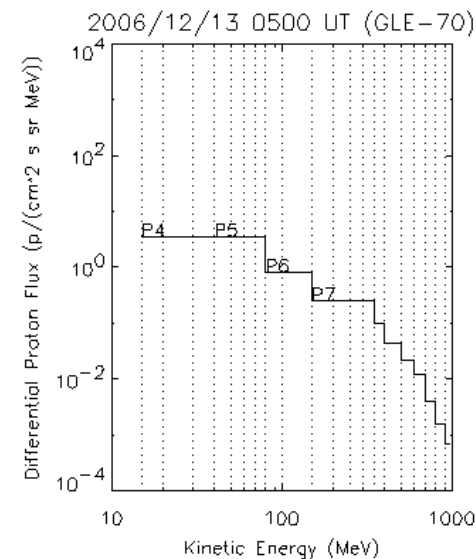
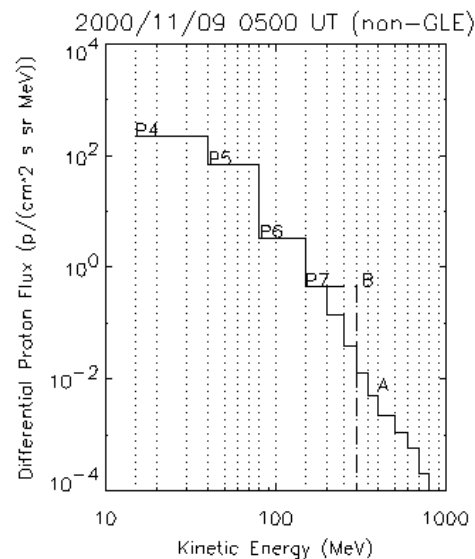
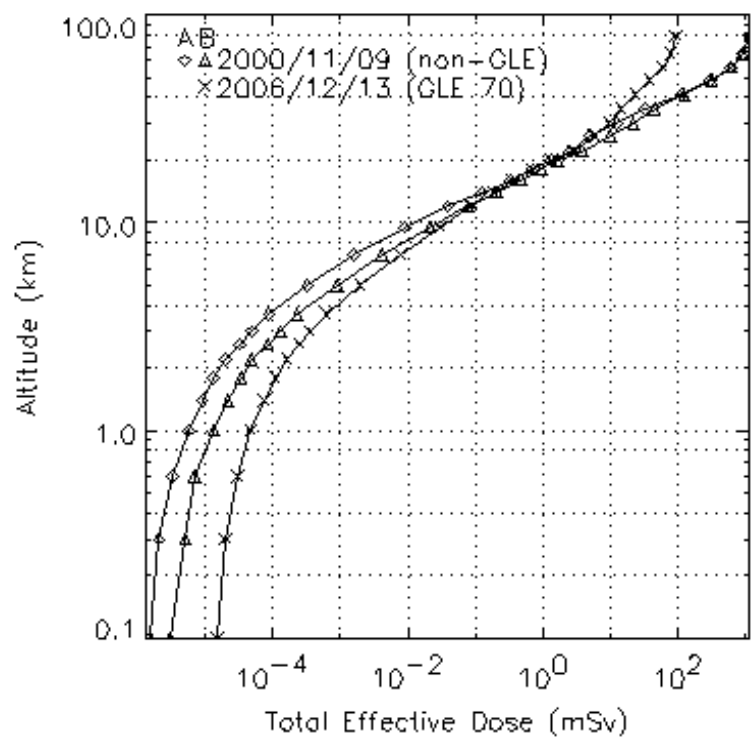
大気シエルターで宇宙線が吸収される途中経過。最後に、ろ過されたミュオンや中性子が地上に届く

地上で中性子が検出されると「GLE」と呼ばれる。Ground Level Enhancement あるいは Ground Level Event

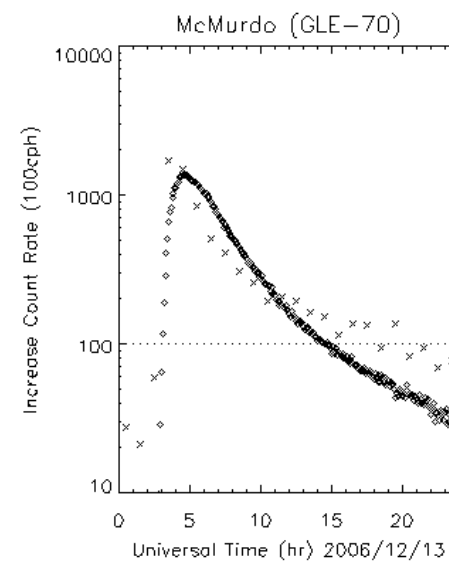
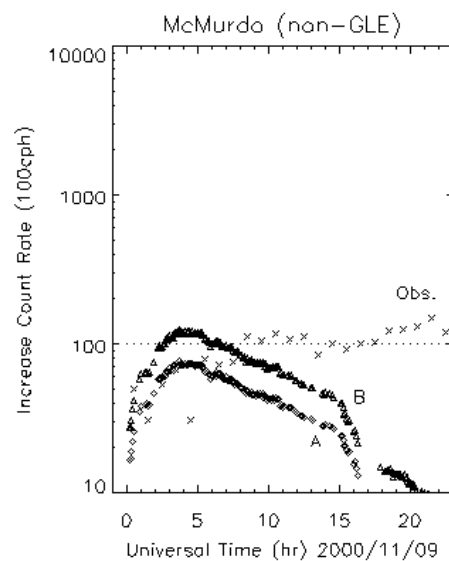
空気シャワーの計算例

GOES観測スペクトル例

トータル被ばく量



中性子モニタとの比較

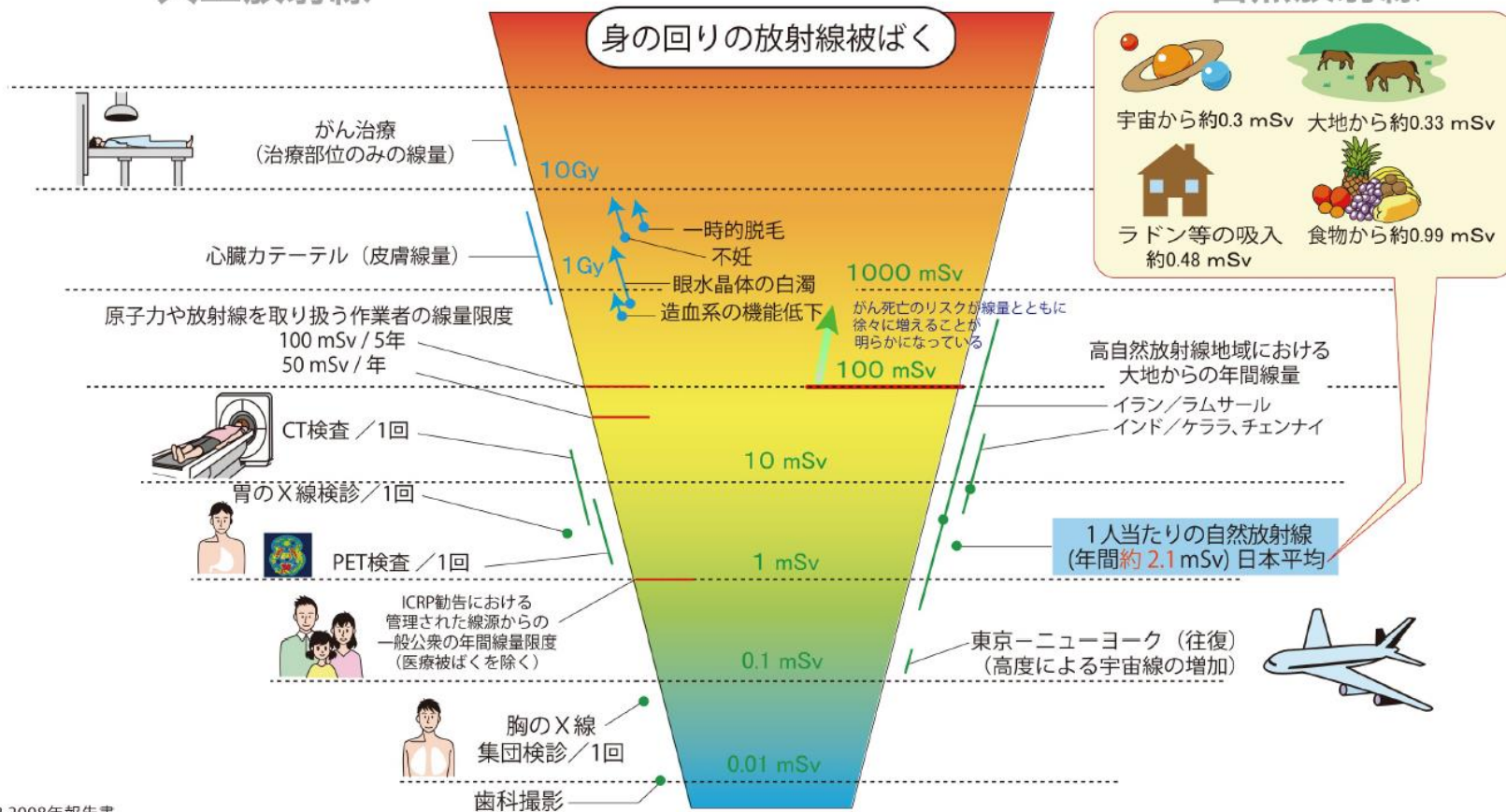


すごいSEPなのに、GLEにならなかった→

放射線被ばくの早見図

人工放射線

自然放射線



- ・ UNSCEAR 2008年報告書
- ・ ICRP 2007年勧告
- ・ 日本放射線技師会医療被ばくガイドライン
- ・ 新版 生活環境放射線 (国民線量の算定) などにより、放医研が作成 (2013年5月)

【ご注意】

- 1) 数値は有効数字などを考慮した概数です。
- 2) 目盛 (点線) は対数表示になっています。目盛がひとつ上がる度に10倍となります。
- 3) この図は、引用している情報が更新された場合変更される場合があります。

【線量の単位】

各臓器・組織における吸収線量: Gy (グレイ)

放射線から臓器・組織の各部位において単位重量あたりにどれくらいのエネルギーを受けたのかを表す物理的な量。

実効線量: mSv (ミリシーベルト)

臓器・組織の各部位で受けた線量を、がんや遺伝性影響の感受性について重み付けをして全身で足し合わせた量で、放射線防護に用いる線量。

各部位に均等に、ガンマ線 1 Gy の吸収線量を全身に受けた場合、実効線量で1000 mSvに相当する。

QST 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

放射線医学総合研究所

<http://www.qst.go.jp>



Ver160401

極航路でいくら被ばくしても

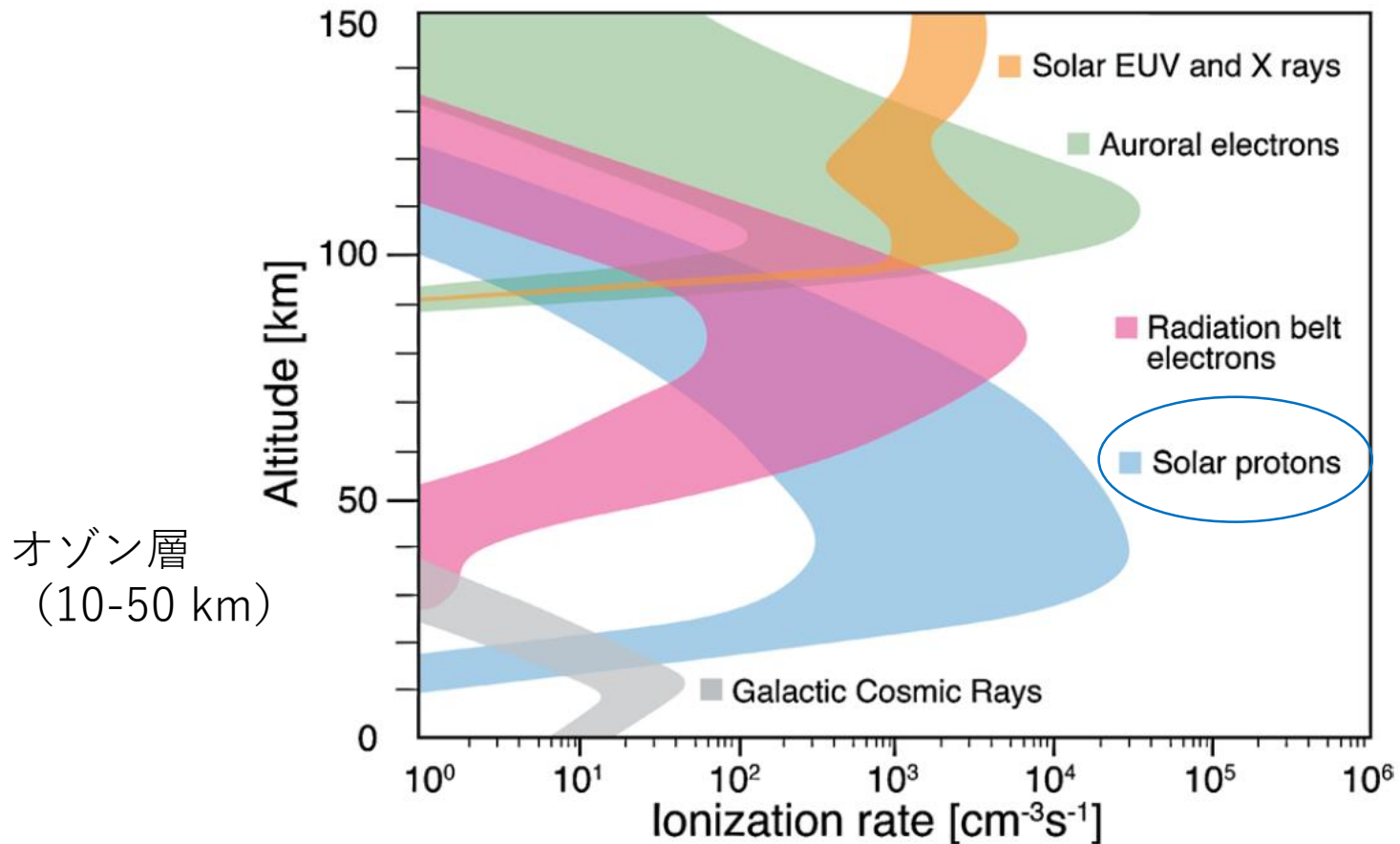
- たかだか1 mSv程度なので、健康に影響ないレベル
 - 胃のX線検診よりも安全
 - 乗務員、航空機を頻繁に利用するビジネスマンは…
- 年間を通して宇宙線で被ばくする量のほうが、太陽プロトンのより多い
 - 極大期よりも、極小期のほうが、結局は被ばくする
- 通信等の不具合など他の心配がある
 - 太陽プロトンが極域の大気を電離して短波通信できない
 - このとき極域のオゾン層も破壊される

ハロウィンイベントのときには、極域でオゾン層が半減した。

窒素酸化物のことをシーオーツーみたいに

NO_x = オゾン層破壊の触媒

I. Mironova et al.



オゾン層
(10-50 km)

銀河宇宙線よりエネルギーが低いので、大気の中で吸収されてストップする、よくオゾン層を壊す

地球で、どうやったか

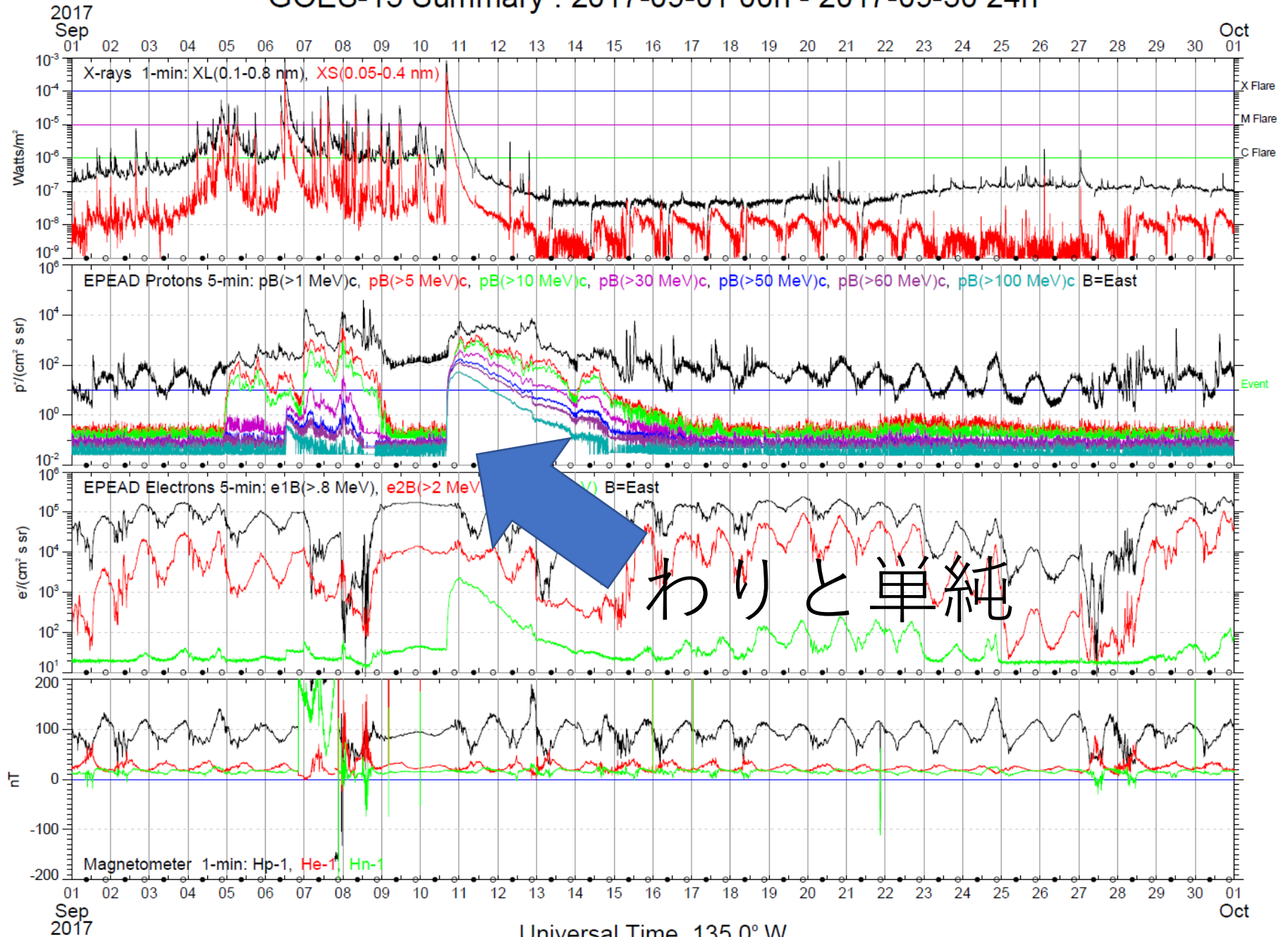
100 MeV以上のモデリング

ワサビーズの紹介

航空機被ばくを予報するには？

- 場所（地磁気の強さや形状）が大事
 - 太陽プロトンは宇宙線よりエネルギーが低く、地磁気で多くを防げる
 - ただし極域は、地磁気の穴になっているため、極航路を飛ぶときには、太陽プロトンによる被ばくが無視できない
 - 航路ごと異なる空気シャワーをシミュレーションする必要がある
- 激しい時間変化の物理
 - 銀河宇宙線はゆっくり変化する
 - 太陽プロトンはどんどん状況が激変する
 - 衝撃波で生まれ拡散する陽子をシミュレーションする必要がある

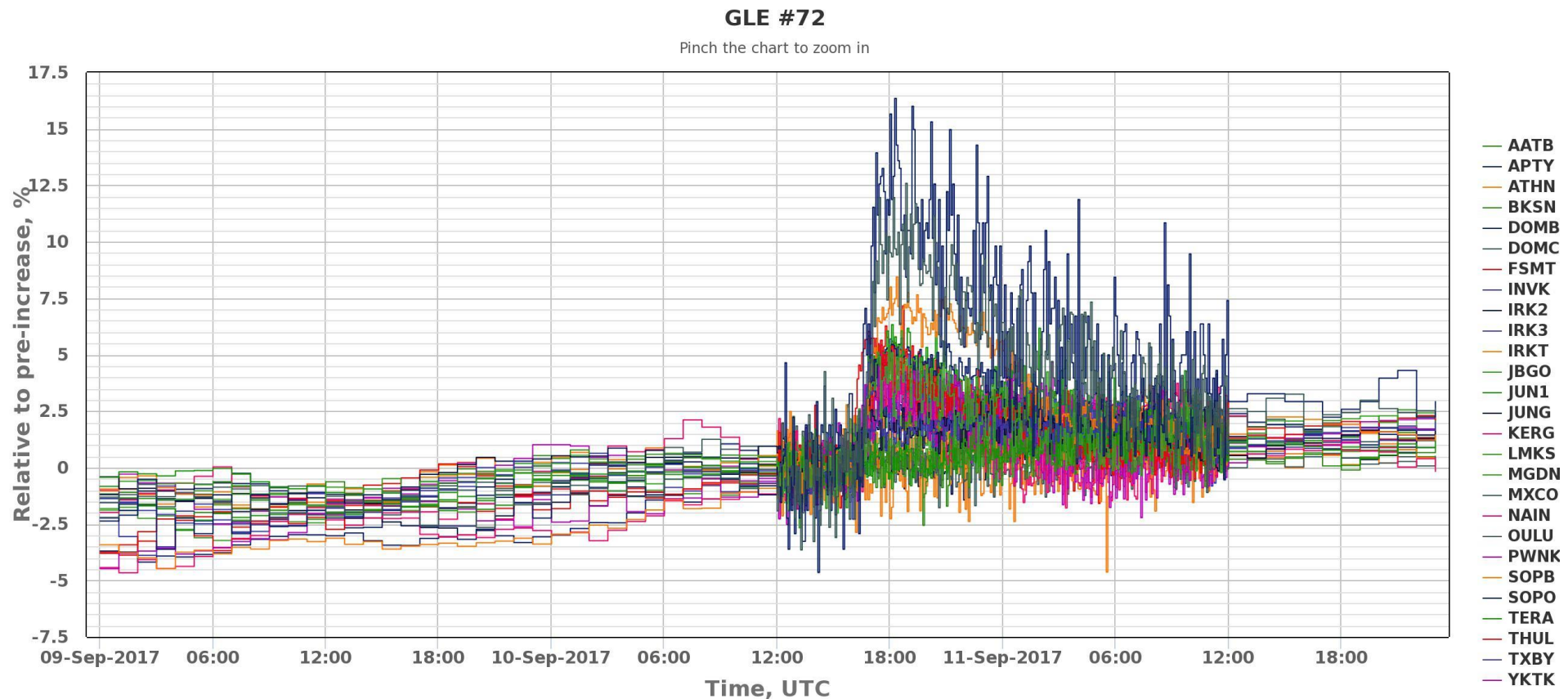
GOES-15 Summary : 2017-09-01 00h - 2017-09-30 24h



Universal Time, 135.0° W

GLE = Ground Level Enhancement

- 地上の中性子モニター（13点以上ある）で観測された中性子のフラックス。地上まで届いた空気シャワーのかけらを捉えた、ということ。



1. まずビームで来て じきに落ち着く

4274

VAN ALLEN, FENNELL, AND NESS

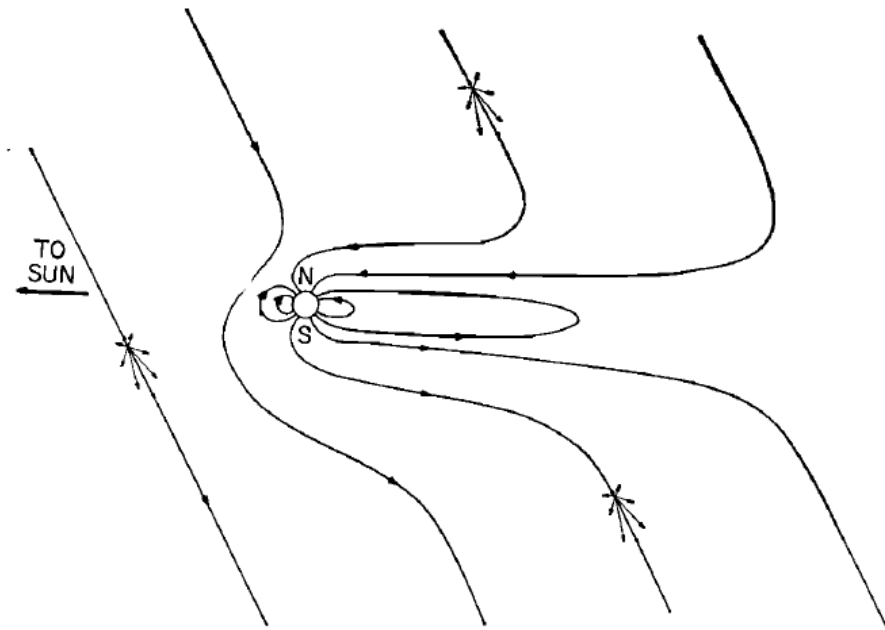


Fig. 10. A schematic diagram of the proposed magnetic topology in the noon-midnight meridian. The central features of this diagram (not to scale) are (a) the direct interconnection of polar cap magnetic lines of force to magnetic lines of force in the interplanetary medium, and (b) the relationship of this topology to the N/S asymmetry of polar cap particle intensities when the interplanetary beam is anisotropic as shown.

ASYMMETRIC ACCESS OF SOLAR PROTONS

4265

C-670-802

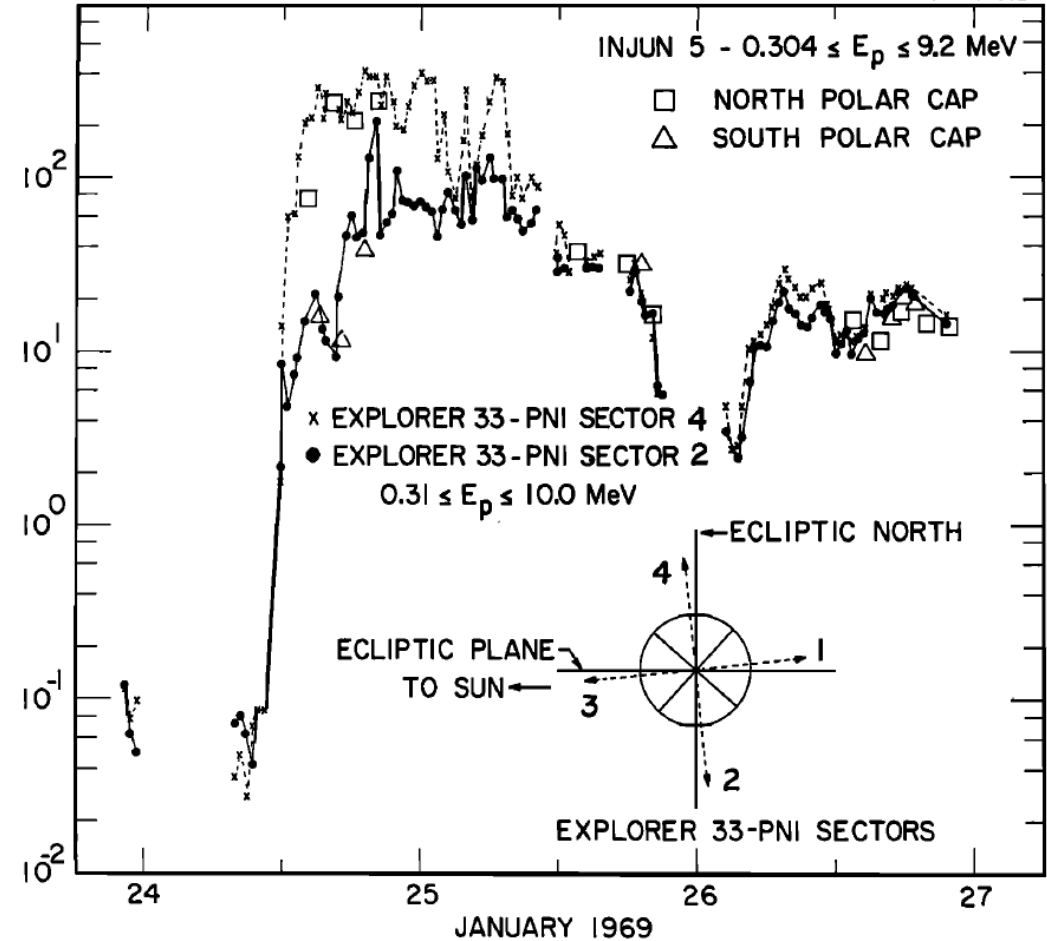


Fig. 2. Graphical comparison of the normalized, north polar cap averaged counting rates and south polar cap averaged counting rates from Injun 5 with the half-hourly averaged counting rates from Explorer 33's sector 4 (southward-directed intensity) and sector 2 (northward-directed intensity). The arrows in the auxiliary diagram indicate the mean directions of the collimator axis in the four sectors.

Focused transport equations

- 1-D (spatial) focused transport equation (FTE) with adiabatic deceleration

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \overset{\text{Streaming}}{\mu v b_i \partial_i f} + \overset{\text{Momentum change}}{V_i \partial_i f} + \frac{dp}{dt} \frac{\partial f}{\partial p} + \frac{d\mu}{dt} \frac{\partial f}{\partial \mu} - \frac{\partial}{\partial \mu} \left(D_{\mu\mu} \frac{\partial f}{\partial \mu} \right) = 0 \quad \text{空間1次元でピッチ角散乱}$$

- Momentum change Convection Pitch angle change

$$\frac{dp}{dt} = p \left[\frac{1-3\mu^2}{2} b_i b_j \partial_i V_j - \frac{1-\mu^2}{2} \partial_i V_i \right] \quad \leftarrow \text{Adiabatic deceleration by solar wind divergence}$$

- Pitch angle change Solar wind divergence

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{1-\mu^2}{2} \left[-v b_i \partial_i (\ln B) + \mu (\partial_i V_i - 3 b_i b_j \partial_i V_j) \right]$$

Adiabatic focusing

- Pitch angle scattering coefficient: Modified quasi-linear theory (Beeck&Wibberenz 1986, Bieber+1994)

$$D_{\mu\mu} = D_0 v R^{q-2} \{ |\mu|^{q-1} + h \} (1 - \mu^2) \quad \text{q: Index of wave number spectrum of solar wind turbulence}$$

- Mean free path Modification to avoid no scattering at $\mu = 0$

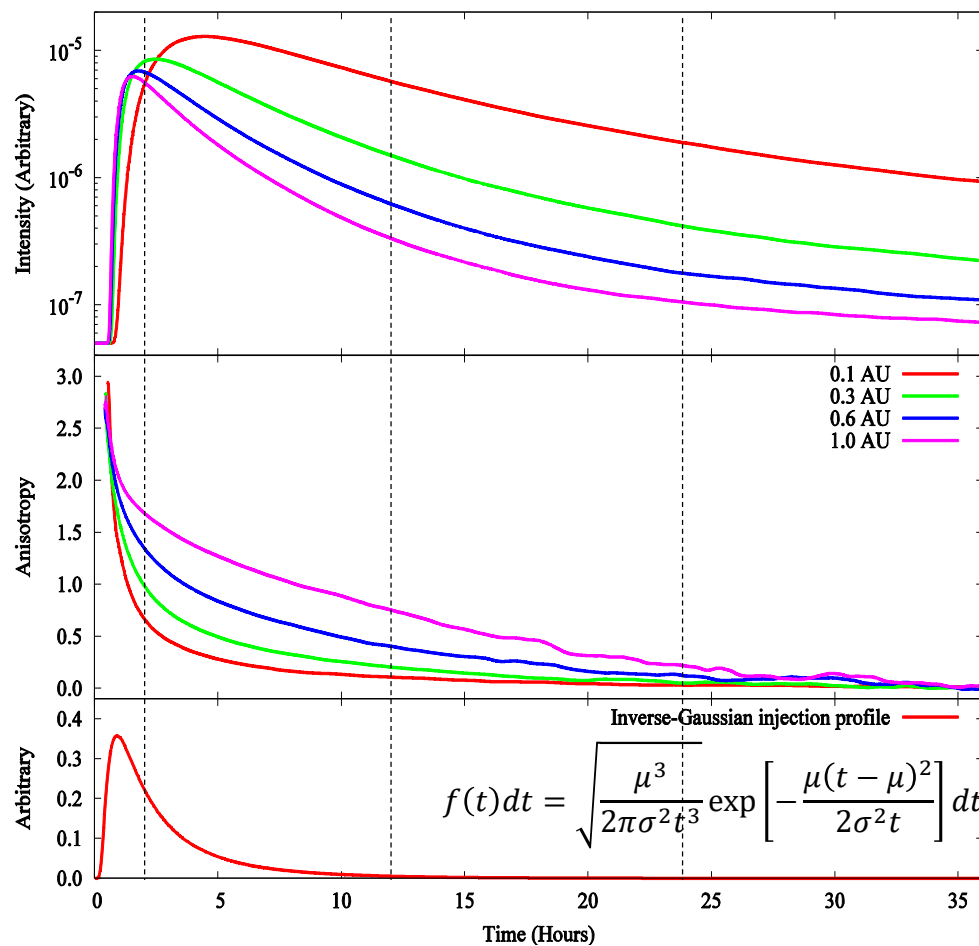
$$\lambda_{\parallel} = \frac{3v}{8} \int_{-1}^1 \frac{(1-\mu^2)^2}{D_{\mu\mu}} d\mu \quad \lambda_{\parallel} \cos^2 \varphi \equiv \lambda_r = \text{const. (approx.)}$$

Kubo et al. (2015)

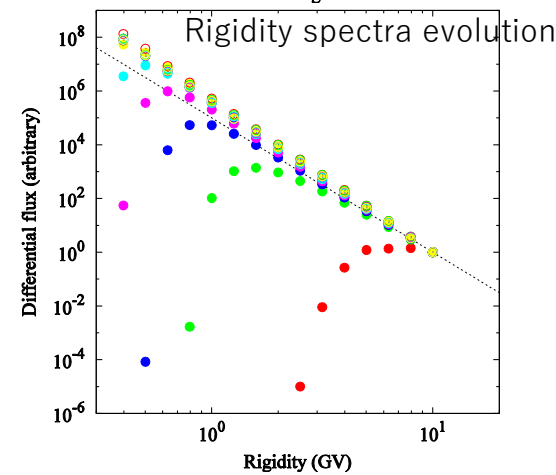
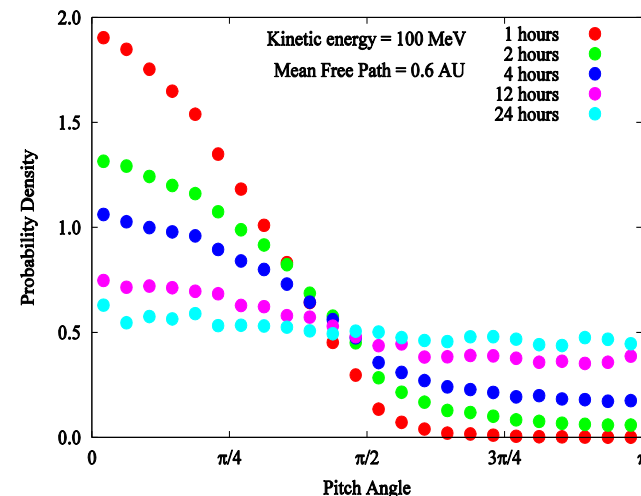
- injection of >80 MeV proton beam
- power law spectrum

Solutions of Focused Transport Equation

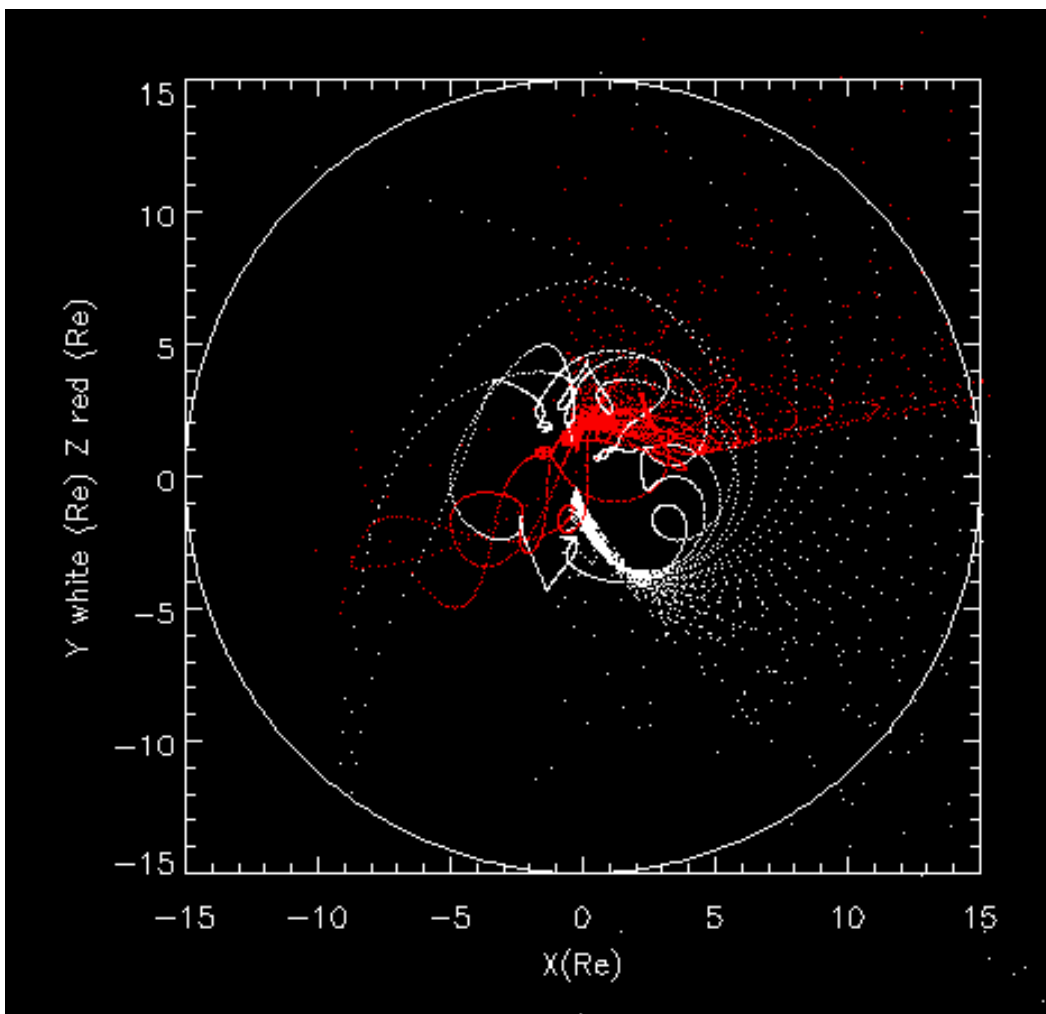
Intensity (top) and Anisotropy (middle) of 100MeV SEP observed at the Earth, and SEP injection profile near the Sun (bottom).



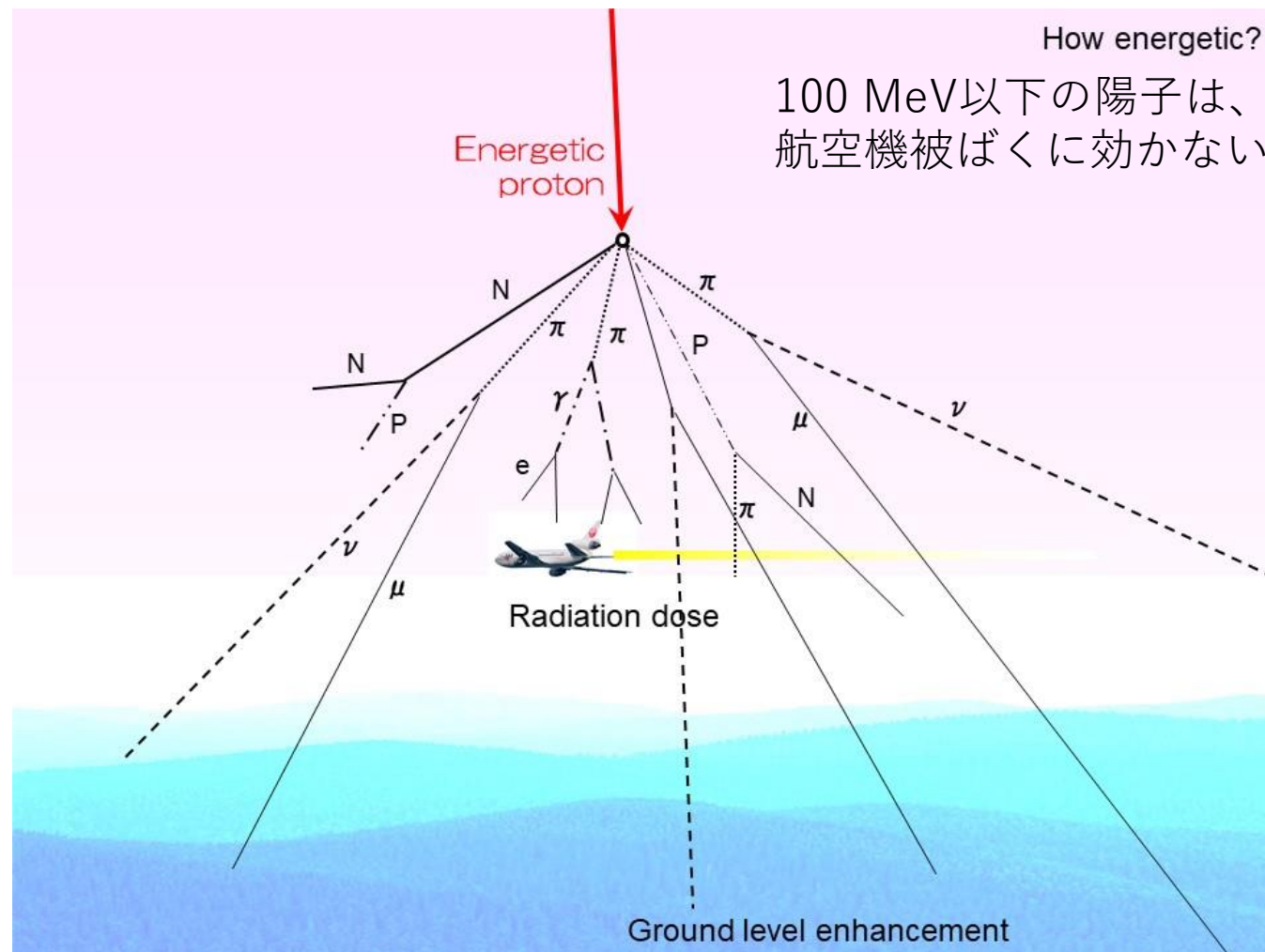
Evolution of pitch angle distribution for 0.6 AU mean free path cases.



2. 磁気圏を通過し、空気シャワー



ルンゲクッタでプロトンを追跡すればいい



モンテカルロで解けばいい

リジディティ = 磁場で曲がらなさ

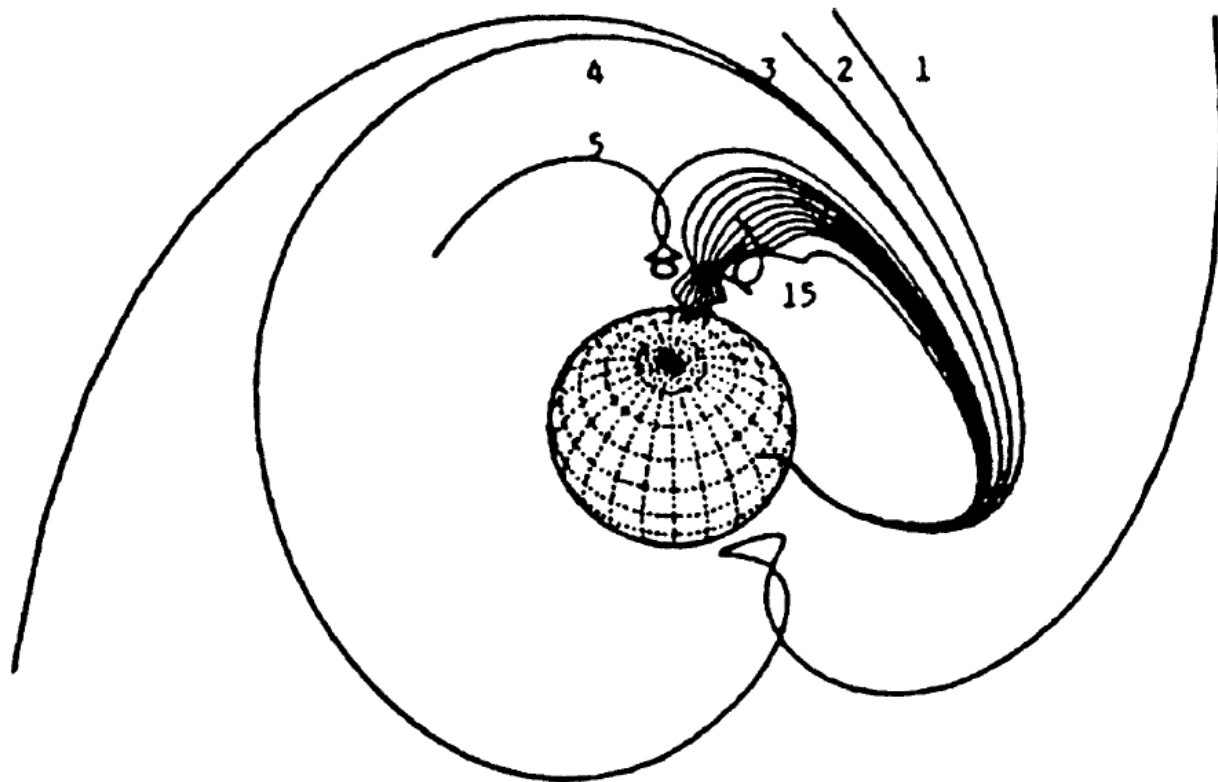


Fig. 2. Illustration of the cosmic ray trajectory-tracing process. The highest rigidity (most resistant to geomagnetic bending) is labeled 1 and the lowest rigidity is labeled 15.

実際にカットオフの計算をすると...

D.F. Smart, M.A. Shea / Advances in Space Research 36 (2005) 2012–2020

2015

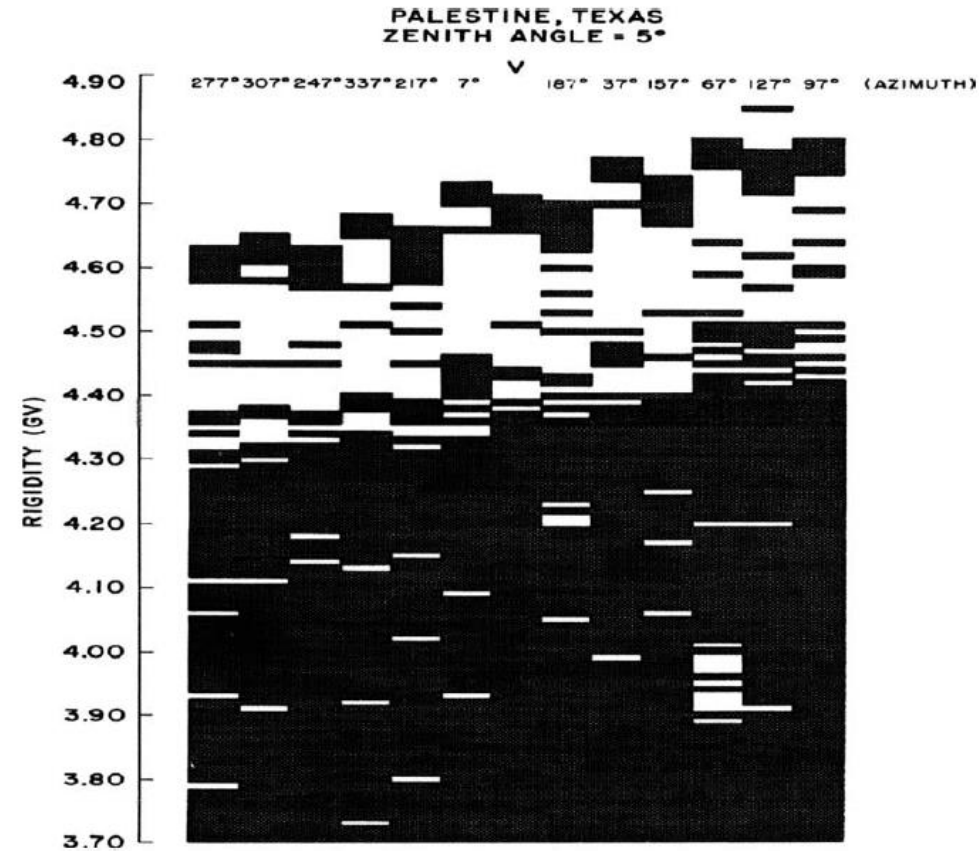


Fig. 3. Illustration of the geomagnetic cutoff transition from allowed to forbidden access as determined by cosmic ray trajectory calculations in a high order simulation of the earth's magnetic field. In this illustration black indicates forbidden rigidities and white indicates allowed rigidities. Note that the cutoff is not sharp and that as the rigidity is decreased, the transmission of cosmic rays changes from fully allowed at rigidities above the upper computed cutoff, R_U to partly allowed in the cosmic ray penumbra, to totally forbidden at rigidities below the lowest computed cutoff, R_L .

上野、松本、古賀、佐藤、三宅、片岡
「宇宙放射線工学モデルを用いたSEU評価ツールの開発」

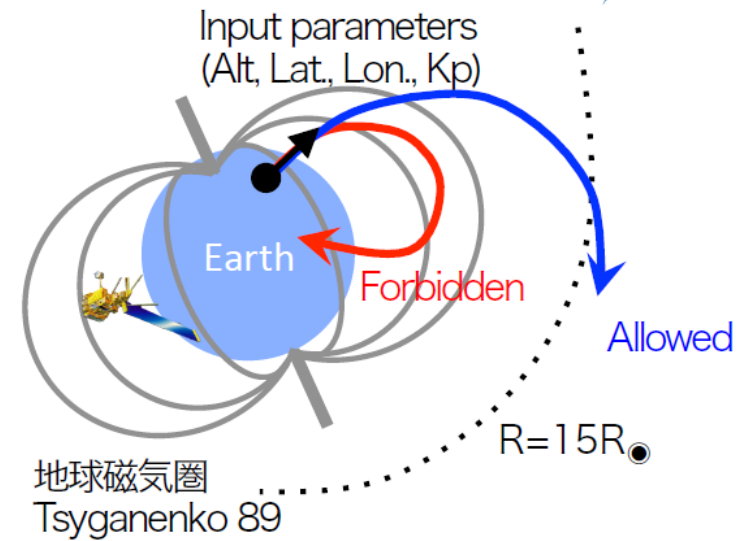
Cut-off Rigidity (COR) の計算方法



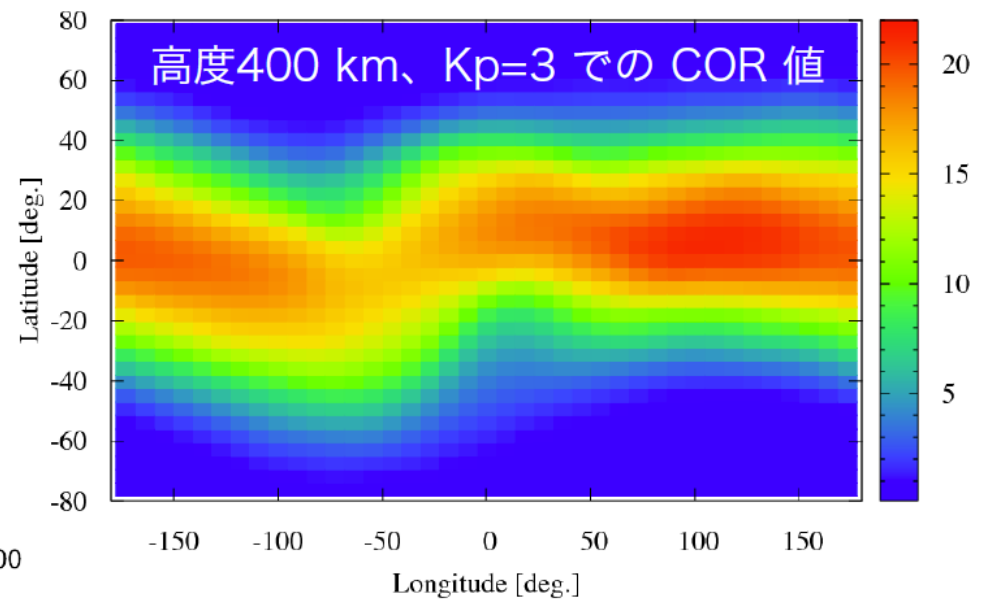
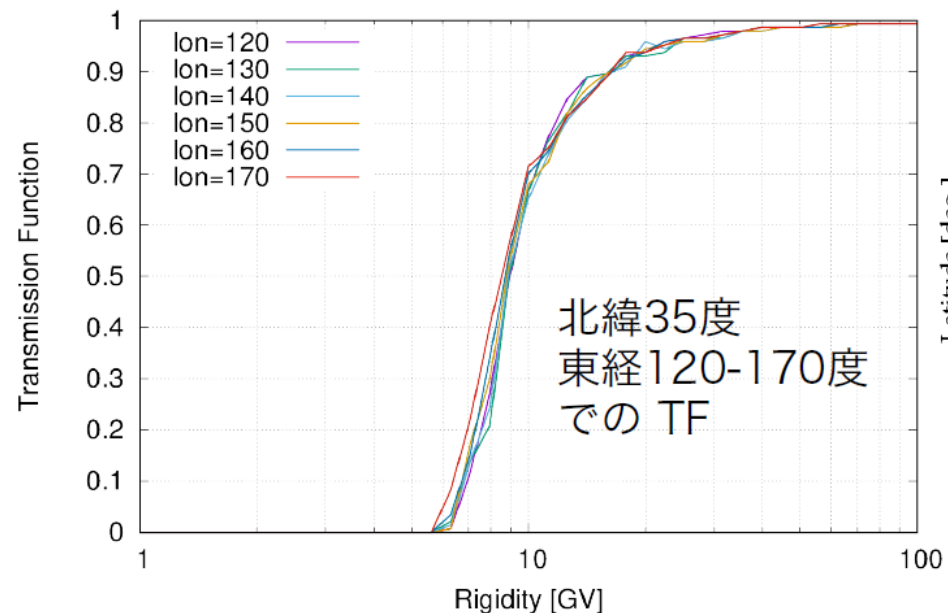
■ プロントレース法 (WASAVIESの計算コード)

- Tsyganenko 89 モデルを用いて COR 理論値を求める
- 反陽子を144通りの入射角度で打ち出す
 - 粒子の rigidity は対数で等間隔に変化させて計算する
 - 反陽子が Allowed となる確率 → TF
 - 得られた各トレースでの cutoff rigidity 平均値 → Effective COR

$$\log R_c = \log R_L + (\log R_U - \log R_L) \times \frac{N_{\text{forbidden}}}{N_{\text{total}}}$$



- 緯度5度、経度10度、高度10 km(10-1000 km)
Stormy(Kp=5)、Quiet(Kp=3)ごとに TF ファイルを作成 → 座標からファイルを読み出す



プロトントレース正しい? by PAMELA

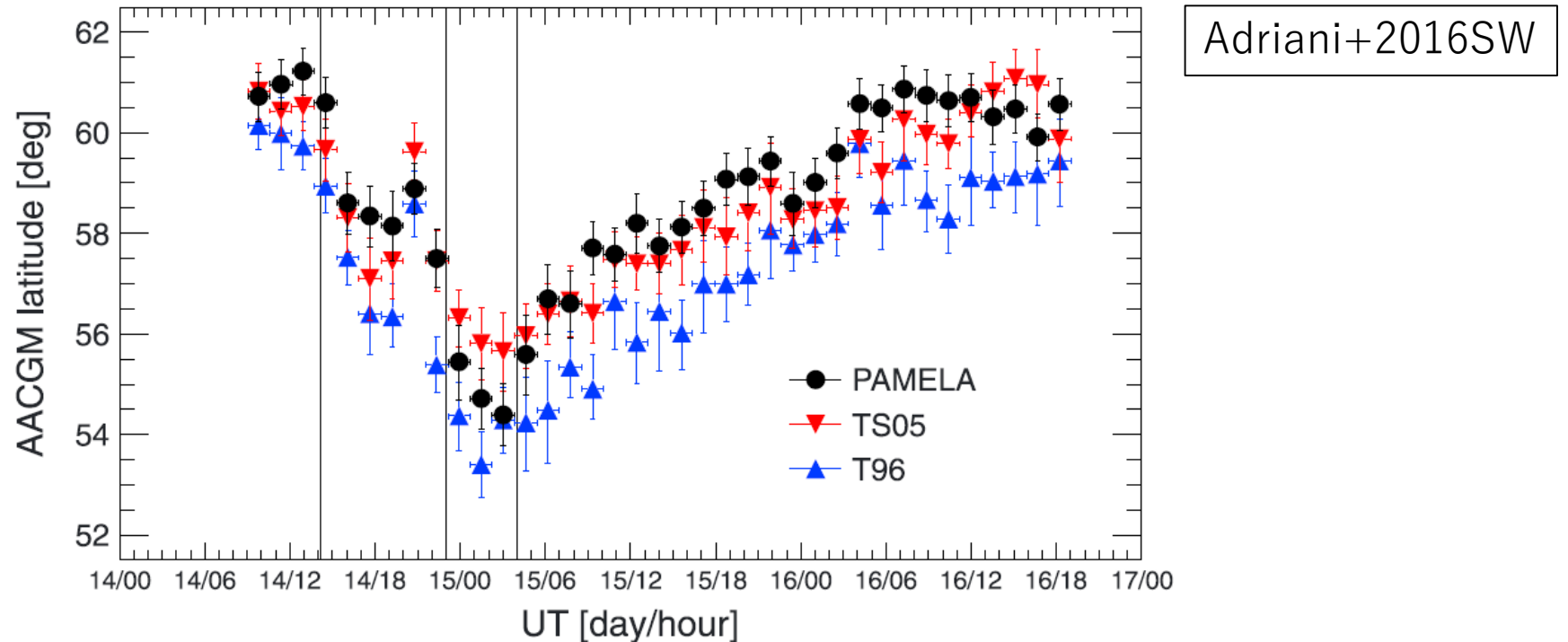


Figure 6. Comparison between measured (black circles) and modeled (blue triangles, T96 model; red triangles, TS05 model) cutoff variations in the lowest rigidity interval: 0.39–0.46 GV. The vertical lines mark the beginning of the storm initial, main, and recovery phases.

Flux mapping?

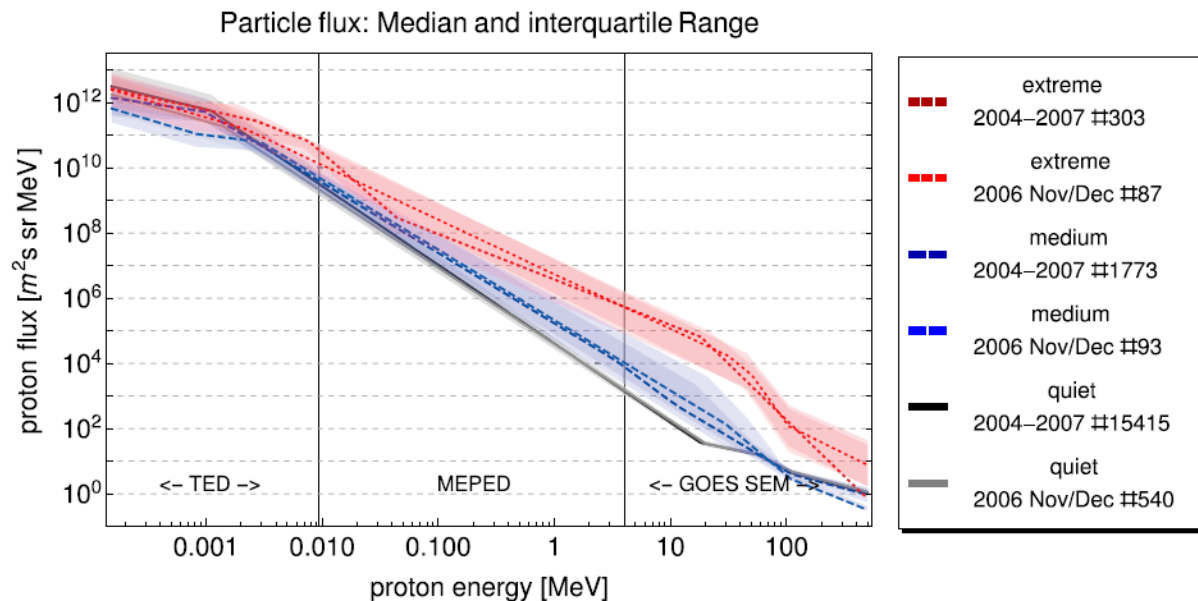


Fig. 1. Median and interquartile range of the proton flux for Nov/Dec 2006 and 2004–2007: For simplicity the median and upper and lower quartiles of each channel have been fitted by multiple power-law spectra. Note the vertical lines that indicate the upper energy range of the TED instrument and the lower threshold of the GOES SEM instrument. The amount of 2 h periods entering the different activity levels is indicated by the “#”-symbol.

To whom it might confuse that POES MEPED and GOES SEM show such a good match even without any flux mapping, given that altitude, orbit, view points and opening angles differ and just nominal geometric factors are known: Actually there is an intrinsic flux “mapping”. According to [Bornebusch et al. \(2010\)](#) the particle flux increase by a narrowing magnetic flux tube (e.g. from a geostationary orbit down to 800 km altitude of POES) is fully canceled out by the particles that are mirrored back due to the increased magnetic flux. This is of course theoretically and based on an isotropic pitch angle distribution (which is not measured), but it means that GOES data in first assumption is already “flux mapped”, which is also the justification for a number of other ionization models which use GOES data as is.

Of course this does not mean that the flux of the instruments itself are correct or the transitions are always matching (local variations may apply as well), nor that the isotropic pitch angle distribution is a proper assumption. However, the intention of this paper is to show the impact of the fit function parameters used in (existing) ionization models. Since TED, MEPED, GOES SEM are commonly used and there is no ionization model known by the authors that does not use isotropic pitch angle distribution these assumptions look reasonable for this paper.

Consequently, due to the smooth transition between the instruments, we (a) see no problem in combining the different instruments into one large energy range and (b) we do not see a benefit by separating the instruments as the desired input for chemistry models is a full altitude covering ionization rate. Also a

Flux mapping?

636

J.P. Bornebush et al. / Advances in

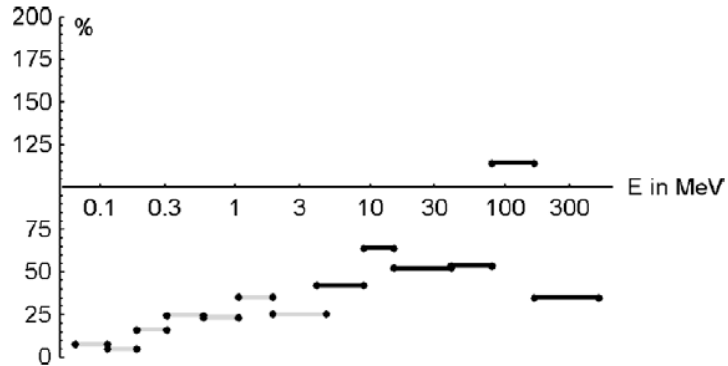


Fig. 6. Proton penetration indices for the October/ November events 2003, calculated for days 299–302 (the five leftmost channels) or 299–311, 2003. Gray marks ACE channels, black GOES channels.

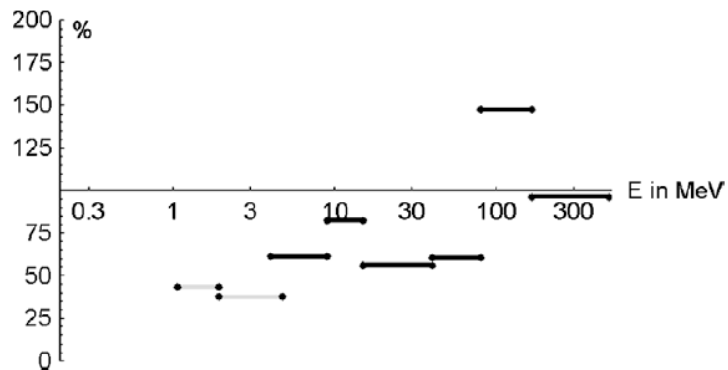


Fig. 7. Proton penetration indices for the January 2005 events, calculated for days 15–24, 2005. Gray marks the remaining ACE channels, black GOES channels.

(この論文は、大気化学分野では、極冠で一様、という引用のされ方も)

>10 MeVプロトンなら
だいたい、静止軌道でも低軌道でもフラックスが一致する (左)

磁束管が狭くなってフラックスが増えるのとミラーでフラックスが減るのがキャンセルするという単純な理論的予想と整合的 (右)

疑問。ここは本当に、**だいたい**、の理解でいいんだろうか

Total flux at bottom of a flux tube (see Fig. 9) is the flux entering the flux tube minus the mirrored portion.

$$I_b A_b = I_t A_t \cdot (1 - r_{mir}) \quad (2)$$

Approximating $B \perp A$ the definition of a flux tube is simply $\frac{A_t}{A_b} = \frac{B_b}{B_t}$. With this and the formula (e.g. Baumjohann and Treumann, 1997) for the critical pitch angle $\frac{B_t}{B_b} = \sin^2(\alpha_{t,crit})$ put into Eq. (2), we get a flux per area at the bottom of the tube:

$$I_b = I_t \frac{1}{\sin^2(\alpha_{t,crit})} \cdot (1 - r_{mir}). \quad (3)$$

r_{mir} equals the portion of a hemisphere's area, with angles $\alpha > \alpha_{t,crit}$. Taking care of the angle between incident particles and detector surface with a $\cos \alpha$ we get $r_{mir} = \int_0^{2\pi} \int_{\alpha_{t,crit}}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha d\gamma = \cos^2 \alpha_{t,crit}$. The measured flux at the bottom of the flux tube therefore becomes:

$$I_b = I_t \frac{1}{\sin^2(\alpha_{t,crit})} \cdot (1 - \cos^2(\alpha_{t,crit})) = I_t. \quad (4)$$

So the flux reaching POES orbit and then proceeding further into the polar atmosphere can be expected to be of the same order of magnitude as the interplanetary flux

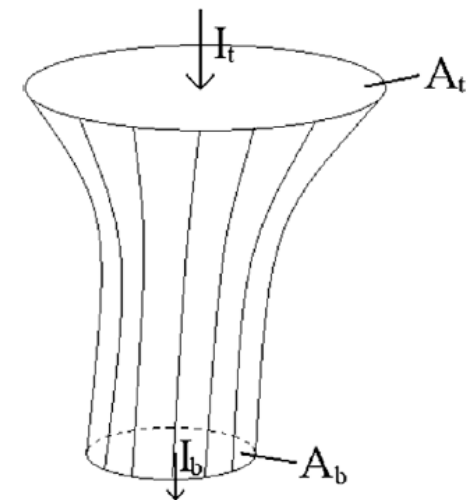


Fig. 9. Schematic of a flux tube.

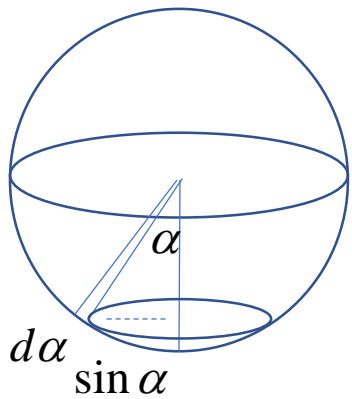
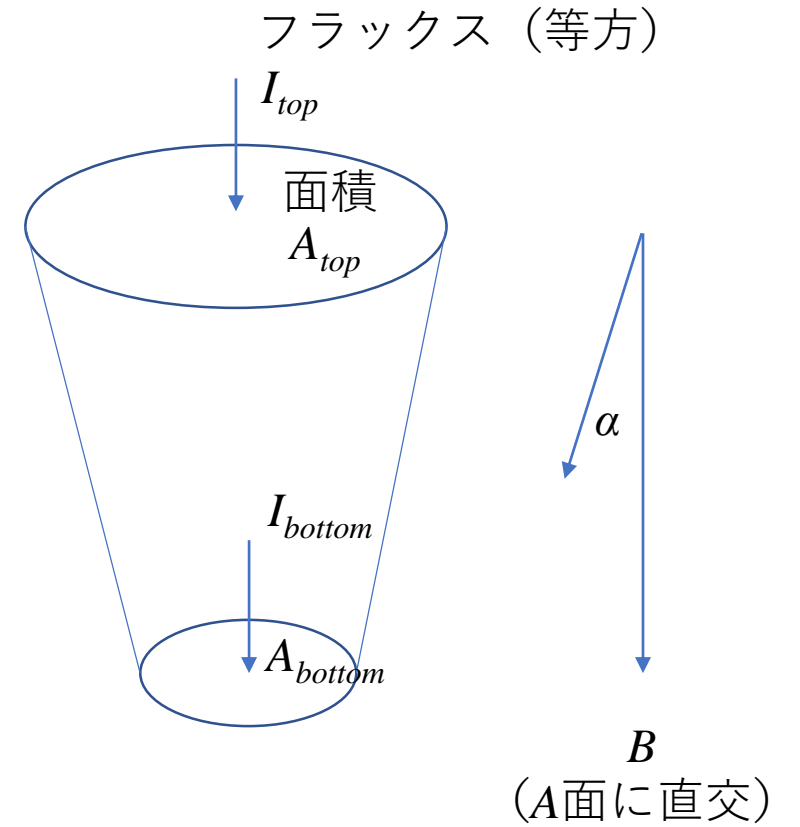
GOESから大気トップまでのflux mappingについて

ミラーとフォーカス

$$I_b A_b = I_t A_t (1 - r_m) \quad r_m \text{ はミラーでロスする割合}$$

磁束の保存 $\frac{A_t}{A_b} = \frac{B_b}{B_t} \quad \therefore I_b = I_t \frac{1}{\sin^2 \alpha_c} (1 - r_m)$

第一断熱不変量の保存 $\frac{B_t}{B_b} = \sin^2 \alpha_c$ (bottomで $\alpha = 90^\circ$ になるクリティカルピッチ角)

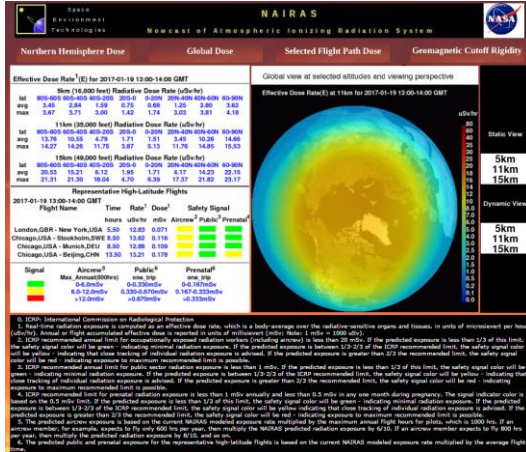


$$r_m = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_c}^{\pi/2} 2\pi \sin \alpha \, d\alpha = [-\cos \alpha]_{\alpha_c}^{\pi/2} = \cos \alpha_c$$

$$I_b = I_t \frac{1}{1 + \cos \alpha_c} \quad \therefore 0.5 I_t < I_b < I_t$$

ロスコーン大きければ同じ
ロスコーン小さいと半分

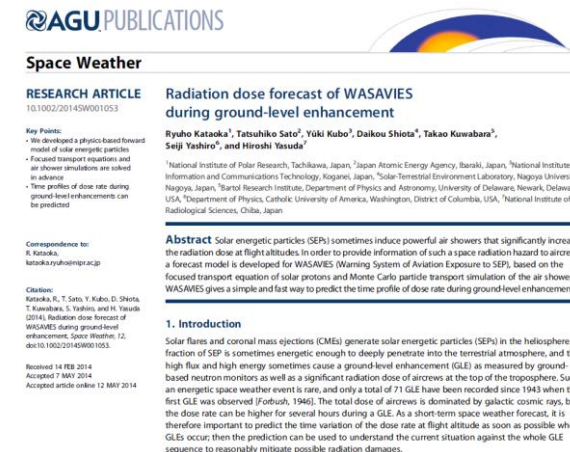
Models for SEP dose evaluation



NAIRAS



AVIDOS



WASAVIES

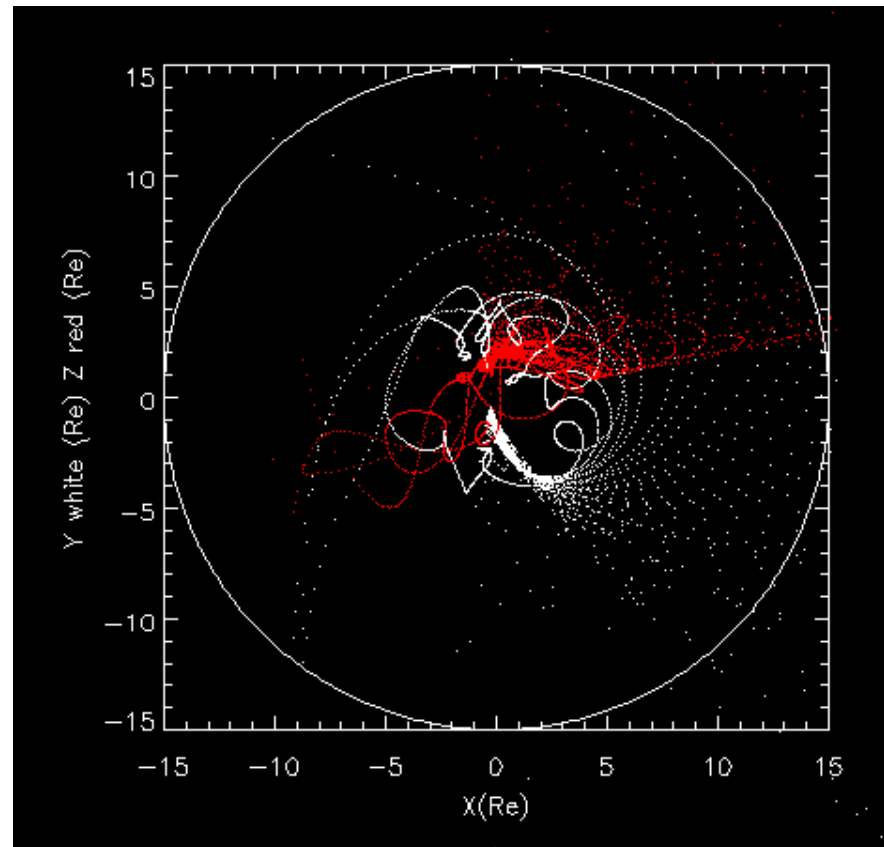
	NAIRAS	AVIDOS	WASAVIES
Institute	NASA	ESA (Seibersdorf Laboratories)	All Japan (NIPR, NICT, JAEA, Nagoya U. etc.)
Input data	GOES (extrapolate)	GOES (extrapolate)	GOES + NM count rate (interpolate)
Airshower simulation	Deterministic (HZETRN)	Monte Carlo (FLUKA)	Monte Carlo (PHITS)
Now- or Forecast	Nowcast	Nowcast	Nowcast + Forecast
Web interface	Yes	Yes	No (under development)

オリジナル版ワサビーズ

- なるべく早い段階での「予測」が目標
 - Kataoka et al. (2014)
- Focused transport equationで、できるだけあらゆるパターンでシミュレーションしておく
 - Kubo et al. (2015)
- 観測中のリアルタイムデータ（GOES, 地上中性子モニタ）と、最もよく似たシミュレーション結果を予測値とする
 - フレア位置とフレア規模のみからも予測できる（誤差大）

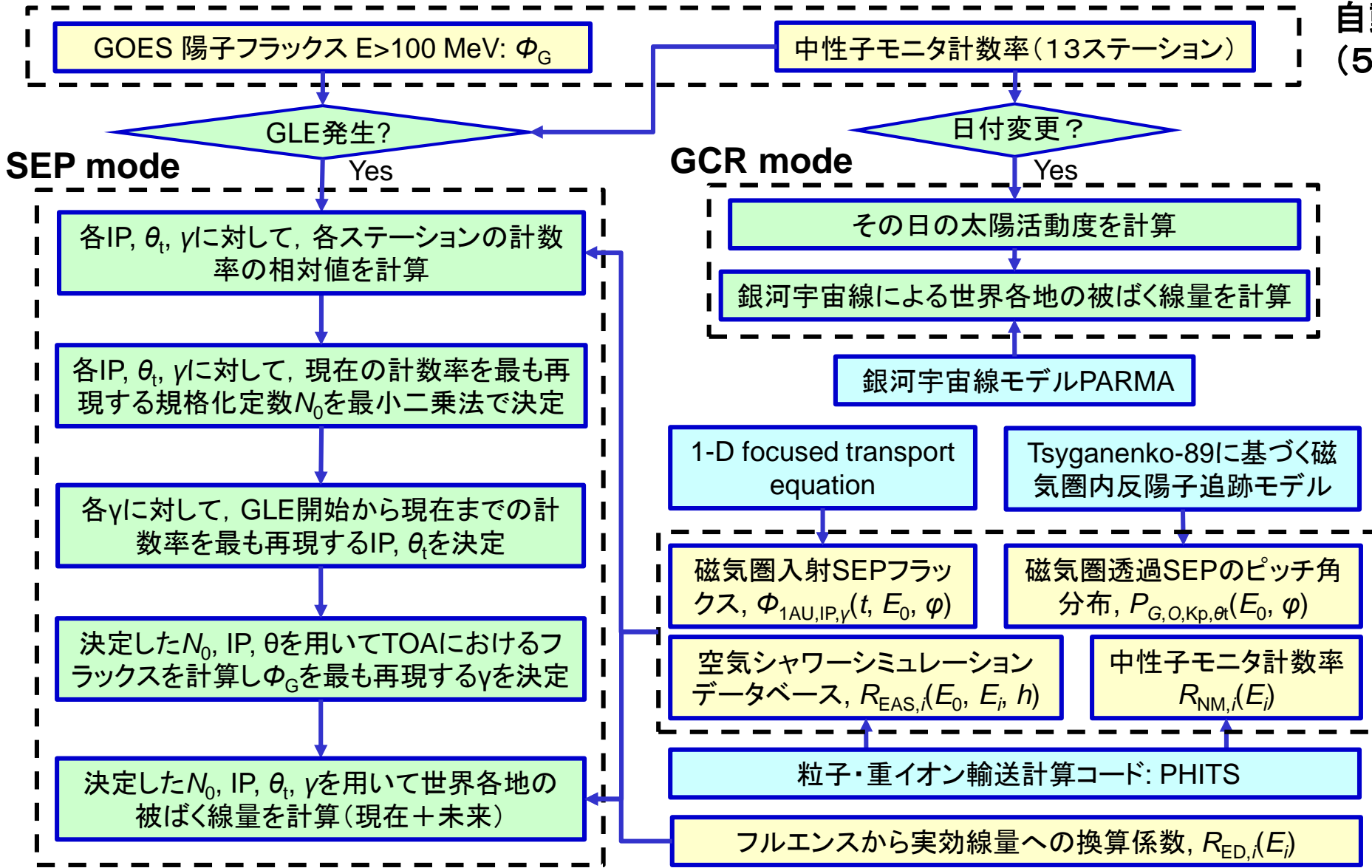
最新版・通称オート・ワサビーズ

- ナウキャストに最適化、予測も可能（物理的な内挿・データ同化）
 - Sato et al. (2018)
- 磁気圏プロントトレースの改良（多方向評価）と透過関数評価
 - Miyake et al. (2017)
- 自動化アルゴリズムはこんな風



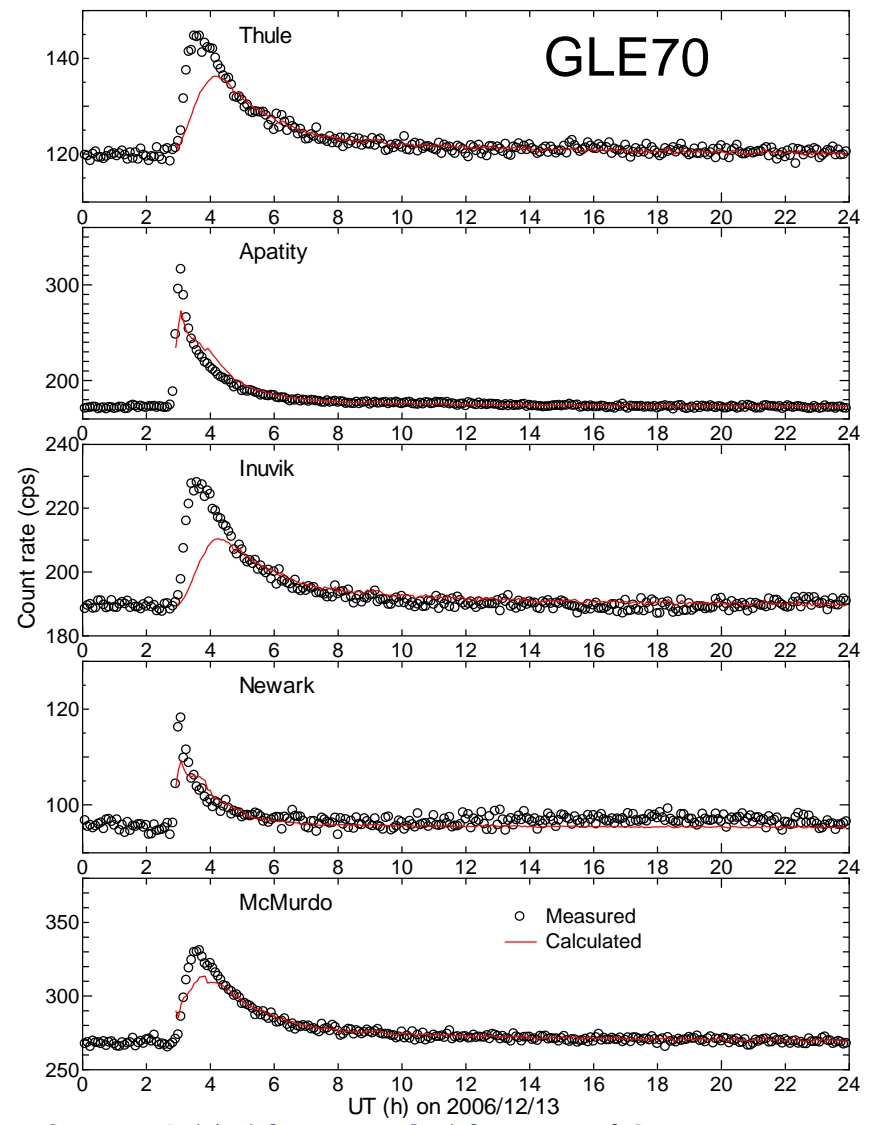
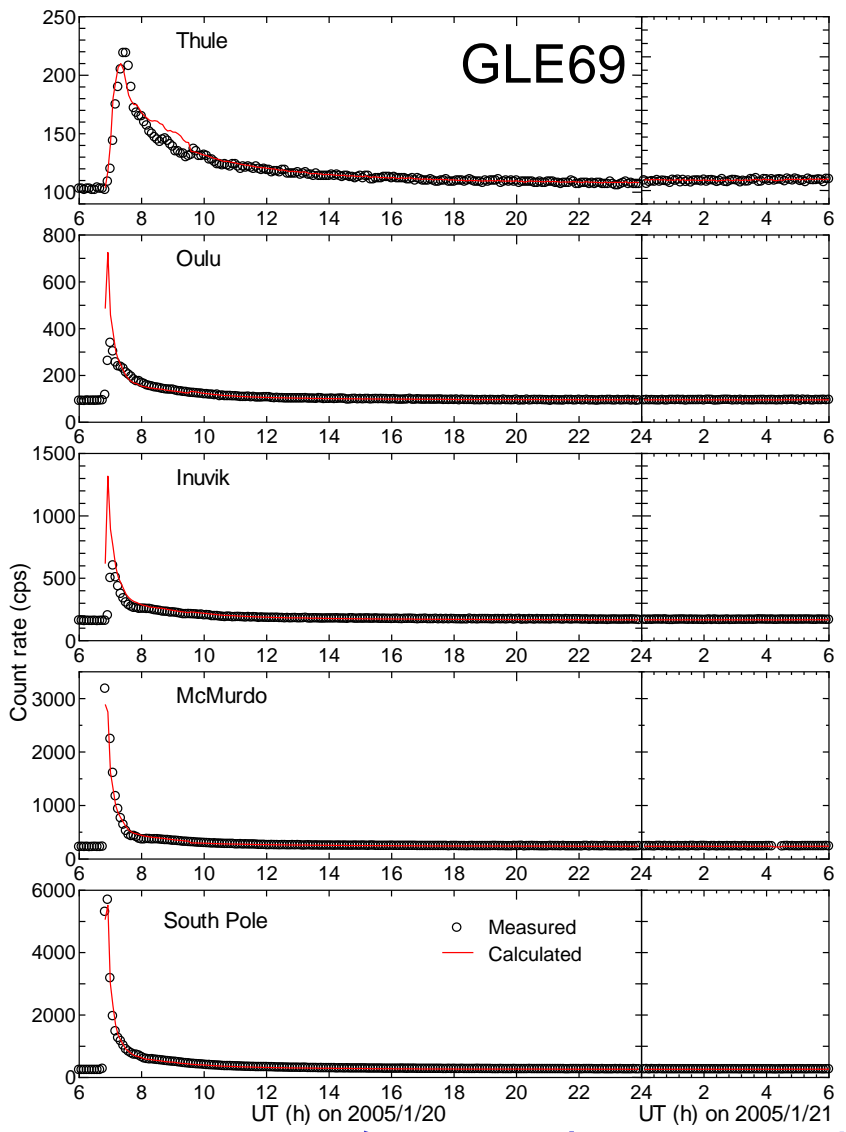
開発したアルゴリズム

自動ダウンロード
(5分間隔)



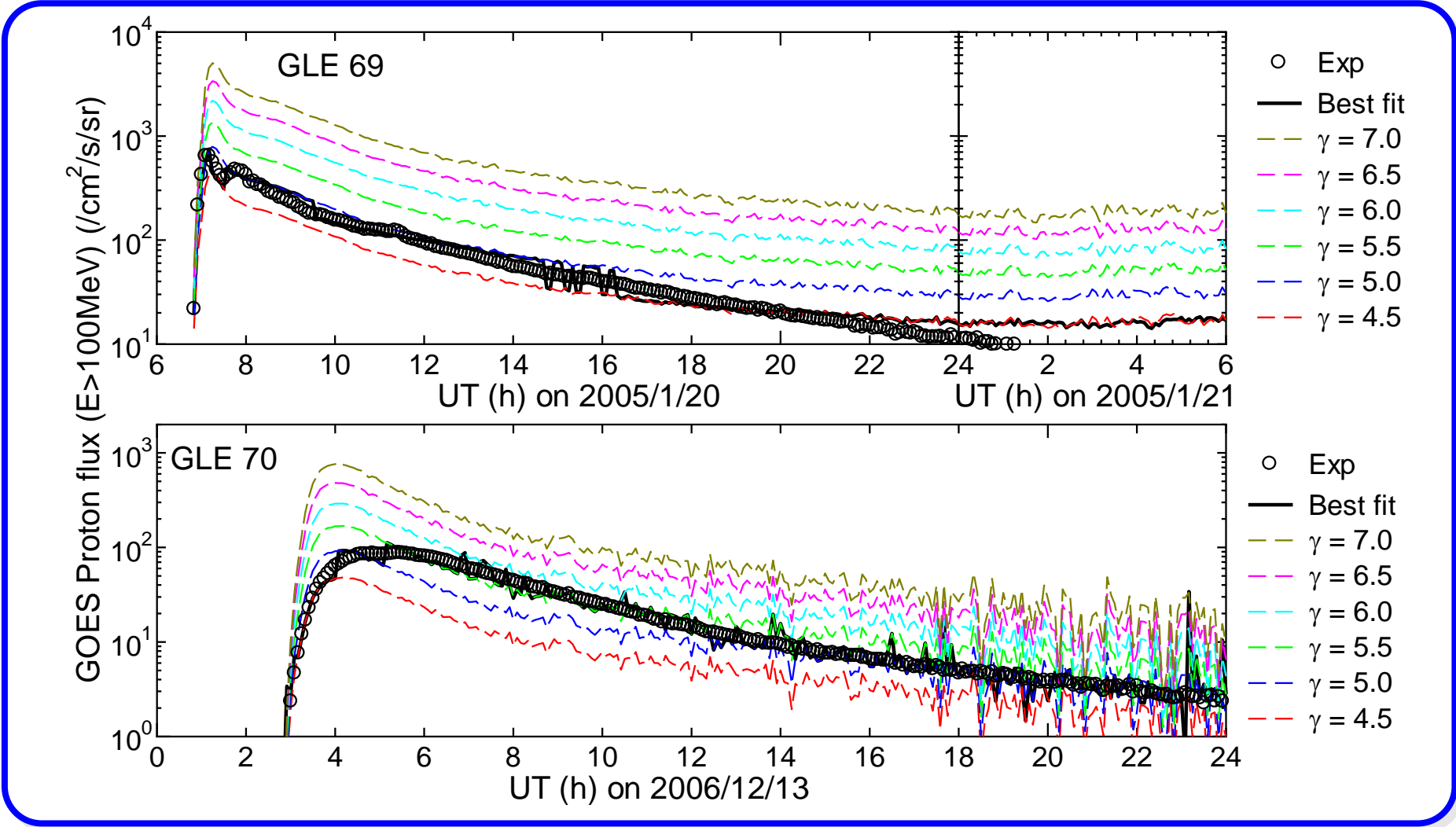
 : リアルタイム解析
 : モデルもしくは計算コード
 : データもしくはデータベース

中性子モニタ計数率の再現性



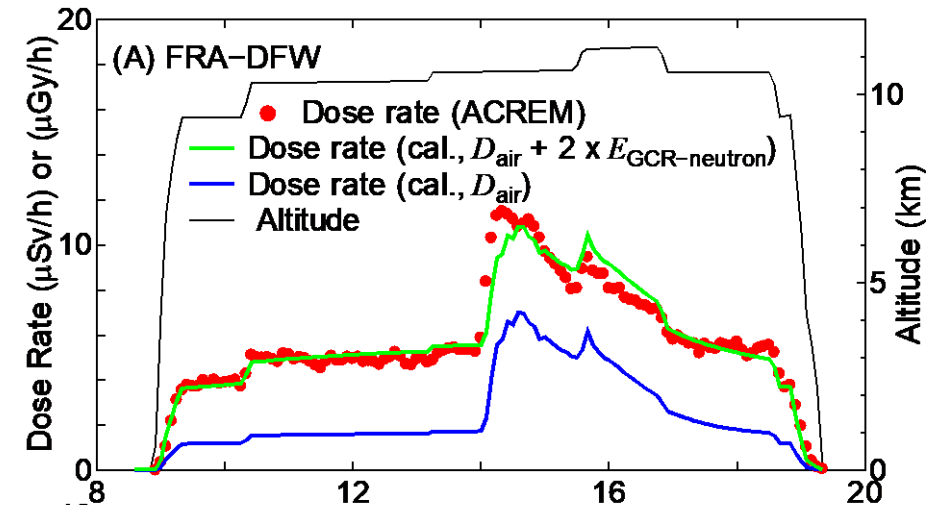
世界各地の中性子モニタ計数率の計算値と測定値の比較

GOES陽子フラックスの再現性

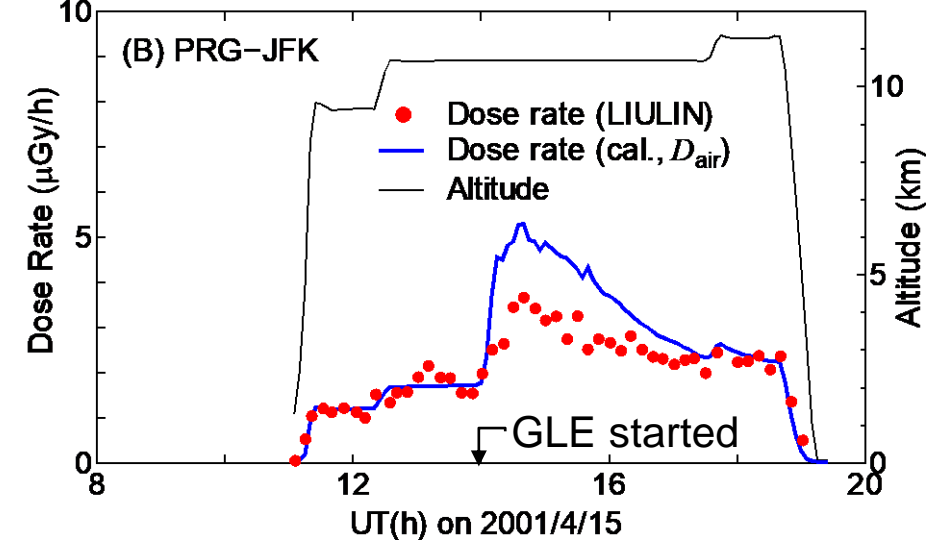


GOES陽子フラックス(衛星軌道) & 中性子モニタ(地上), とともによく再現
→ 航空機高度における計算精度を保証

航空機実験結果の再現性



Bartlett et al. (2002)



Spurny and Dachev (2002)

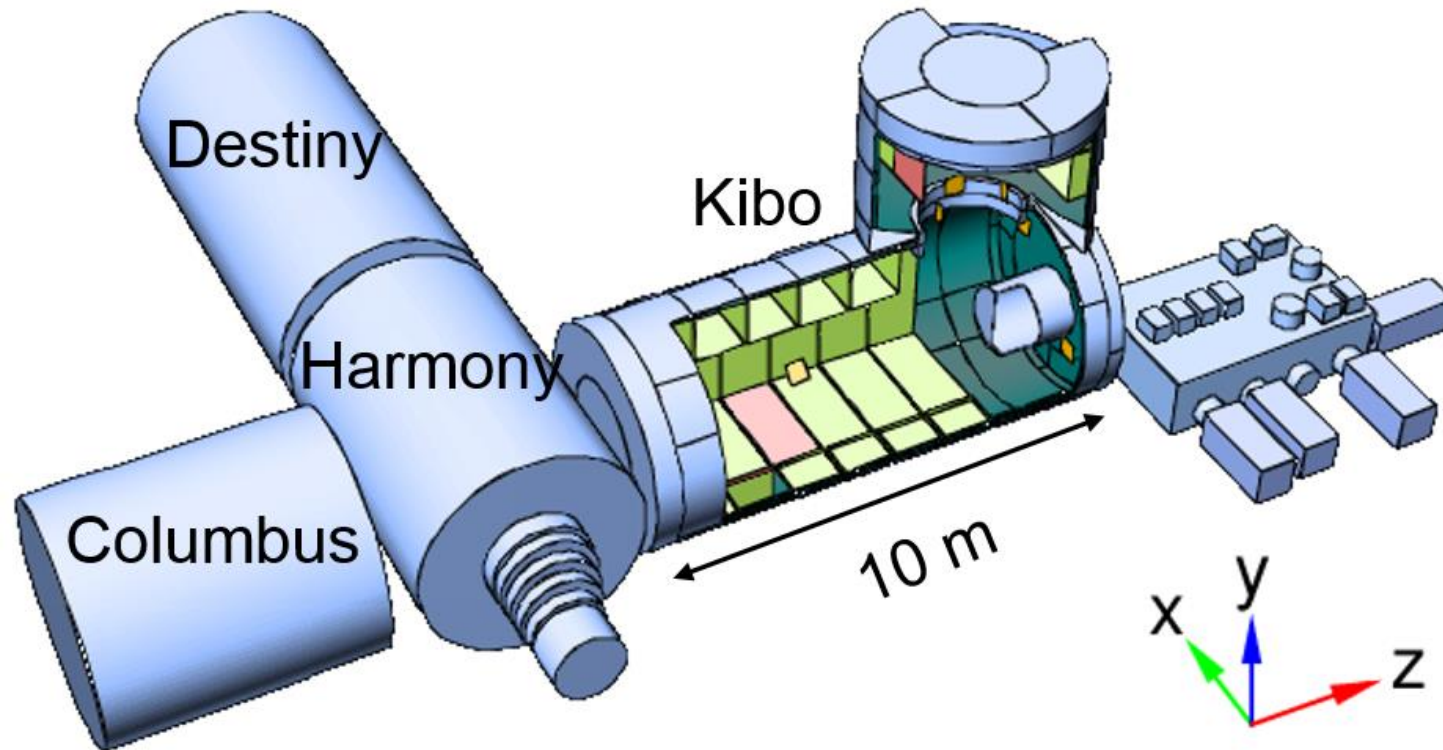
GLE60時の2航路(Frankfurt-Dallas & Prague-New York)における被ばく線量

測定値を驚くほどよく再現！

WASAVIES-EO (Sato et al. 2018b)

- 任意の地球磁気圏内あるいは電離圏内での被ばく予測が可能
- 空気のかわりに、ISS機体のシールドを考慮した被ばく計算
- 課題は、10-100 MeVプロトンのモデリング
 - 10 MeVプロトンは機体を貫通するが、WASAVIESでは80 MeV以上しか扱っていないため、10-80 MeVは>80 MeVから単に外挿している

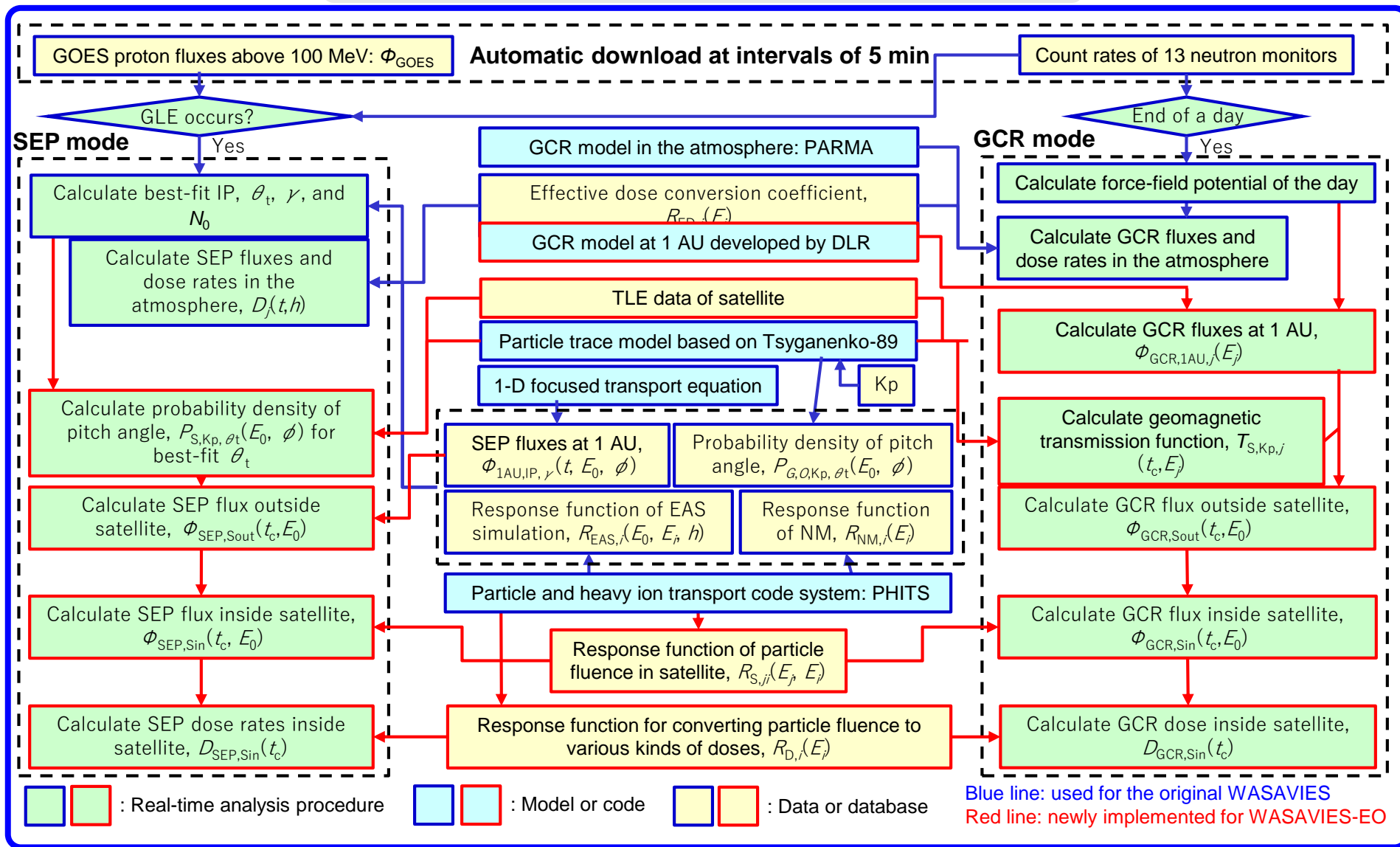
Virtual ISS



永松さん (JAXA) らが中心となって開発したVirtual ISSモデル

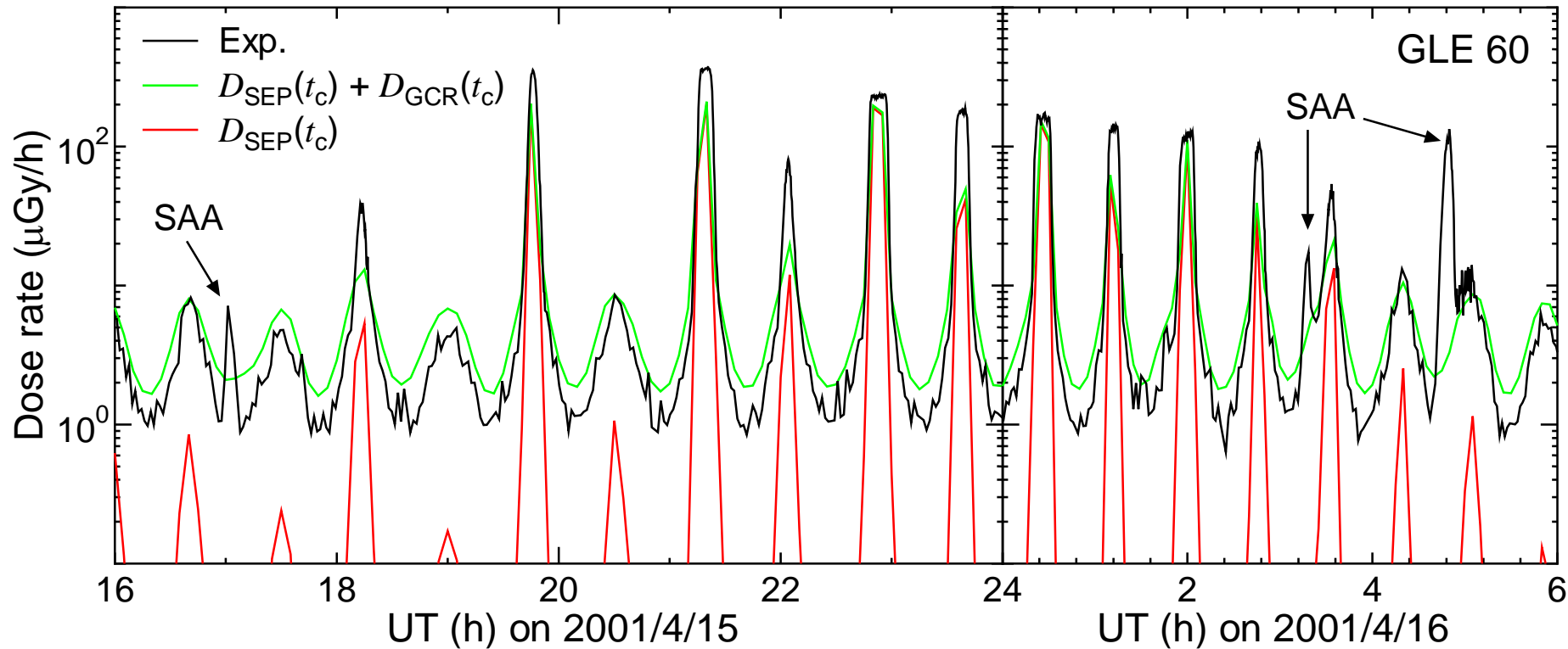
- ✓ きぼうモジュール内はラックの構造まで反映
- ✓ それ以外のモジュールは重さのみ調整
- ✓ 与圧部など様々な場所における応答関数をPHITSで計算

拡張したアルゴリズム



通常のWASAVIES解析が完了した後、衛星軌道データを使って地球軌道モードの解析を開始

精度検証



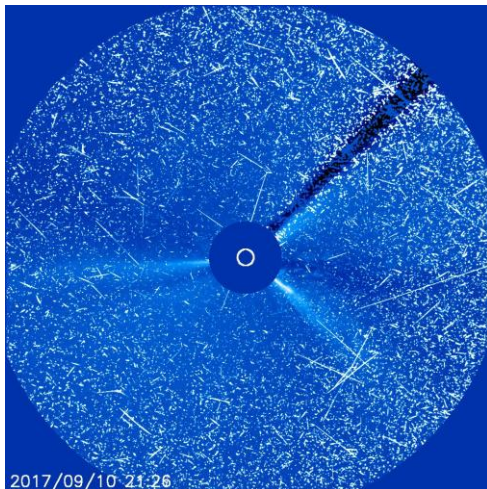
GLE60時にISS US Laboratoryに搭載したSi線量計(DOSTEL)測定結果との比較

- ✓ GCR成分はほぼ完璧に再現
- ✓ SEP成分はやや過小評価するもののよく再現
- ✓ 捕捉陽子(SAA)に関してはモデルで考慮していないので再現できない

>3000 km/s CME on 2017/9/10

コロナ質量放出 Coronal Mass Ejection

太陽プロトン現象
Solar Proton Event



火星表面でCuriosityが被ばく

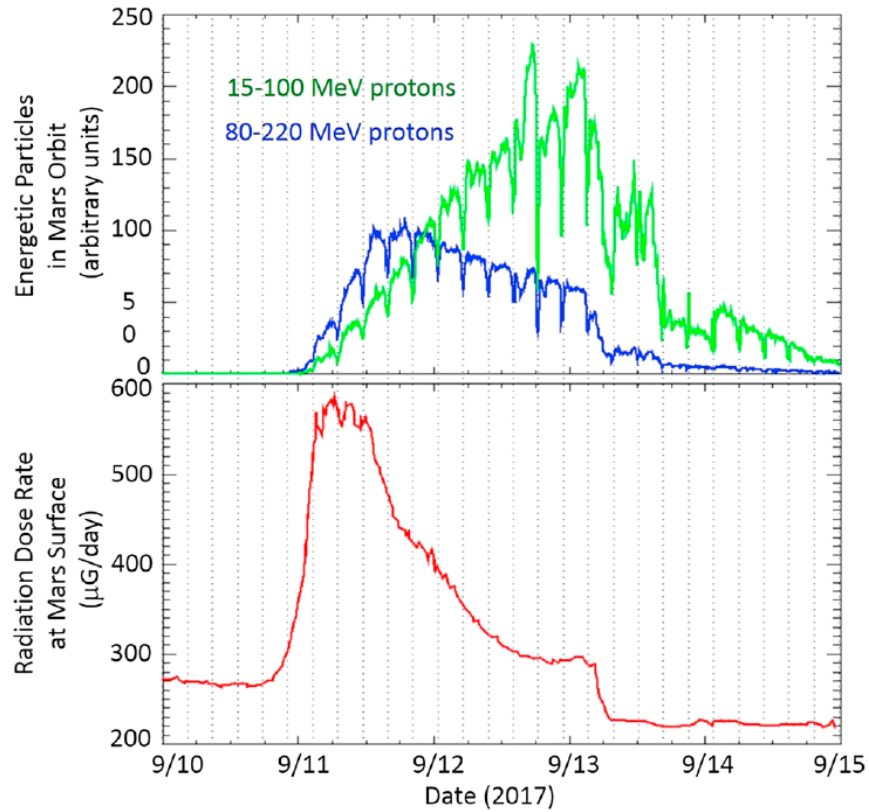
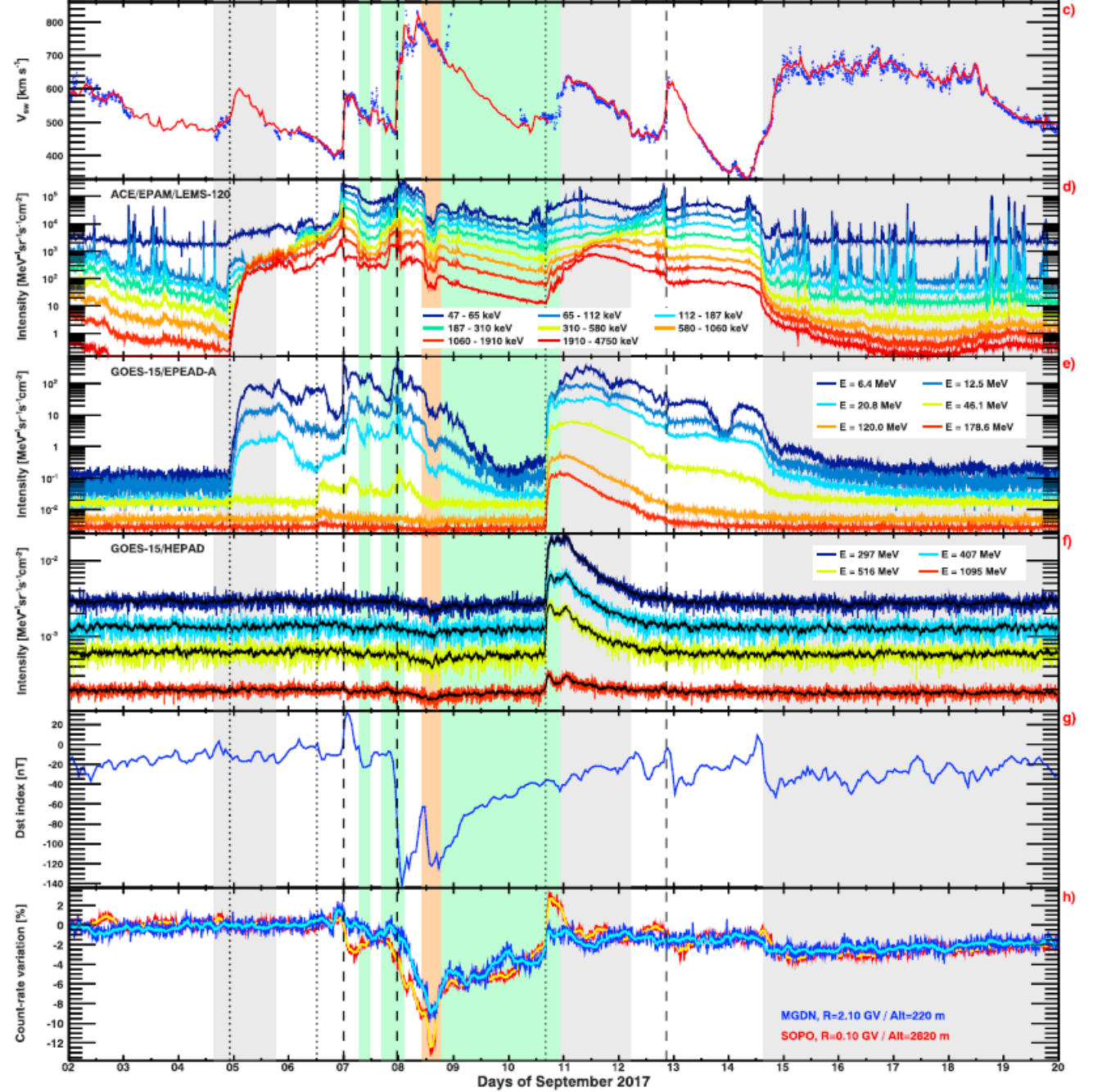


Figure 22. (top panel) Energetic particles in Mars orbit as measured by Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission. (bottom panel) Radiation dose rate at Mars surface as measured by the MSL-RAD E detector. MSL-RAD = Mars Science Laboratory-Radiation Assessment Detector.

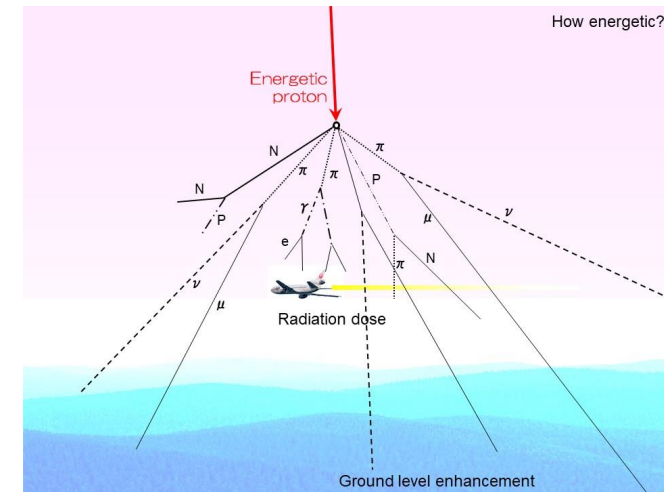
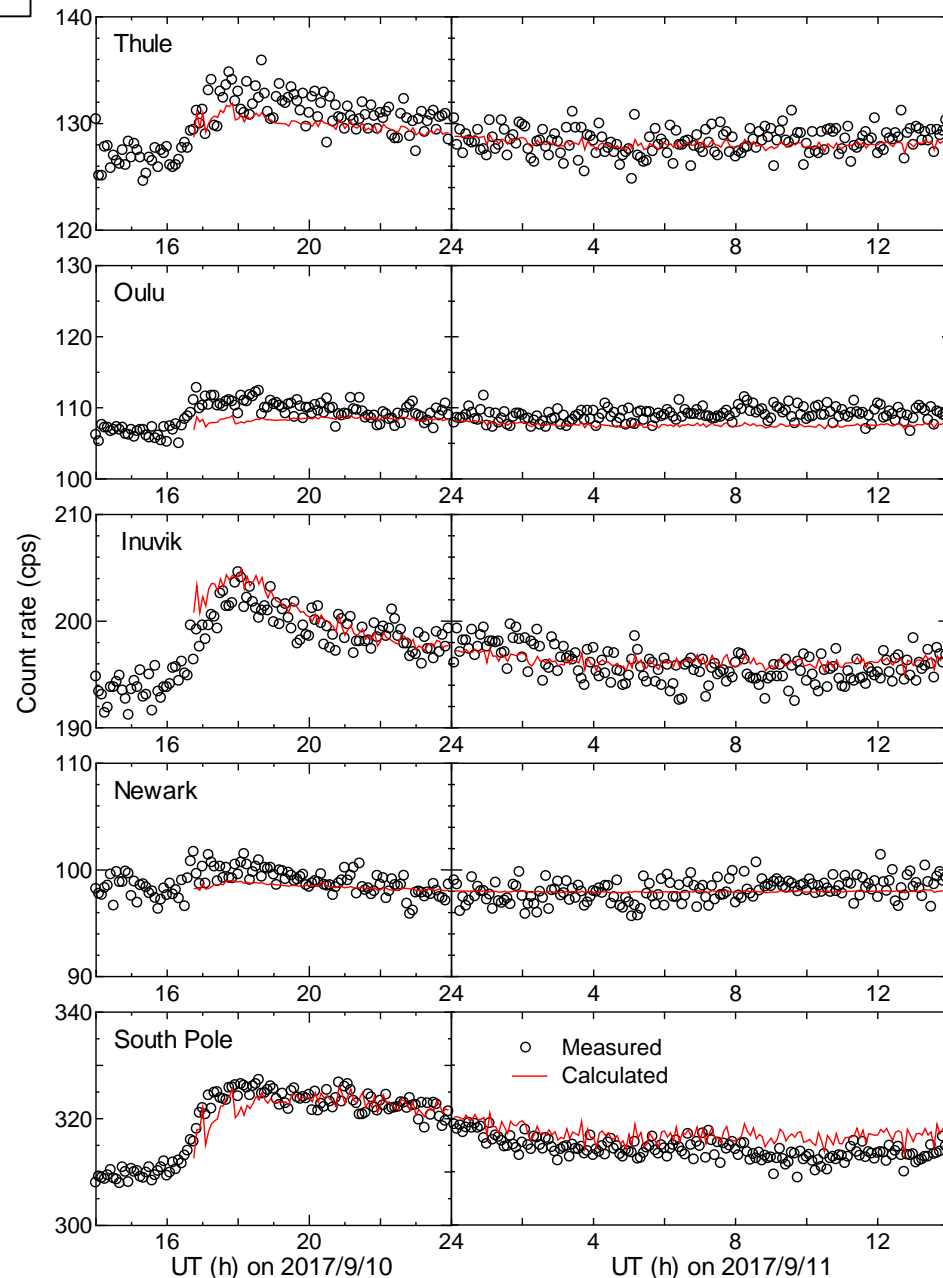
Jiggins+2019 SW



Bruno+2019 SW

Key Points

- GLE72 (2017/09/10-11)の太陽プロトン現象について、イベント発生直後に被ばく量を推定した。
- 航空機高度12 kmでは最大でも3 $\mu\text{Sv/h}$ であり、銀河宇宙線による被ばく量よりも低かった。
- 異様にソフトなエネルギースペクトルは、このイベントに特有の小規模な平行衝撃波の加速によるものと思われる。



空気シャワーシミュレーション
PHITS (Sato et al., 2013)

Figure 1. Measured count rates (circles) at the neutron monitors at Thule (76.5° N, 68.7° W), Oulu (65.05° N, 25.47° E), Inuvik (68.36° N, 133.72° W), Newark (39.68° N, 75.75° W), and South Pole (90.0° S) during GLE 72, compared against our calculated data (red lines).

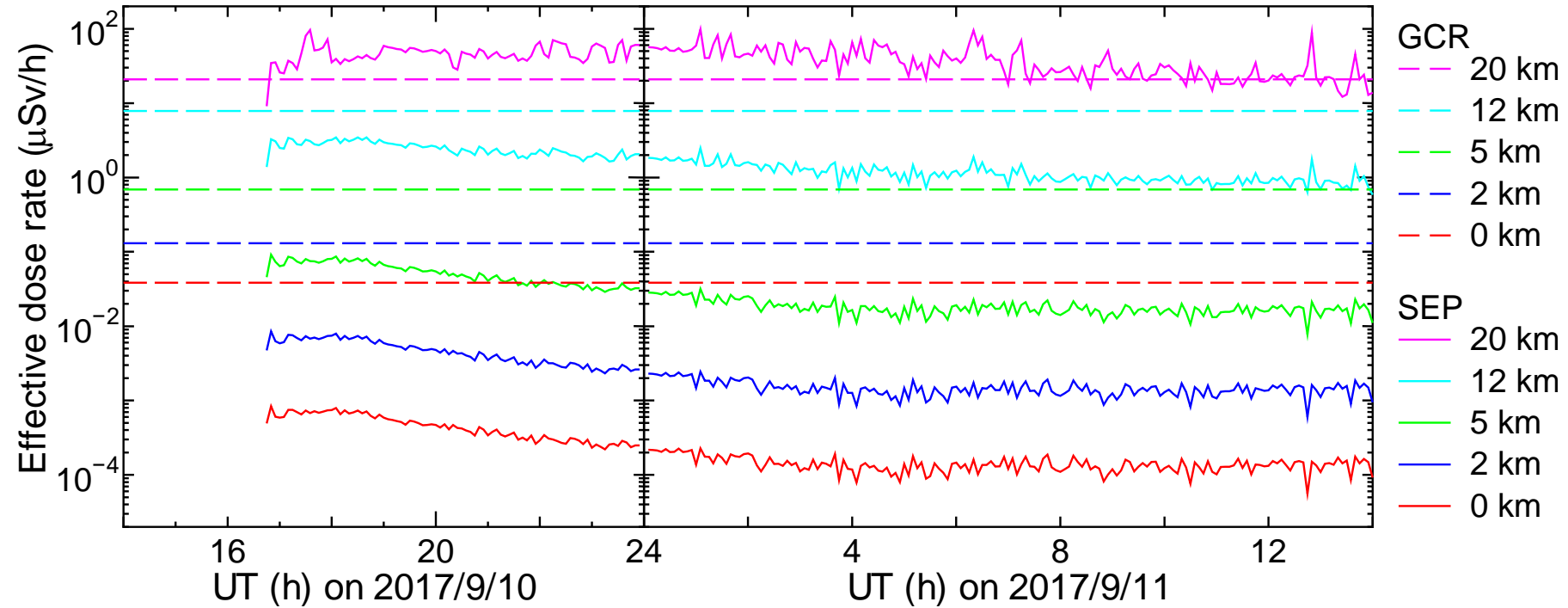


Figure 3. Highest effective dose rates among the 432 locations at various altitudes due to SEP exposure (solid curves) and GCR exposure (dashed lines).

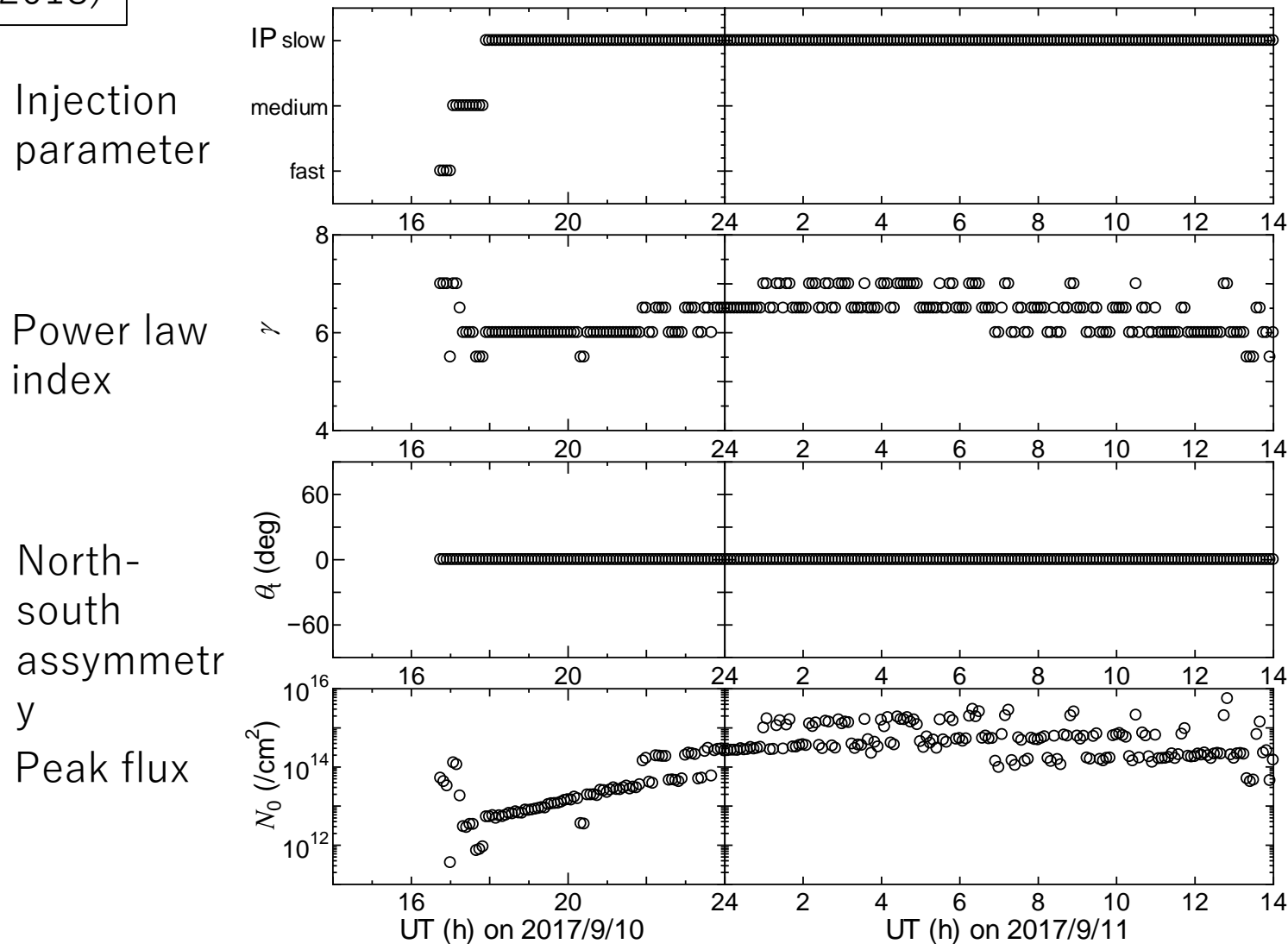


Figure 5. Best-fit parameters from WASAVIES for reproducing the observed data from neutron monitors and GOES satellites during the GLE 72 event. From top to bottom; the injection parameter IP, the power-law spectral index γ of the initial protons, the incident tilt angle θ_t , and the normalization factor N_0 of the SEP flux.

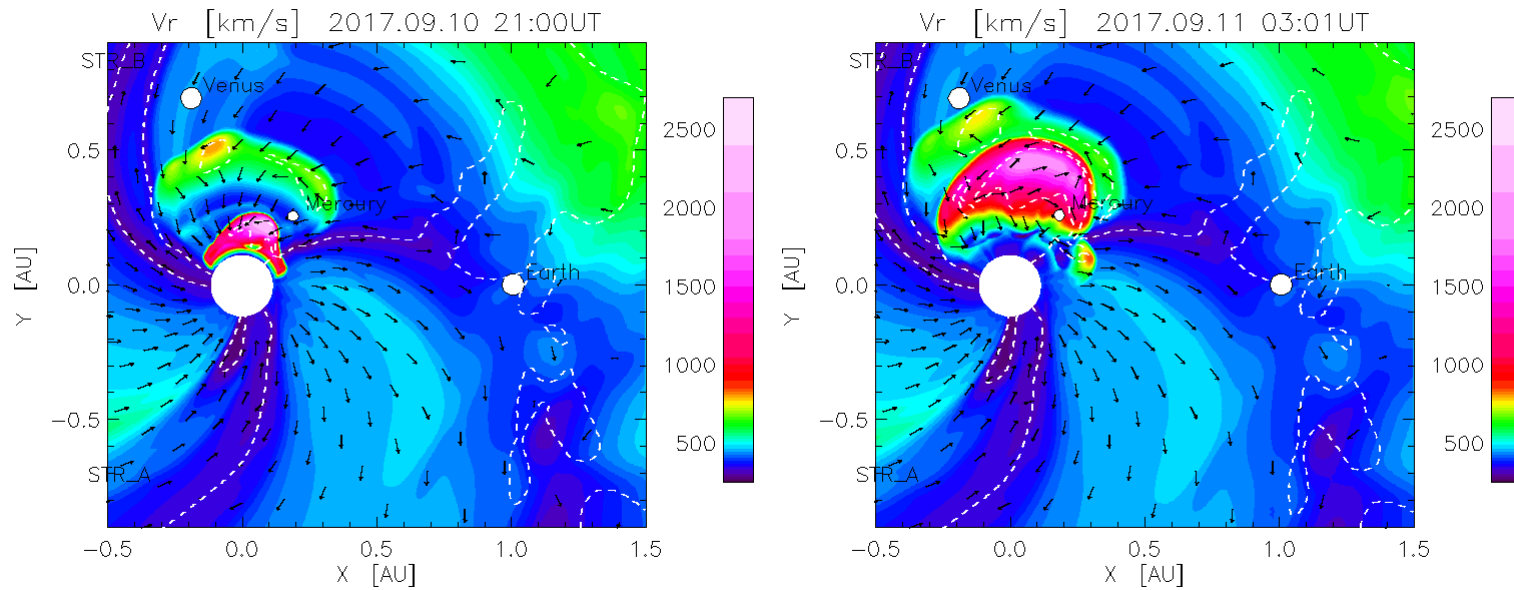


Figure 6. The solar wind structures on the ecliptic plane as reproduced by the SUSANOO-CME model (Shiota and Kataoka, 2016). The colors indicate the solar wind speed, and the arrows indicate the directions of the interplanetary magnetic field. Neutral lines are also represented by white dashed curves. During the GLE 72 event, the Earth was predominantly connected to the deformed flank side of the extremely fast CME via a radially aligned interplanetary magnetic field.

GLE72、大丈夫。なぜか？もセットの宇宙天気予報が実現した例を紹介した。

- GLE72発生直後、WASAVIESは航空機高度における被ばく量を正確に推定し、迅速な宇宙天気予報に貢献した。
- 過去のGLEと比べて異様にソフトなスペクトルという特殊性も即座に明らかになった。
- そのような特殊性を、イベント発生中に混乱せずに理解して対策するには、CMEのリアルタイムシミュレーションが不可欠。

追試1：被ばく量一致
(Matthia+2018 SW)

追試2：べき一致
(Mishev&Usoskin, 2019 SW)

WASAVIESがうまくできたのは、
べきもfluxも観測データに頼っ
ているから。

つまり地球の >100 MeVの観測
データ (GOESとNM) が充実し
ているからこそ。

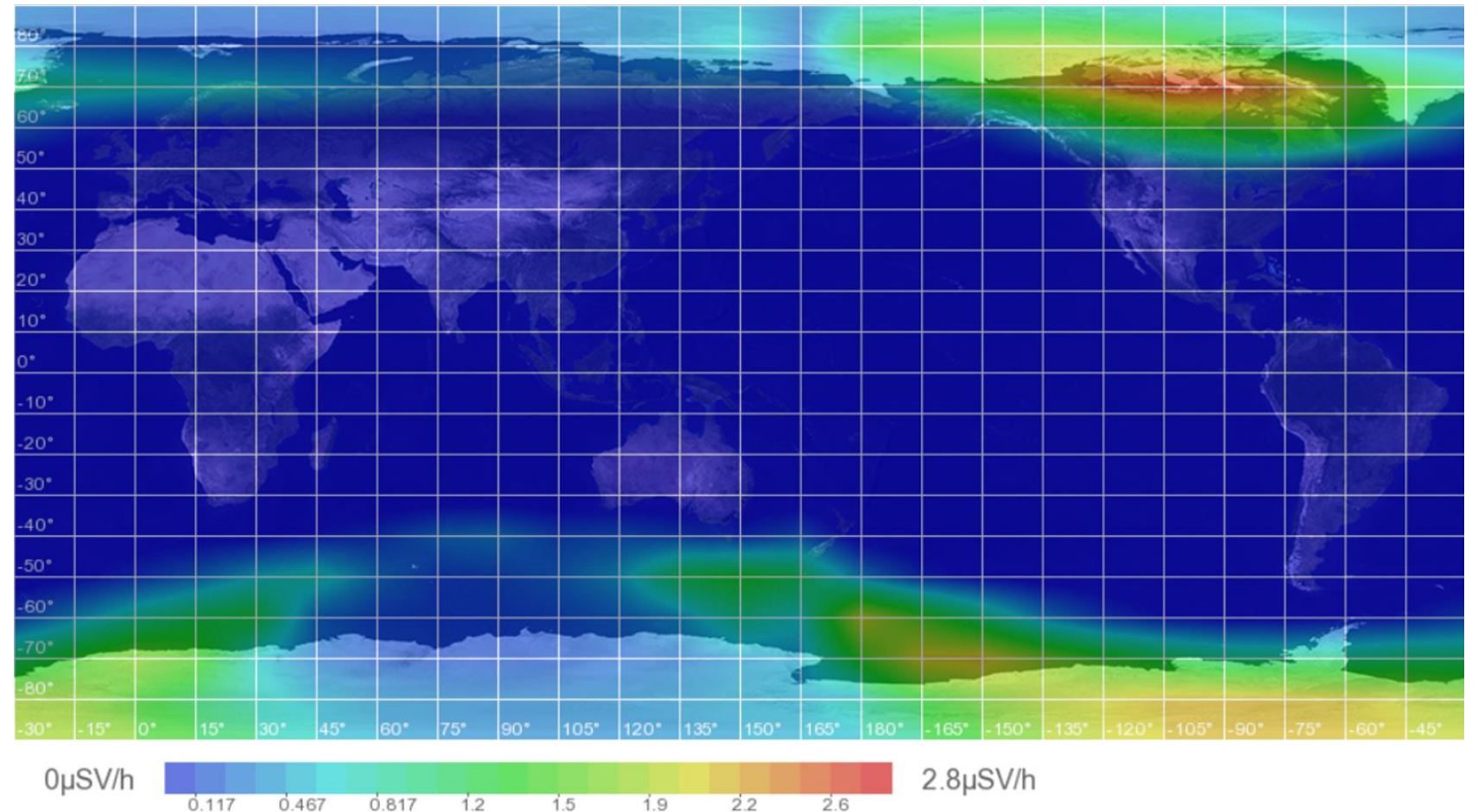


Figure 4. Global map of the calculated effective dose rates due to SEPs at a 12 km altitude at 18:00 UT on 10 September 2017.

火星で、どうするか？

100 MeV以下のモデリング
ワサビーズの先へ

次に目指すは火星

- 火星は磁場が弱く大気が薄い。
 - 地球の被ばくモデルで無視している10 MeVプロトンが無視できない
 - なぜ無視していたかも含めて、地球の**WASAVIES**を詳しく紹介した。
- 10 MeVプロトンは複雑に変化する。正確にモデリングできると…
 - 月面の被ばく対策にも有用
 - 近場の衛星のSingle Event Upset対策にも有用
 - Polar cap absorptionによるHF通信障害にも有用
 - 成層圏でのNO_x生成からのオゾン破壊研究にも有用
- 地球磁気圏への10 MeVプロトン侵入も複雑。
 - 拡張版の例、**WASAVIES-EO**の限界を紹介したが…

2017年9月で、新たにわかってきたこと

- 観測データでチートしないと実用レベルにモデルできないのは
 - 火星は、観測データも地球のように充実していない…
- >10 MeVプロトンの地磁気カットオフ
 - 半径が有限、いわゆる東西効果
- >10 MeVプロトンの生成と伝搬
 - いわゆる衝撃波加速

Kp依存Leske97モデルとSAMPEX-30MeV

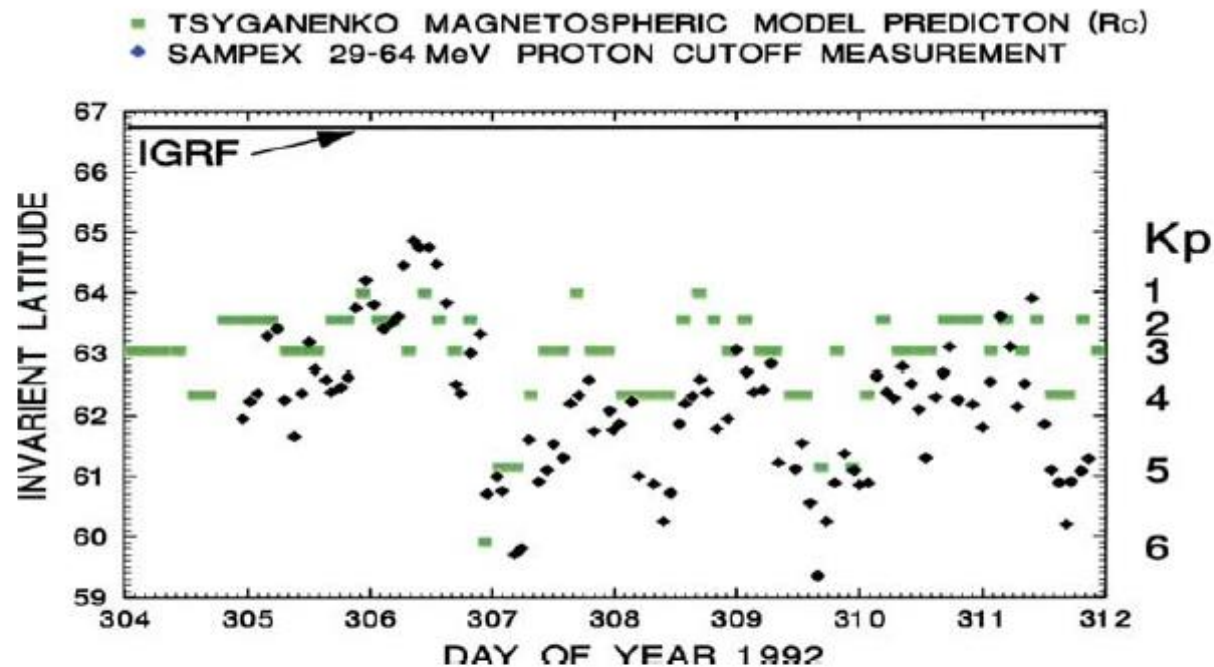


Fig. 9. Simulation of the invariant latitude of the proton cutoff energy variations as a function of the Kp index. The solid dark line at 67.5° indicates the cutoff latitude predicted by the internal IGRF magnetic field model (Smart and Shea, 1997). The gray solid squares indicate the predicted cutoff invariant latitude for the center energy of the 29–64 MeV detector on the SAMPEX spacecraft. The solid diamonds are the cutoff latitudes published by Leske et al. (1997). The cutoff latitude for each Kp value is indicated on the left of the figure and the integer Kp values are on the right.

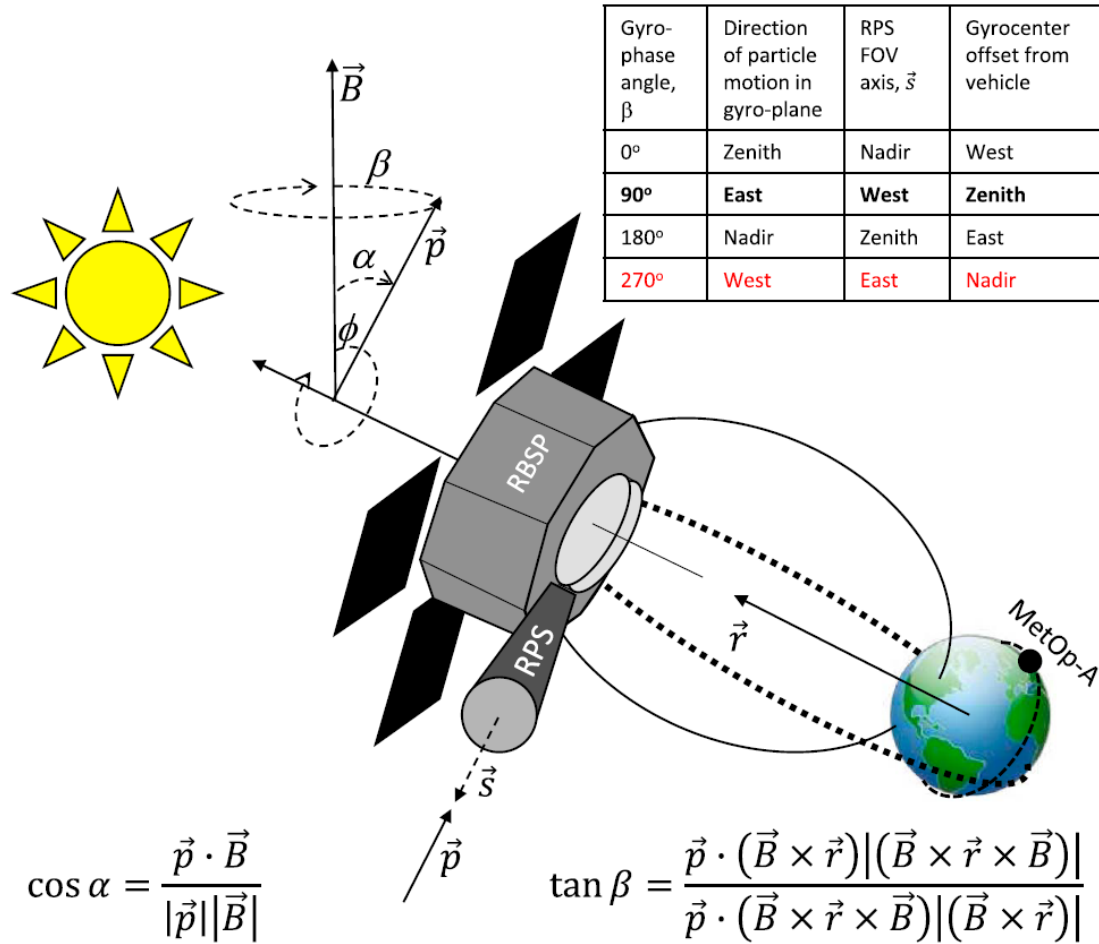


Figure 2. An illustration of the RBSP spacecraft and the Sun-Earth system with the RBSP and MetOp-A satellites. The vehicle is located at radial position \vec{r} , and the RPS FOV axis is \vec{s} . A particle entering the RPS sensor with momentum \vec{p} (opposite to \vec{s}) at spin phase ϕ has pitch angle α and gyrophase β relative to the magnetic field \vec{B} . The inset table relates the gyrophase angle to a positively charged particle's direction of motion, the RPS FOV axis, and the gyrocenter offset from the vehicle. Red and bold lines relate to coloring used in later plots. RBSP = Radiation Belt Storm Probes; RPS = Relativistic Proton Spectrometer; FOV = field of view.

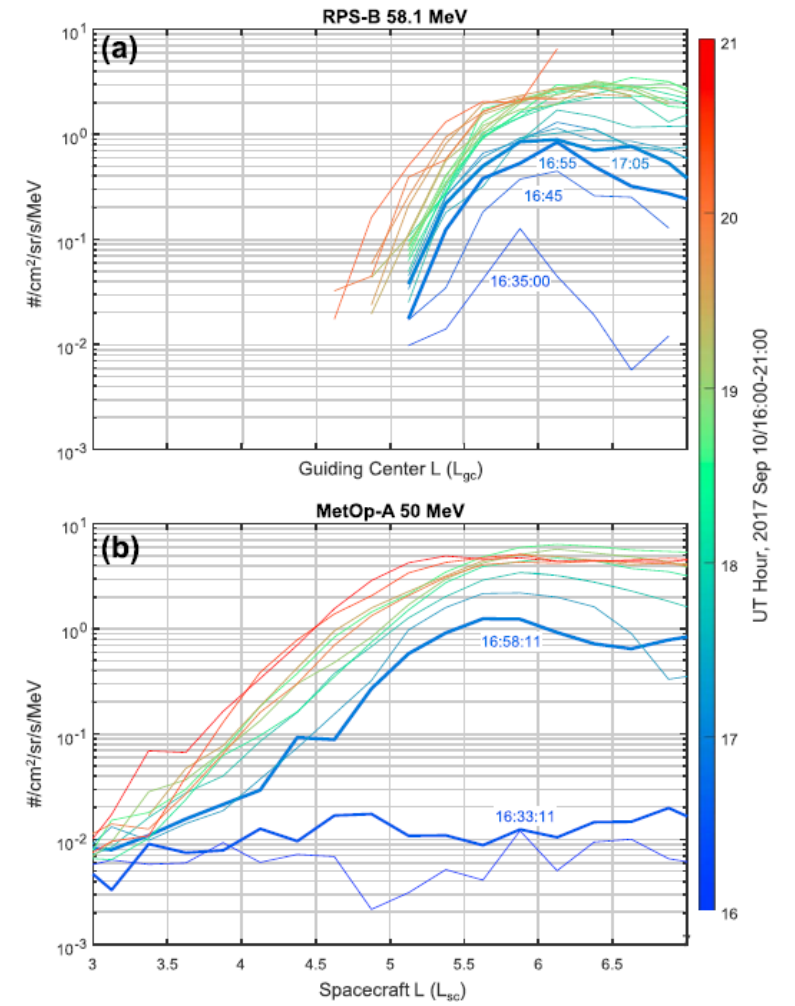


Figure 12. Panel (a) shows L_{GC} profiles inferred from the spin-resolved RPS flux data in the 58.1 MeV channel. Panel (b) shows L_{SC} profiles observed from the 50-MeV flux channel from MetOp on multiple passes into and out of the polar cap. In both panels, color indicates time, as indicated by the color bar at right. RPS = Relativistic Proton Spectrometer.

L value of guiding center

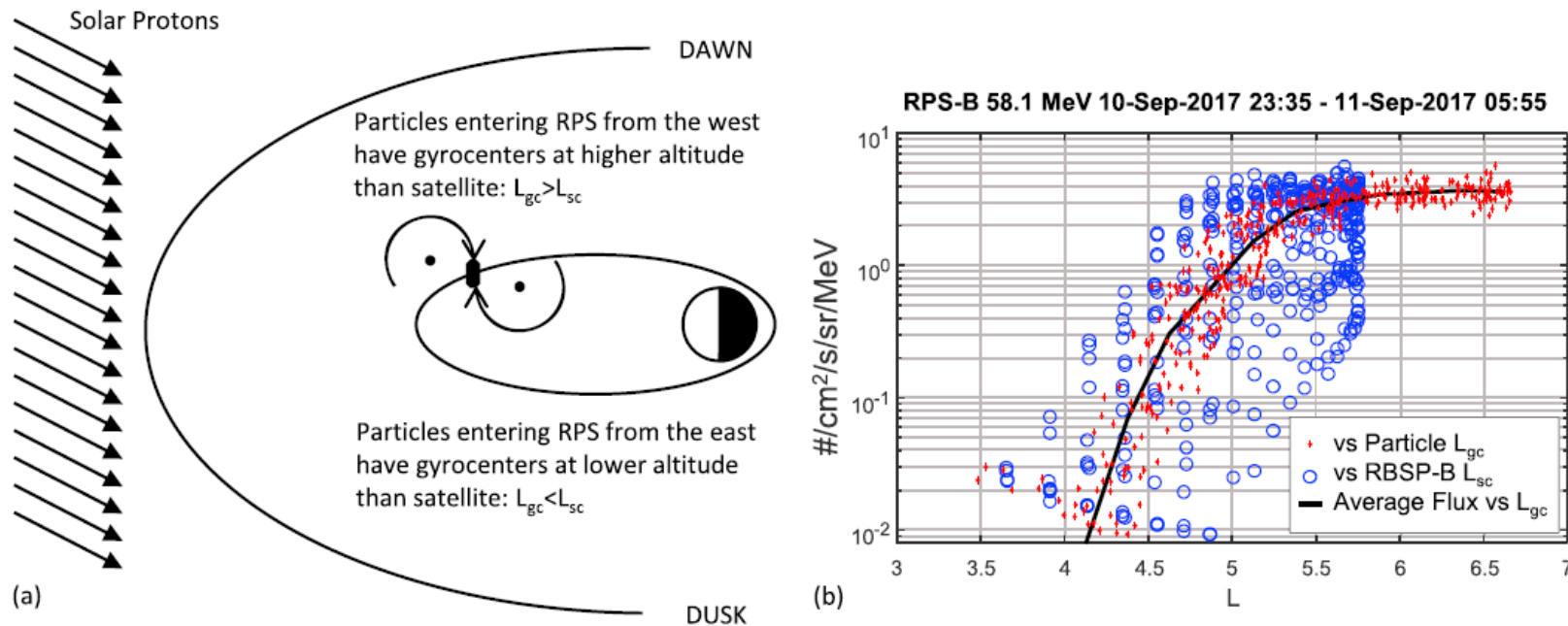


Figure 4. Panel (a) illustrates how the finite gyroradius effect leads to different particle fluxes when viewing different directions with the RPS sensor. L_{gc} is the McIlwain L value of the particle's gyrocenter, whereas L_{sc} is the McIlwain L value for a locally mirroring particle with its gyration centered on the spacecraft. Panel (b) shows how L_{gc} organizes the RPS fluxes much better than does L_{sc} during one apogee interval. RPS = Relativistic Proton Spectrometer; RBSP = Radiation Belt Storm Probes.

Model

dependence. Multiple studies have shown empirical correlation between cutoffs and geomagnetic activity (e.g., Adriani et al., 2016; Leske et al., 2001; Mazur et al., 1999; Ogiore et al., 2001). Throughout the paper, we will rely on a hybrid cutoff model owing to Ogiore et al. (2001) and Leske et al. (2001):

$$R_c = 15.062 \cos^4(\Lambda_c + Dst/19.11) - 0.363$$

where Λ_c is the cutoff invariant latitude in degrees and Dst is in nanotesla. Ogiore et al. developed the model without a Dst dependence, and Leske et al. added the Dst correction. These kinds of empirical cut-

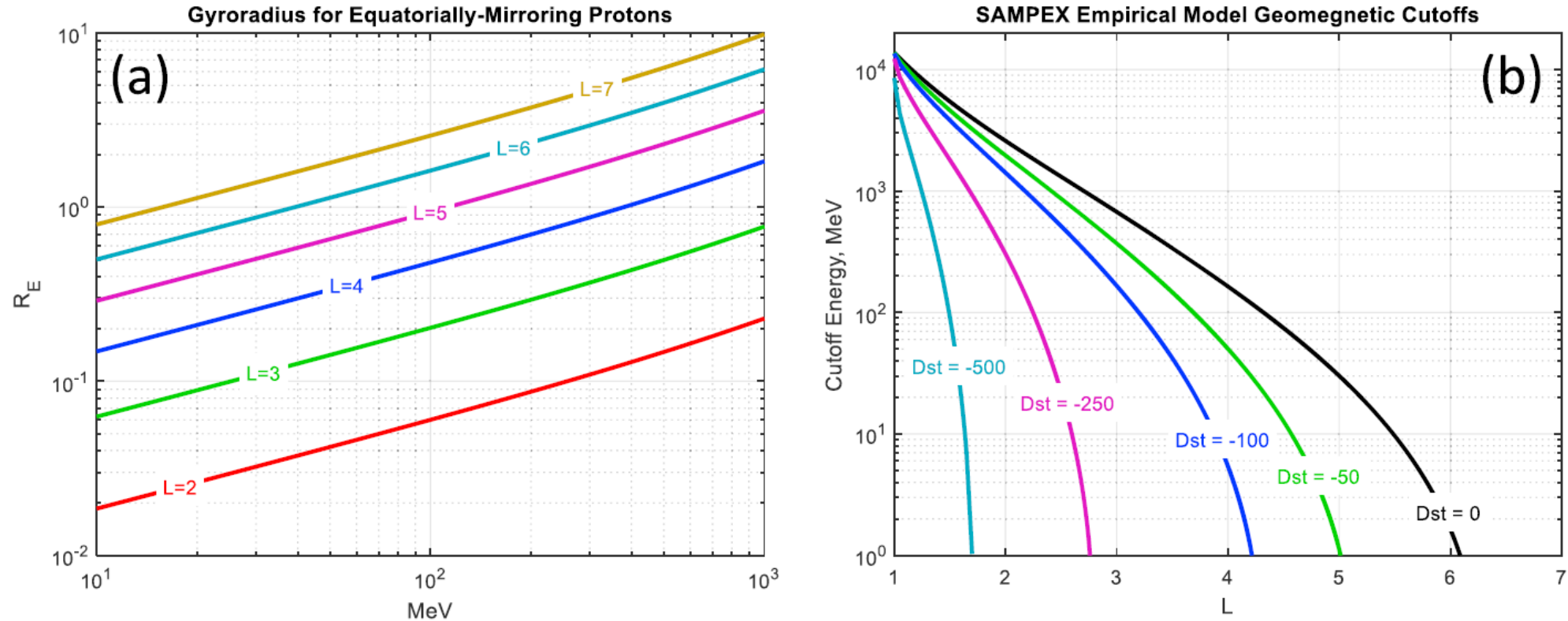


Figure 1. Panel (a) shows the gyroradius for protons mirroring at the magnetic equator in a dipole, for several values of the dipole field line label L . Panel (b) shows how geomagnetic cutoffs vary with L for several values of Dst , using the Leske et al. (2001) dependence. SAMPEX = Solar, Anomalous, and Magnetospheric Particle Explorer.

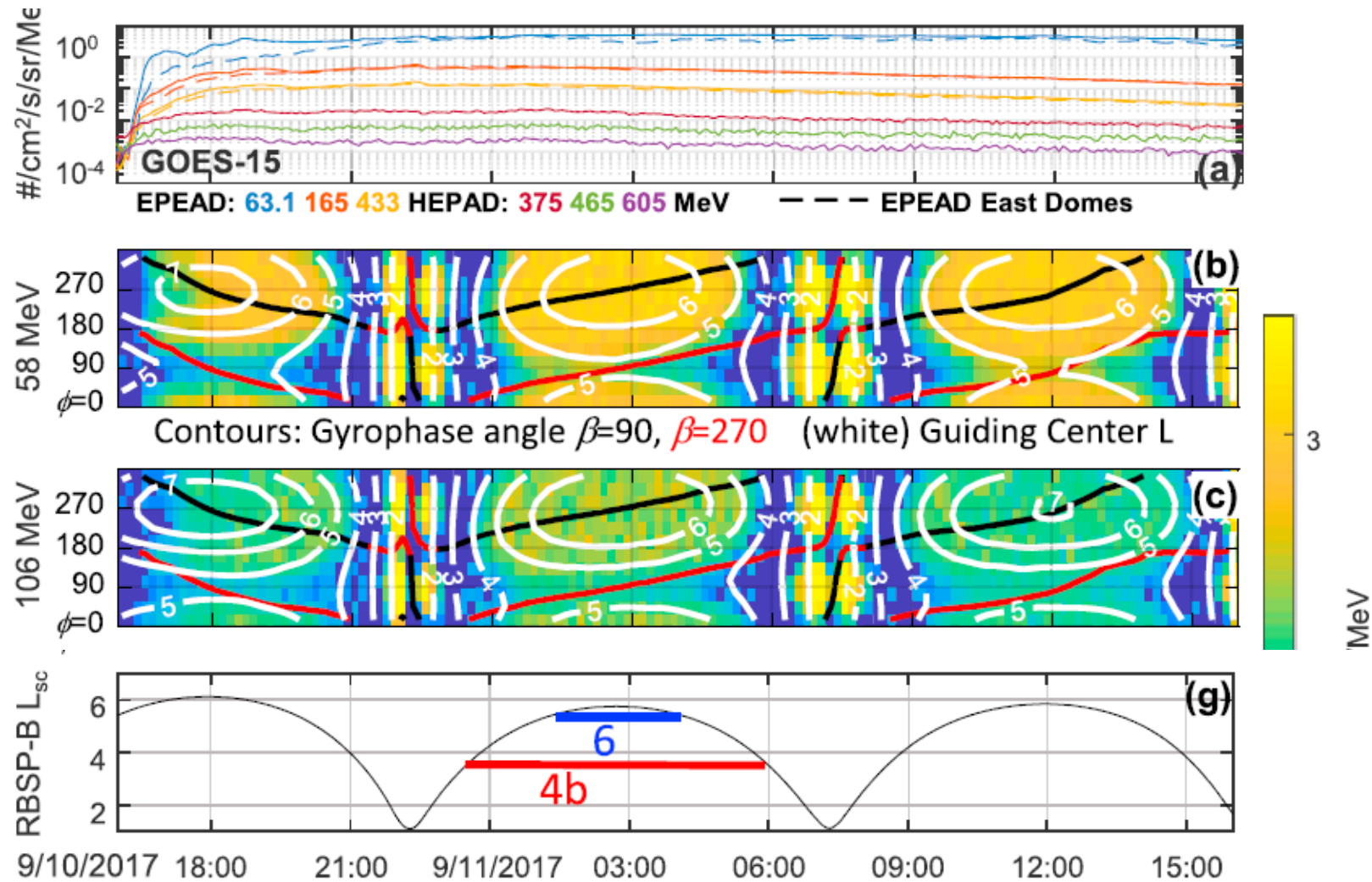


Figure 5. A zoomed in view of the 10 September 2017 solar particle event. The panels are the same as in Figure 3 with the following exceptions: White contours have been added to panels (b)–(f) to show the guiding center McIlwain L (L_{GC}), and horizontal bars in panel (g) indicate time intervals plotted in other figures as labeled. GOES = Geostationary Operational Environmental Satellite; EPEAD = energetic proton, electron, and alpha detector; HEPAD = high-energy proton and alpha detector; RBSP = Radiation Belt Storm Probes.

モデルと
あわない
(50 MeV)

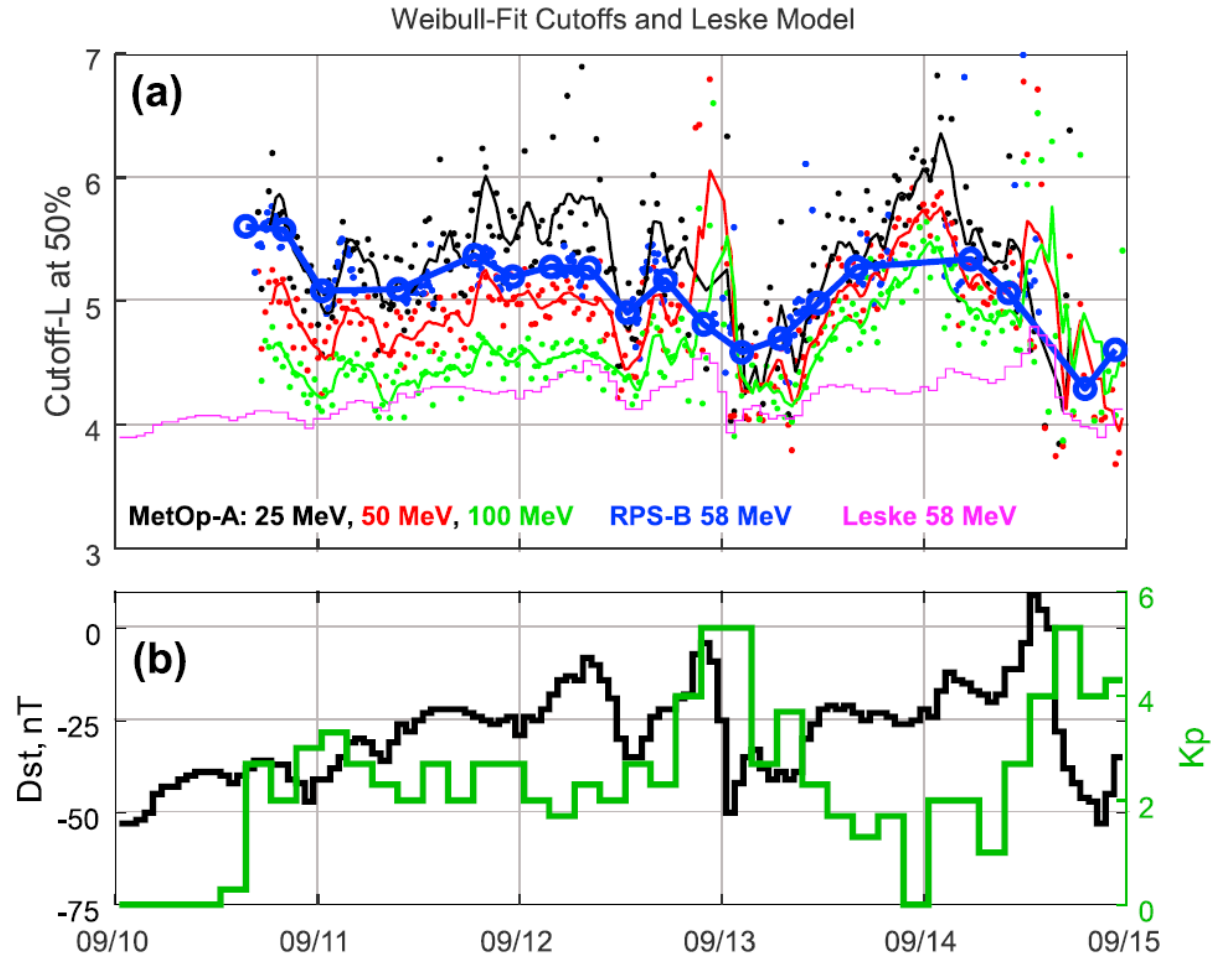
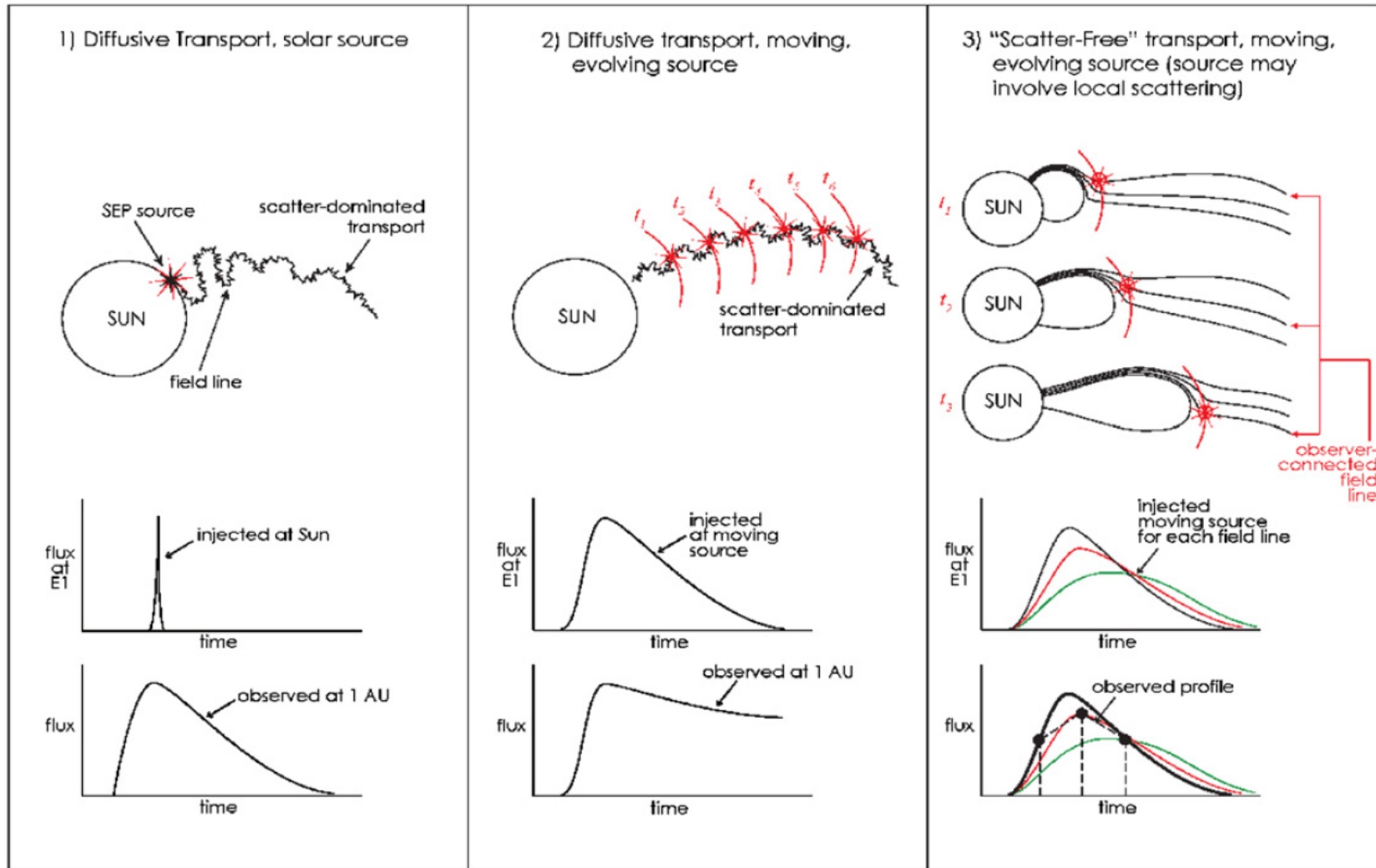


Figure 13. Panel (a) shows cutoff L estimated several different ways. The thick blue line with circles indicates whole RPS passes, whereas the small blue dots indicate cutoffs inferred from 10-min spin-resolved L_{GC} accumulations. Black, red, and green dots indicate cutoffs from individual MetOp passes in each energy channel. Thin black, red, and green traces indicate four-point trailing averages of the cutoffs (i.e., orbit averages). The thin magenta line indicates the Leske et al. model cutoff evaluated at 58 MeV. Panel (b) provides the Dst (left axis, black) and Kp (right axis, green) geomagnetic indices. RPS = Relativistic Proton Spectrometer.

SEP Transport Viewpoints

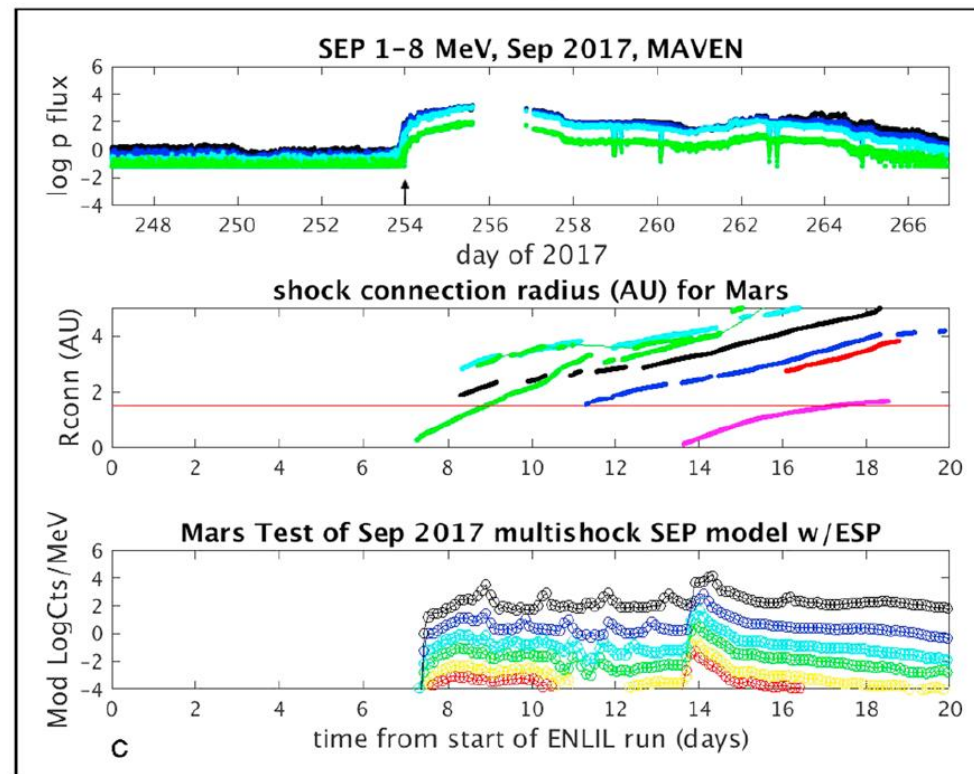
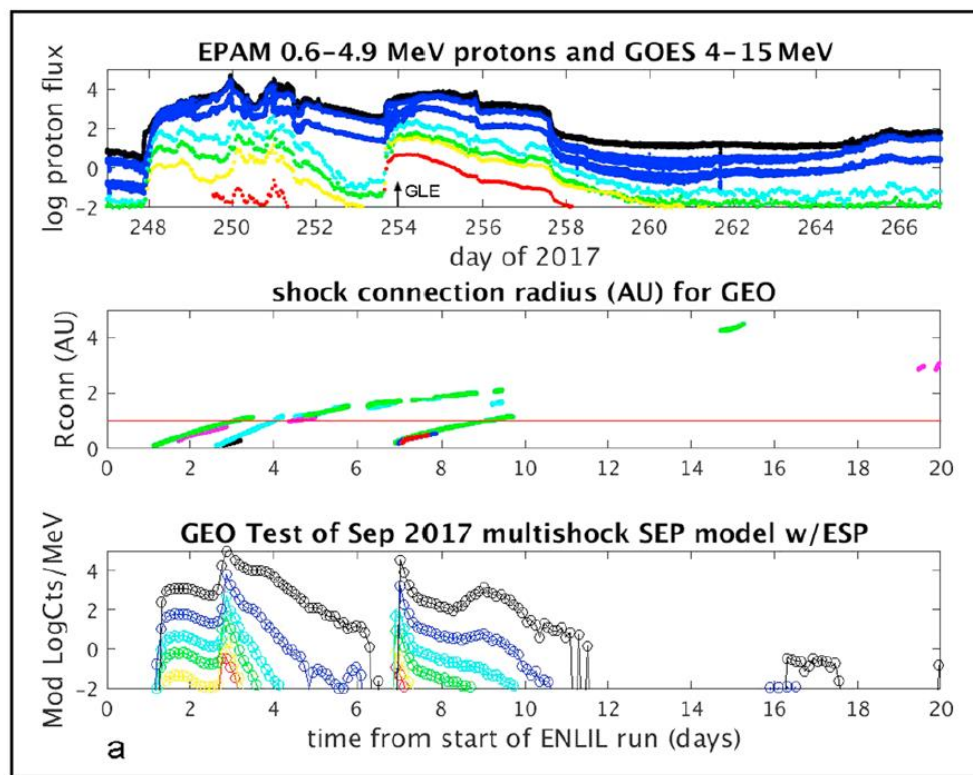
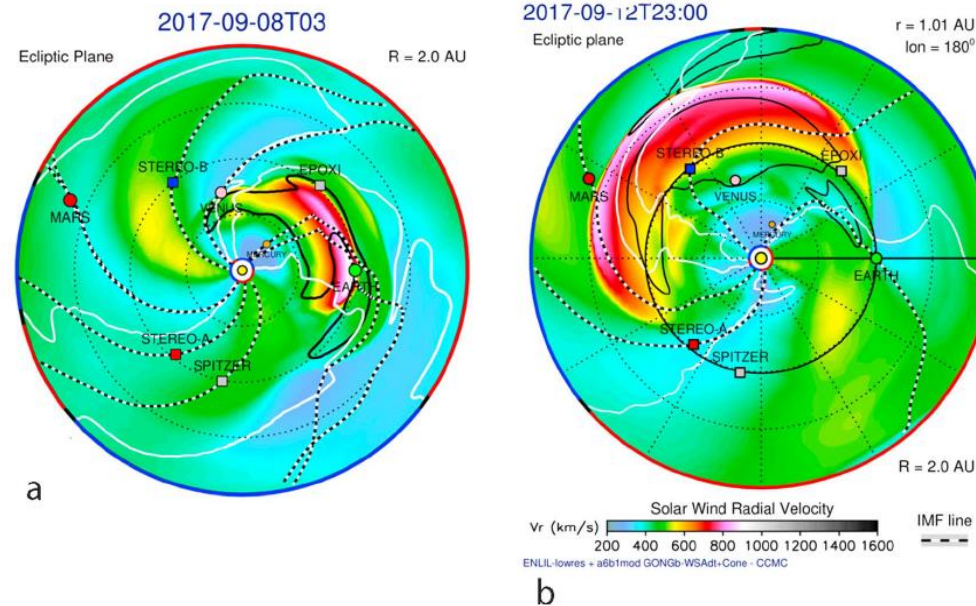


WASAVIES
(Kataoka, Sato, Kubo)

EMMREM
(Schwadron, Linker)

SEPMOD
(Luhmann)

Shock接続モデル ENLIL+SEPMOD



SEPMOD

- Test particles
 - Isotropic protons injected at shock, guiding center approximation
 - Mirrored and focused along shock-connected 1D field line
- Initial energy spectrum of $KE^{-\gamma}$ Kが量を決める
 - $K \propto$ velocity jump ratio (Lario+1998)
 - $\gamma = 0.5(d+2)/(d-1)$, $d =$ compression ratio (DSA theory)
- Additional ESP flux enhancement
 - if moving shock >300 km/s
 - x50 peak flux, softer spectrum $\gamma -2.5$, fall-off half-width 0.1 AU

- コロナから
- Lagrangian

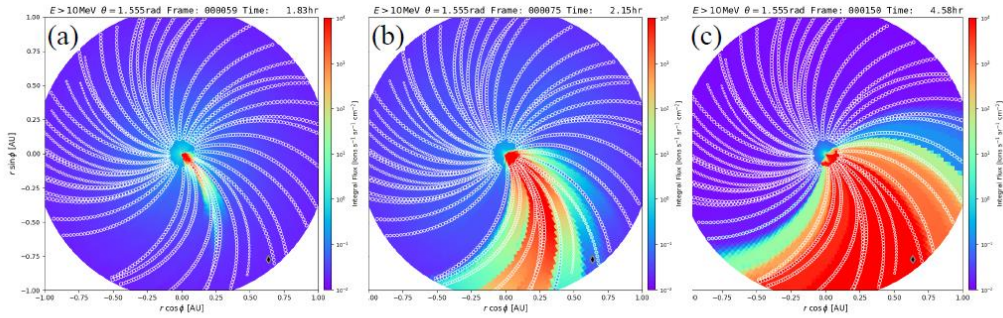
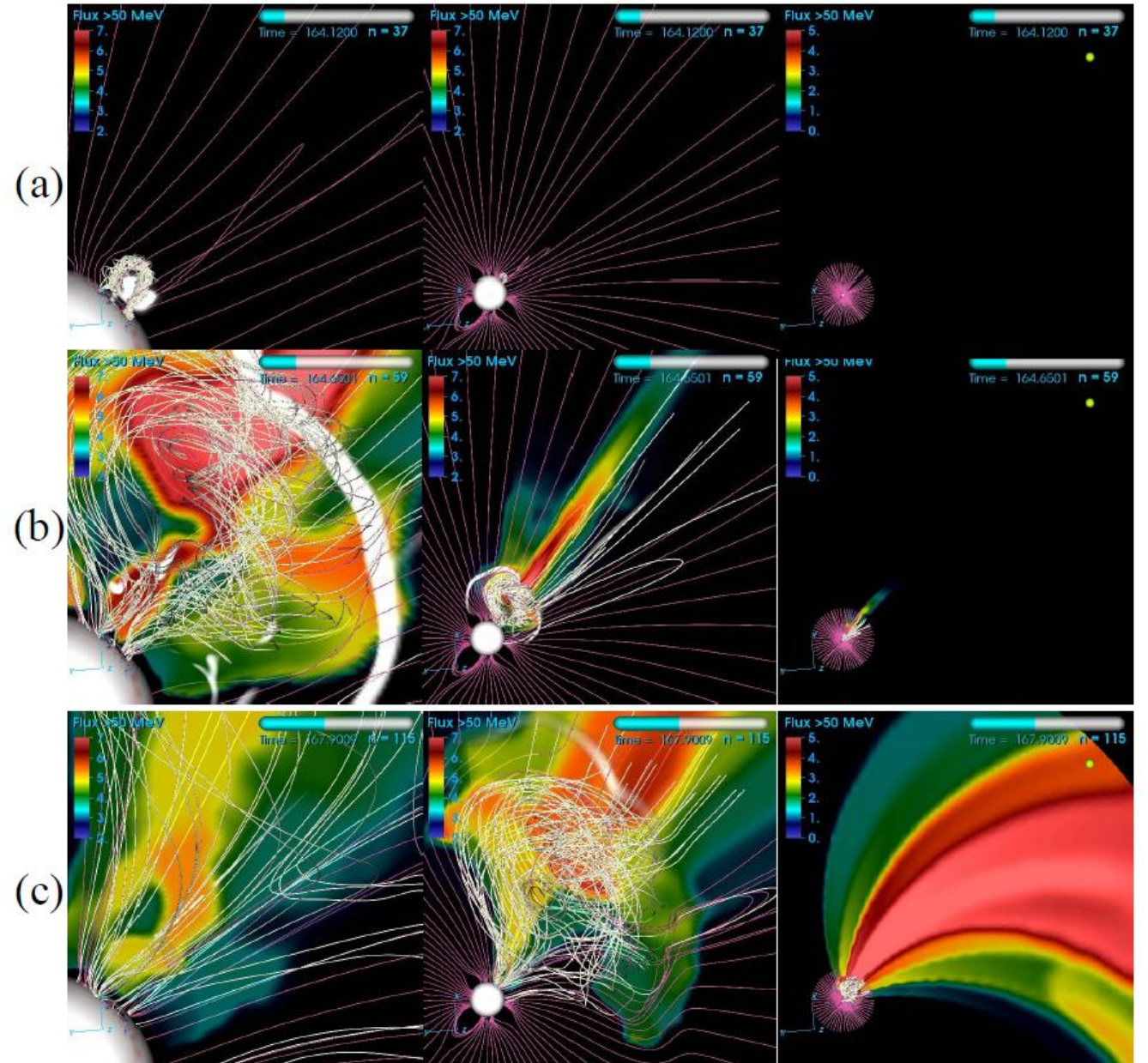


Figure 5. 2D visualization of the simulated particle flux in the first GOES energy bin ($F_{\text{int}} > 10 \text{ MeV}$) in the heliographic $(r-\phi)$ plane. (a) Time = 1.8 hours in the simulation, about 14 minutes after the start of the eruption. (b) Time = 2.15 hours, about 1/2 hour after eruption. (c) ~ 3 hours after eruption.



EMMREM/EPREM

 μ : cosine pitch angle

$$\begin{aligned}
& \left(1 - \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{e}_b v \mu}{c^2} \right) \frac{df}{dt} && \text{convection} \\
& + v \mu \mathbf{e}_b \cdot \nabla f && \text{streaming} \\
& + \frac{(1 - \mu^2)}{2} \left[-v \mathbf{e}_b \cdot \nabla \ln(B) - \frac{2}{v} \mathbf{e}_b \cdot \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \mu \frac{d \ln(n^2 / B^3)}{dt} \right] \frac{\partial f}{\partial \mu} && \text{focusing} \\
& + \left[\frac{\mu \mathbf{e}_b}{v} \cdot \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \mu^2 \frac{d \ln(n / B)}{dt} + \frac{(1 - \mu^2)}{2} \frac{d \ln(B)}{dt} \right] \frac{\partial f}{\partial \ln p} && \text{cooling} \\
& = \frac{\partial}{\partial \mu} \left(\frac{D_{\mu\mu}}{2} \frac{\partial f}{\partial \mu} \right) && \text{pitch angle scattering}
\end{aligned}$$

mean free path and seed population

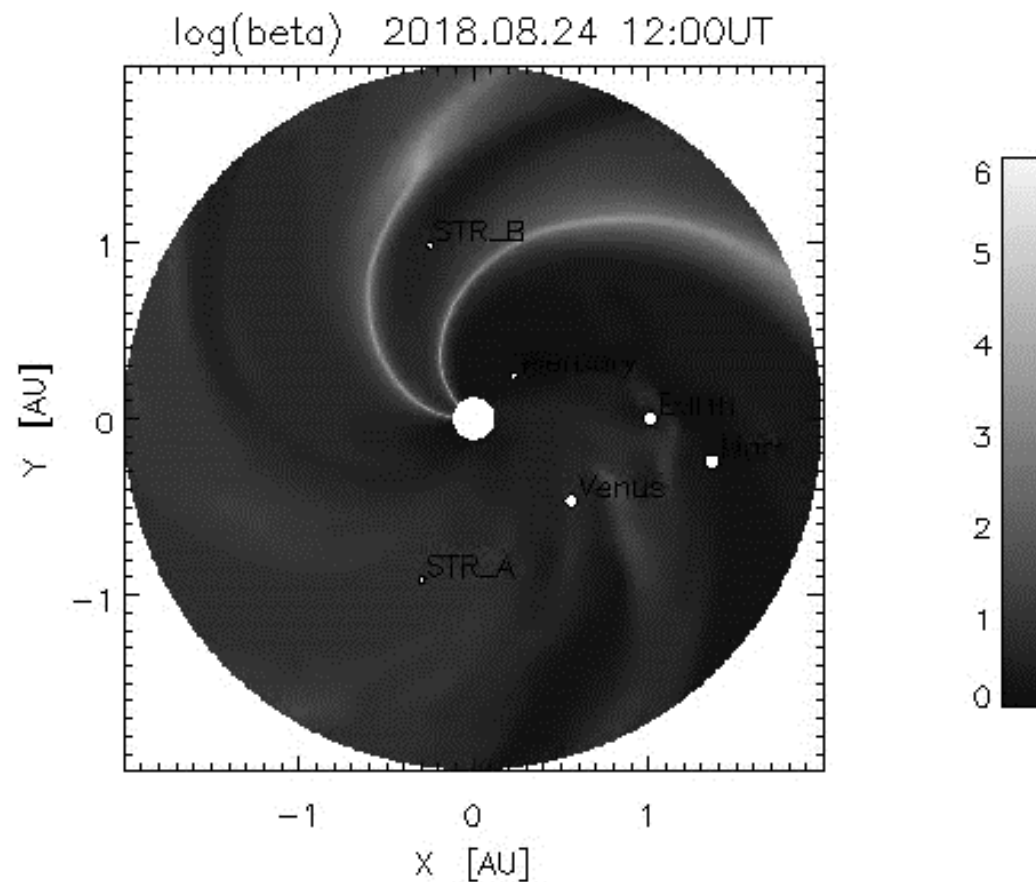
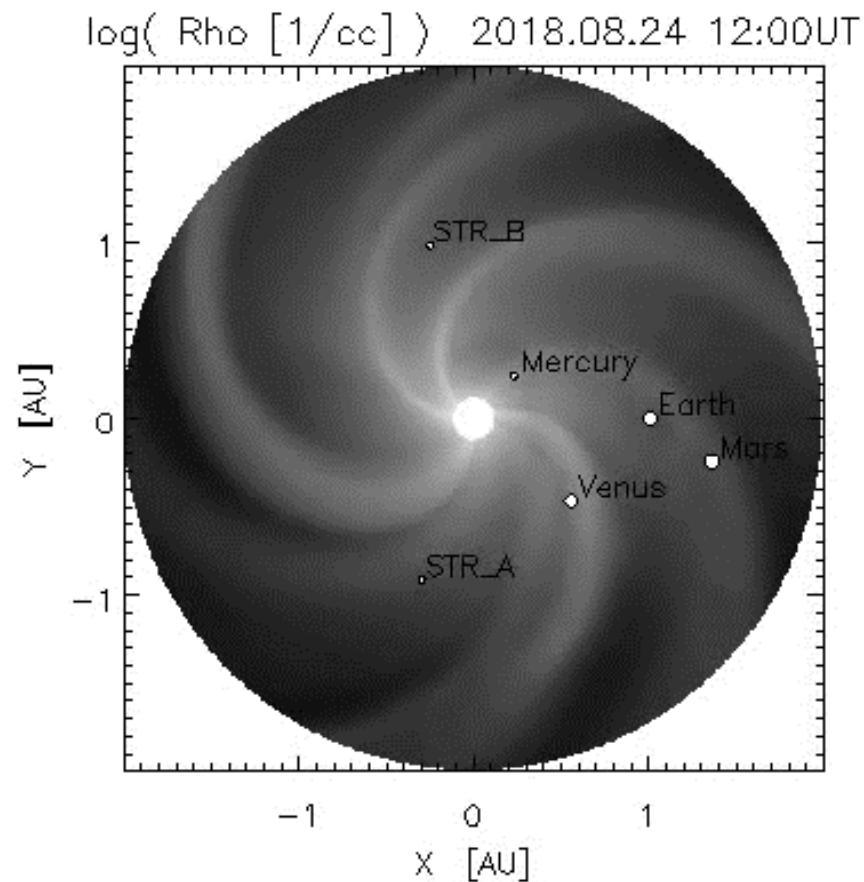
$$\lambda_{\parallel} = \lambda_0 \left(\frac{r}{1 \text{ AU}} \right)^2 \left(\frac{R_g}{1 \text{ GV}} \right)^{1/3}$$

$$J_{seed}(T, r) = J_0 \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 \left(\frac{T}{1 \text{ MeV}} \right)^{-1.96} \exp\left(\frac{-T}{1 \text{ MeV}} \right)$$

J_0 が量を決めるが...

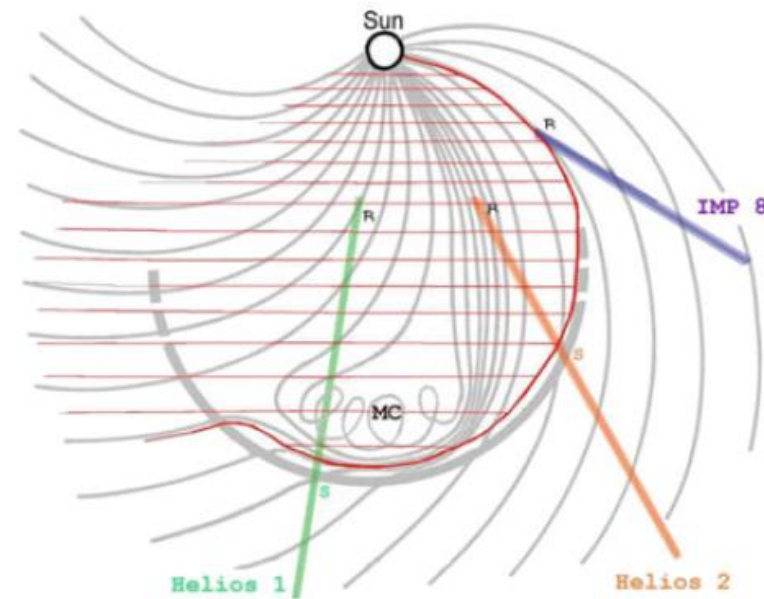
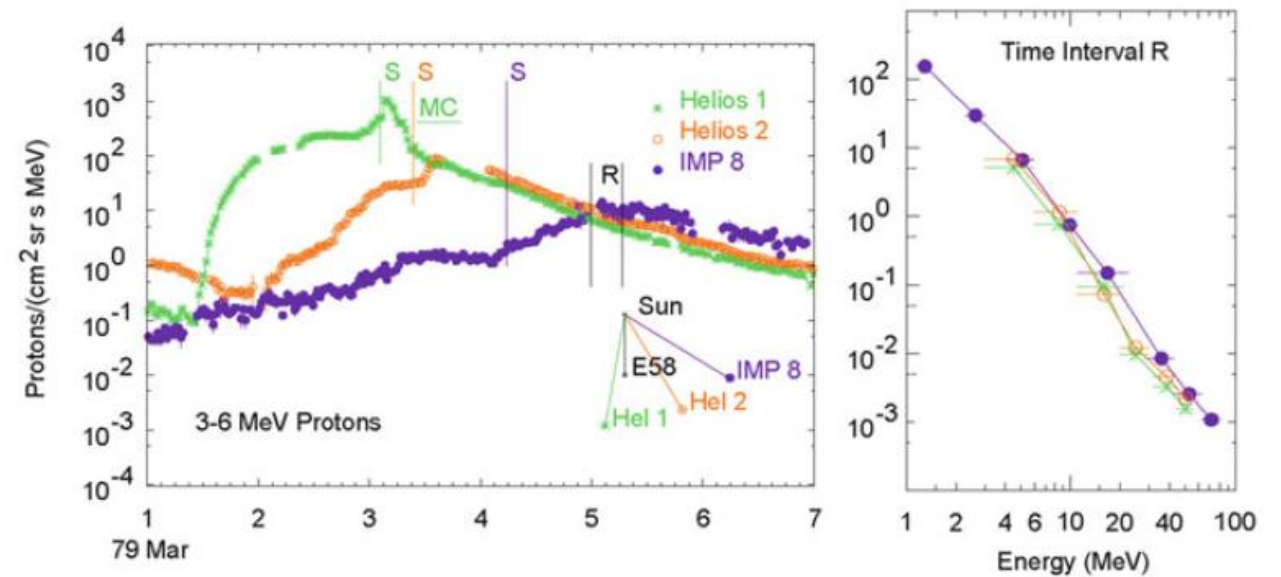
J_0 = chosen to reflect the activity level of the time period being modeled.

基本作戦：SUSANOO-CMEを使う



S-CME前提で

- Reservoir = invariant spectral regionをうまく利用して、衝撃波加速とfocused transportでESPをモデリング。
- WASAVIESはGLEに限定してあるため、多くは作り直す必要がある。



Streaming Limit

巨大イベントのESPのバックグラウンドとしても使える？

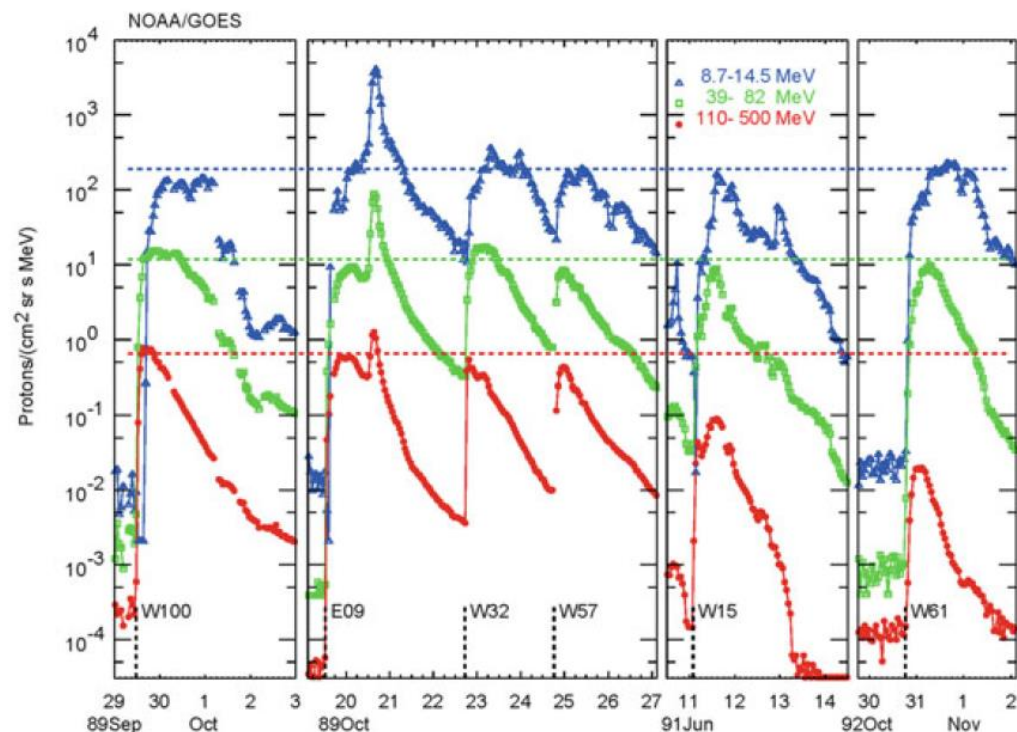


Fig. 6.5 Intensity levels are shown in six large SEP events with the corresponding streaming limit (Reames and Ng 1998)

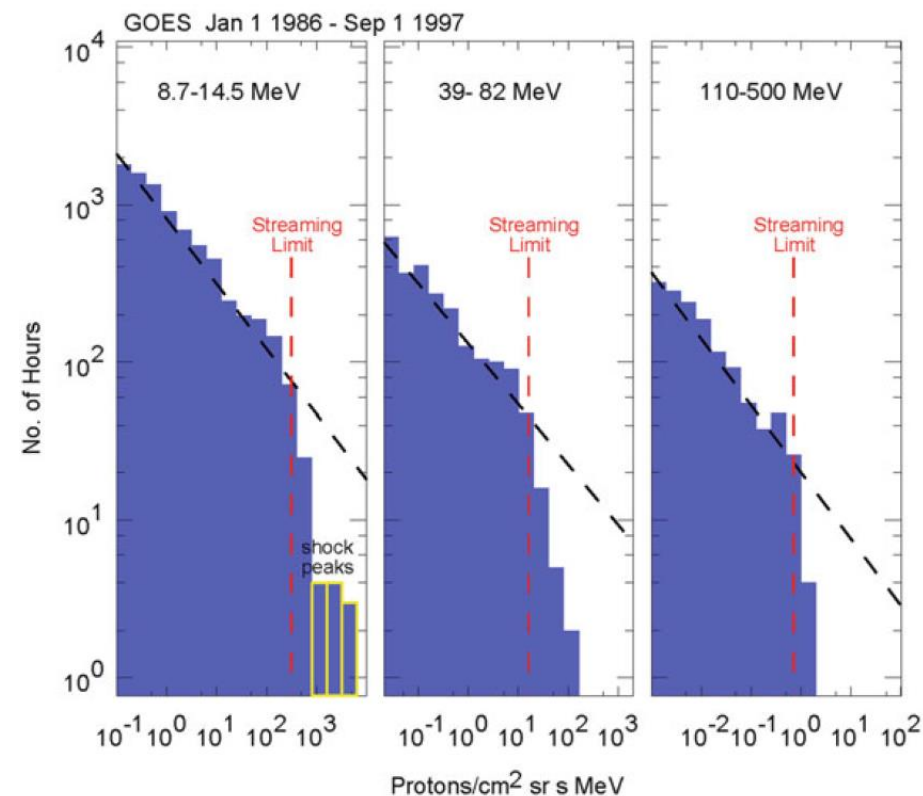
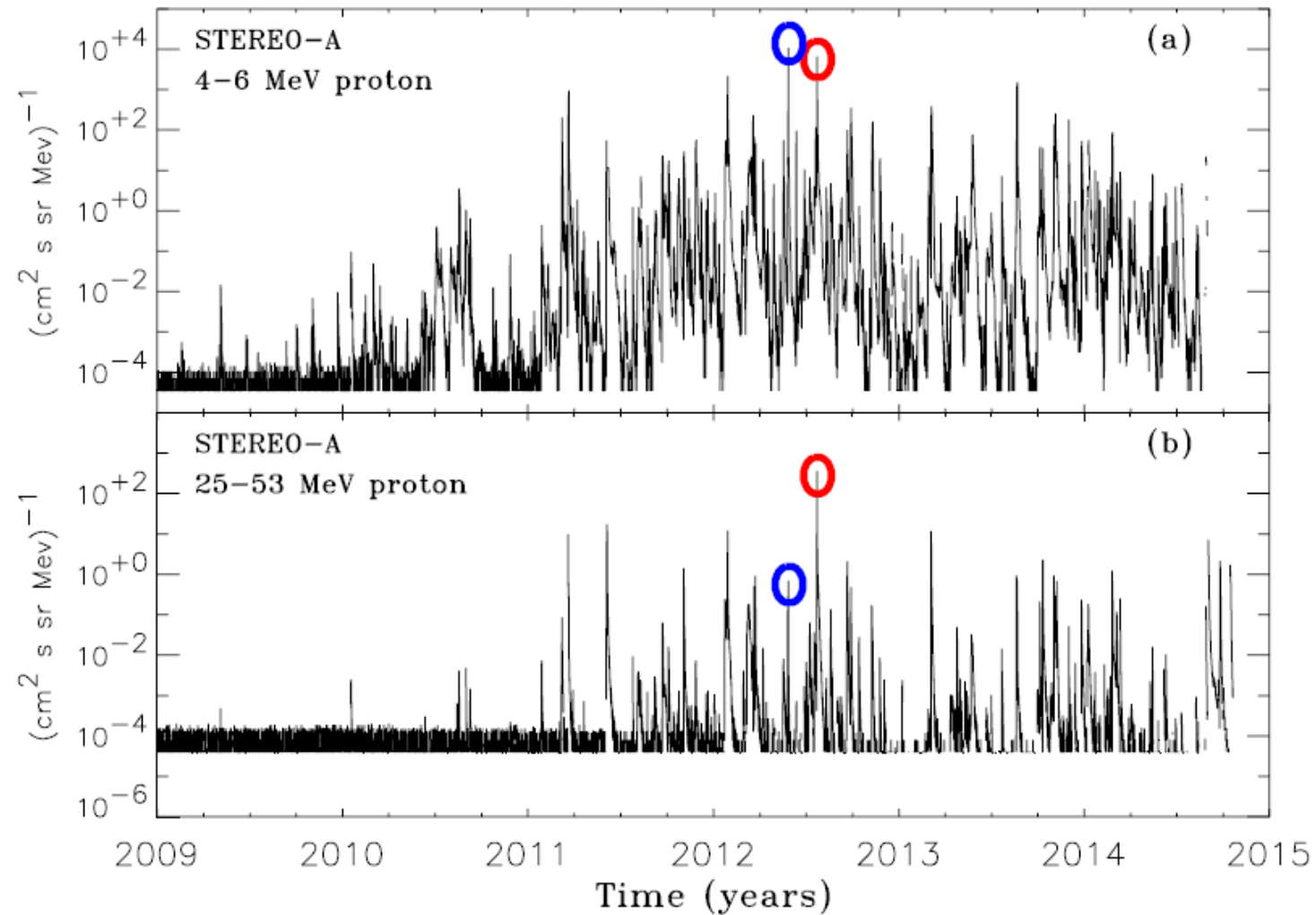


Fig. 6.4 The number of hours a given intensity is observed in ~11 years is shown for three different proton energy bins. Only intensities near the rarer shock peaks are seen above the streaming limit (Reames 2013)

Lario+2015

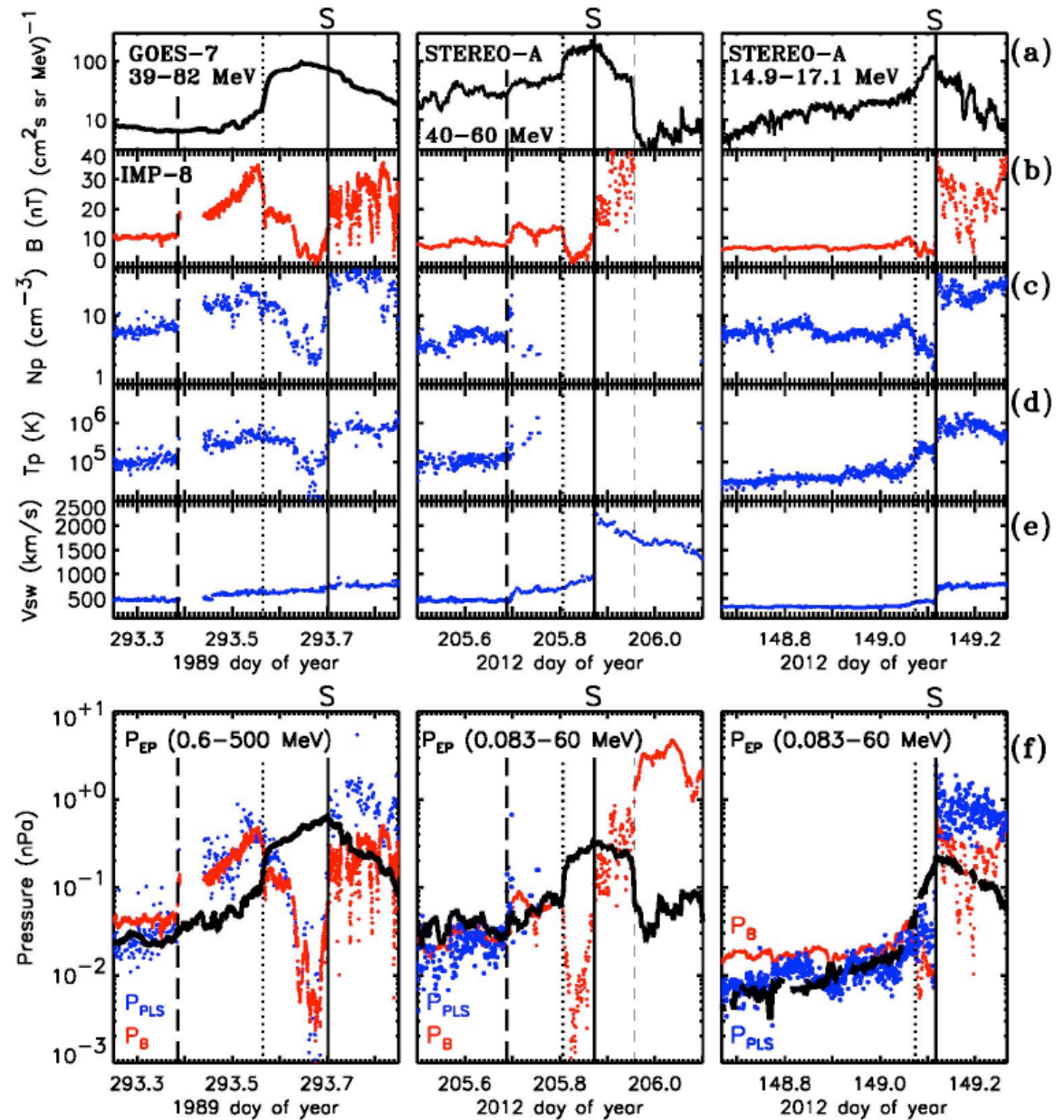
ただし、最も激しいESPイベントを見ると…



Lario+2015

烈しいESPイベントでは

$$P_{EP} > P_B + P_G$$



Lario+2015

- P_{EP} の計算、答え合わせ用にメモ

14th AIAC

Journal of Physics: Conference Series **642** (2015) 012014

IOP Publishing

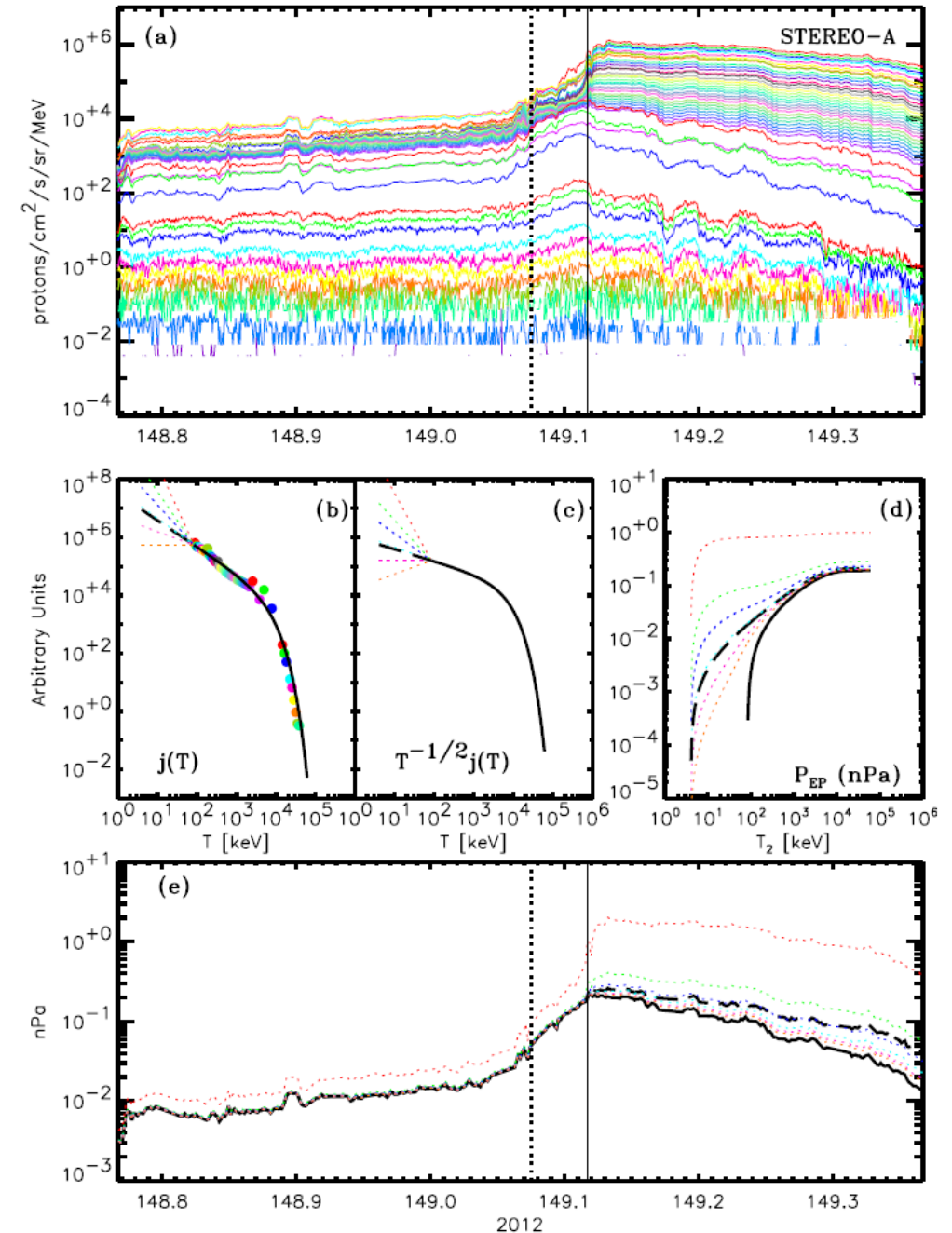
doi:10.1088/1742-6596/642/1/012014

Appendix A. Computation of energetic particle pressure P_{EP}

The expression used to compute the pressure exerted by the energetic protons is

$$P_{EP} = (4\pi/3)(2m)^{1/2} \int_{T_1}^{T_2} dT T^{1/2} j(T), \quad (1)$$

where m is the proton mass, $j(T)$ is the differential proton flux at the reference energy T , and T_1 and T_2 are the boundaries over which we evaluate the pressure P_{EP} [11]. Strictly speaking, this expression should be evaluated in the plasma frame [15], but since our lower limit for the proton energies is ~ 83 keV (corresponding to a proton velocity of $v \sim 4000$ km s^{-1}), the expression in the spacecraft frame approximates the correct partial pressure of energetic particles to the order of $O(U/v) < 0.10$.



Hassler+2018SW

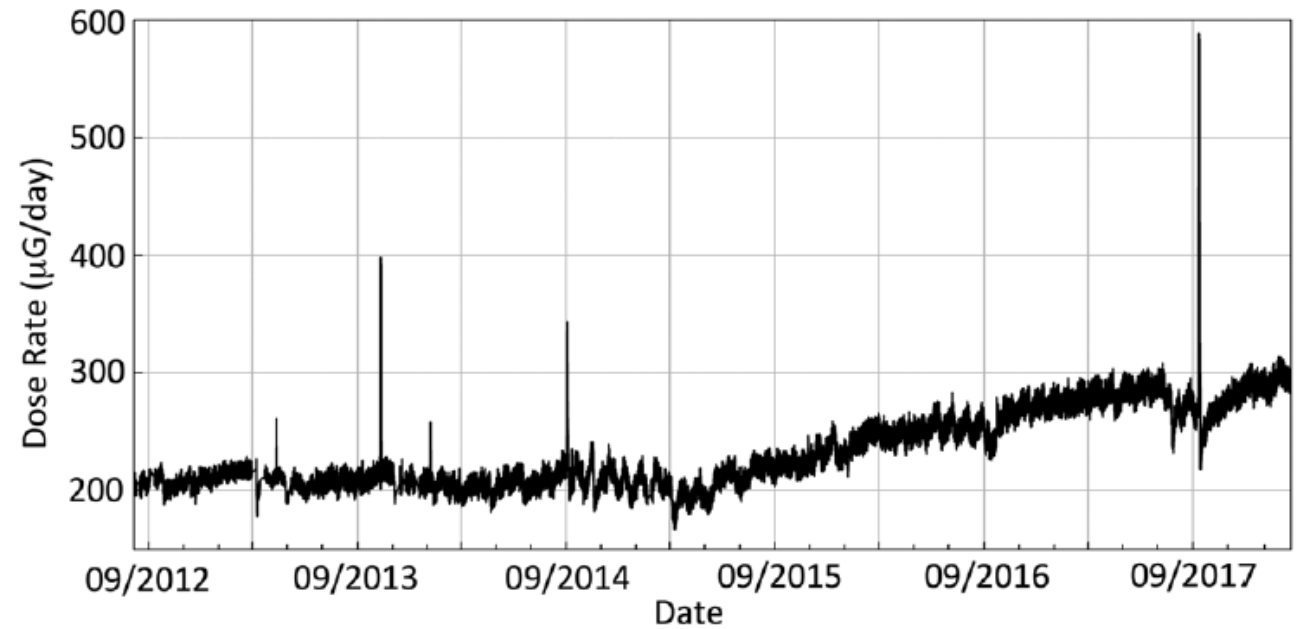
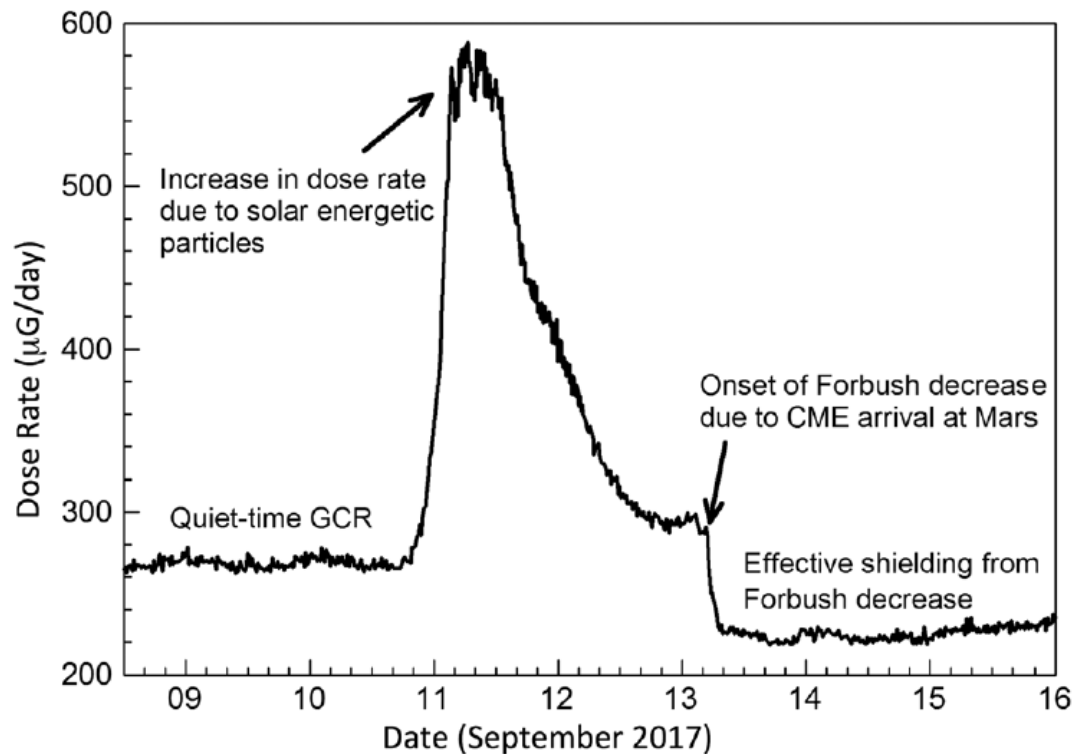


Figure 5. Radiation Assessment Detector dose rate as a function of time from 7 August 2012 to 15 February 2018. The dose rate has increased $>50\%$ since summer 2015 due to decreased solar activity as the Sun approaches solar minimum. Radiation Assessment Detector had observed only relatively small events until this most recent event on 10 September 2017. However, it must be noted that a solar energetic particle event must be relatively hard (>150 MeV) to make it to the surface; otherwise the only observed effect may be a Forbush decrease.

ワークシヨツプを通して知りたいこと？

- 地球が上流にいればチートできるが、どこまで離れると使い物にならないか？
 - リザーブ？べきのルール？
 - グローバルなチート
- 太陽風のガス圧や磁気圧、衝撃波パラメタから、火星での太陽プロトンフラックスの最大値など決められないか？
 - ストリーミングリミット？
 - ローカルなチート
- 使えるデータ？
 - 各巨大イベントの火星SEPデータを良く見たい、大気シミュレーションもやりながら。
 - 数年後だと普通に使えるデータは？
 - フォーブッシュどうする？
 - ヘリウムどうする？

まとめ：100 MeVより低いと大変

- 基本的なこと
 - コロナ質量放出と太陽高エネルギー粒子の関係とか、被ばくとか
- 地球で、どうやったか
 - 100 MeV以上のSEPモデリング、ワサビーズの紹介
- 火星で、どうするか
 - 100 MeV以下のSEPモデリング、ワサビーズの先へ