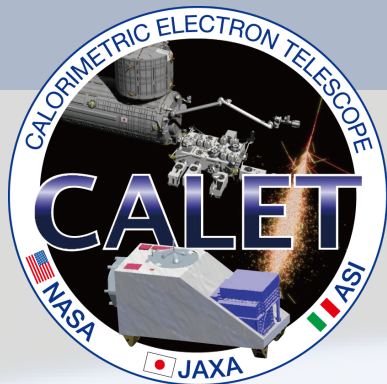
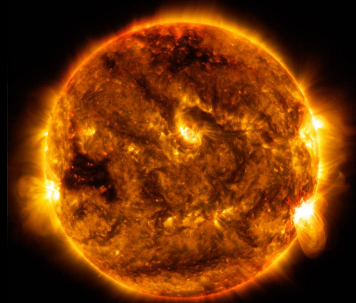


CALETによる 太陽変動と相対論的電子降下の観測

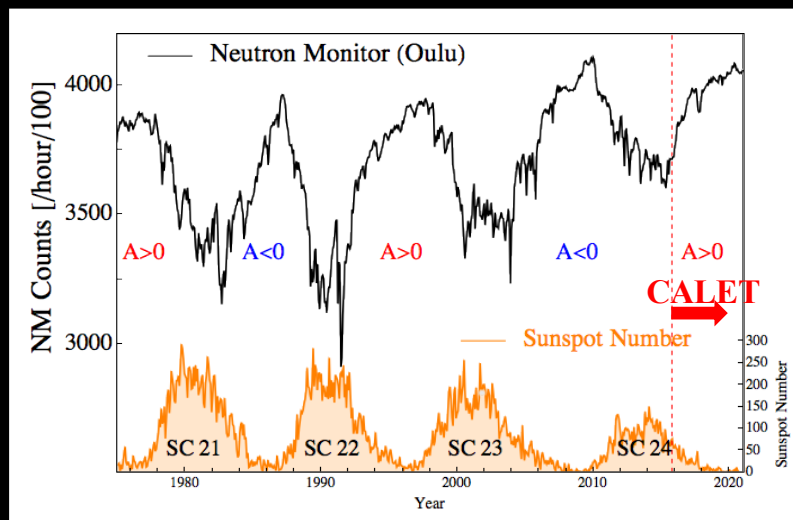
茨城高専, 極地研^A, 信大理^B, 東大宇宙線研^C,
JAXA^D, 早大理工総研^E, 国立天文台^F
三宅晶子, 片岡龍峰^A, 高柚季乃^B, 宗像一起^B,
浅岡陽一^C, 中平聡志^D, 鳥居祥二^E,
寺澤敏夫^F, 赤池陽水^E, 小林兼好^E,
他CALETチーム

太陽変動と相対論的電子降下 (REP)

- **太陽変動**: 太陽活動に伴う1-10GeV銀河宇宙線の強度変動
- **相対論的電子降下 (REP現象)**: 地球磁気圏内のプラズマ波動によるバンアレン帯のMeV電子の降下



銀河宇宙線



バンアレン帯

放射線電子

ホイッスラー波

EMIC波

CALETによる1-10GeV電子・陽子の観測

LEE shower trigger

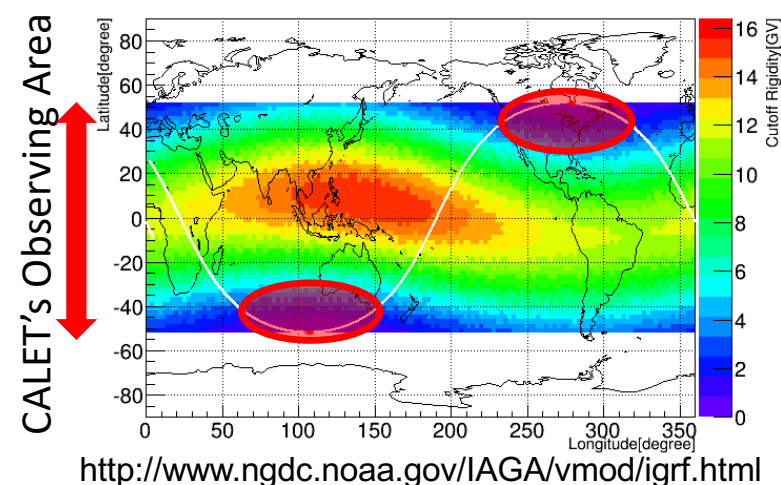
地磁気によるcutoff rigidityが約5.0GV以下の極領域 (ISSの周回軌道中、南北それぞれで90秒) において実施される、エネルギー閾値1.0GeVのトリガーモードで検出したイベントを解析

全電子・陽子のイベント選別条件

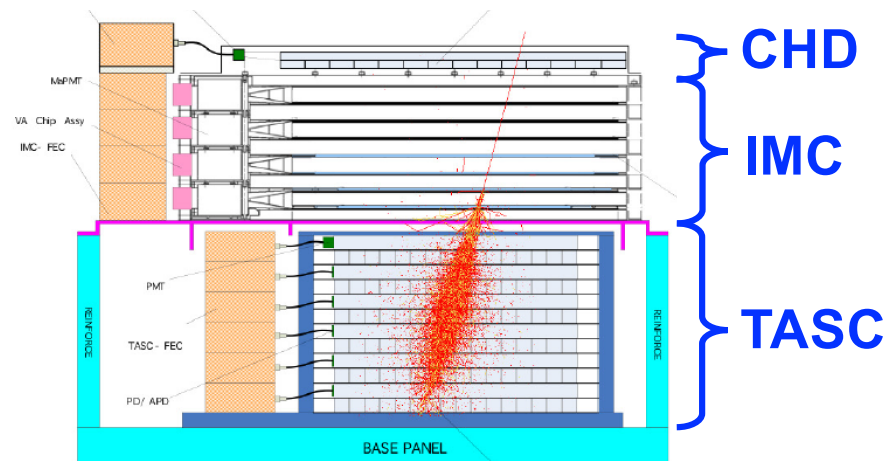
- Offline Trigger
- 飛跡再構成の精度
- 飛跡の幾何条件
- CHDでのenergy deposit
- IMC最下層でのenergy deposit やシャワー集中度
- TASC最上層でのシャワーの横広がり
- IMC, TASCでのenergy deposit (エネルギー再構成)

以上の選別を実施することで、低エネルギー全電子・陽子を取得

Cutoff rigidity map and ISS orbit

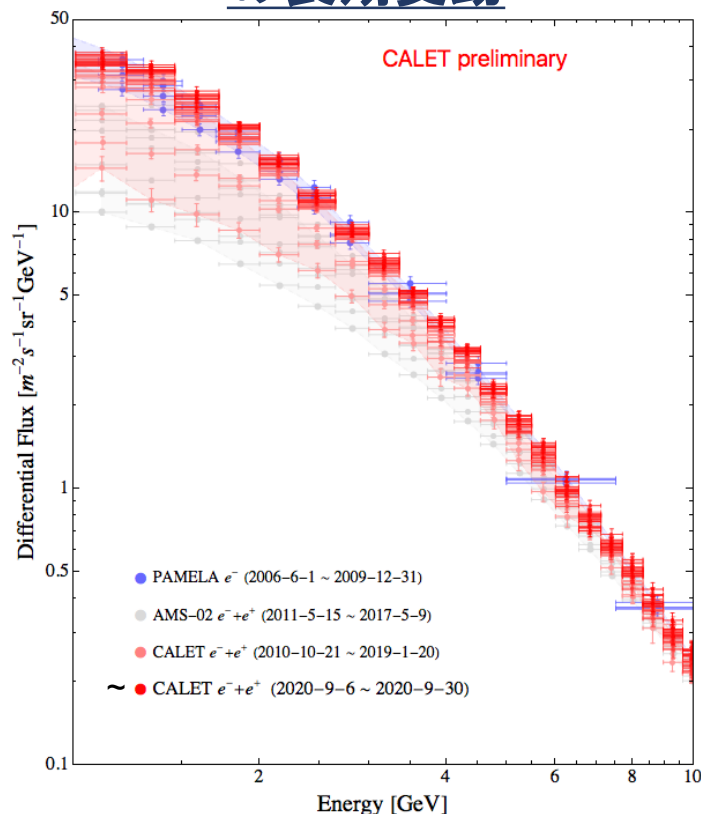


CALET Calorimeter

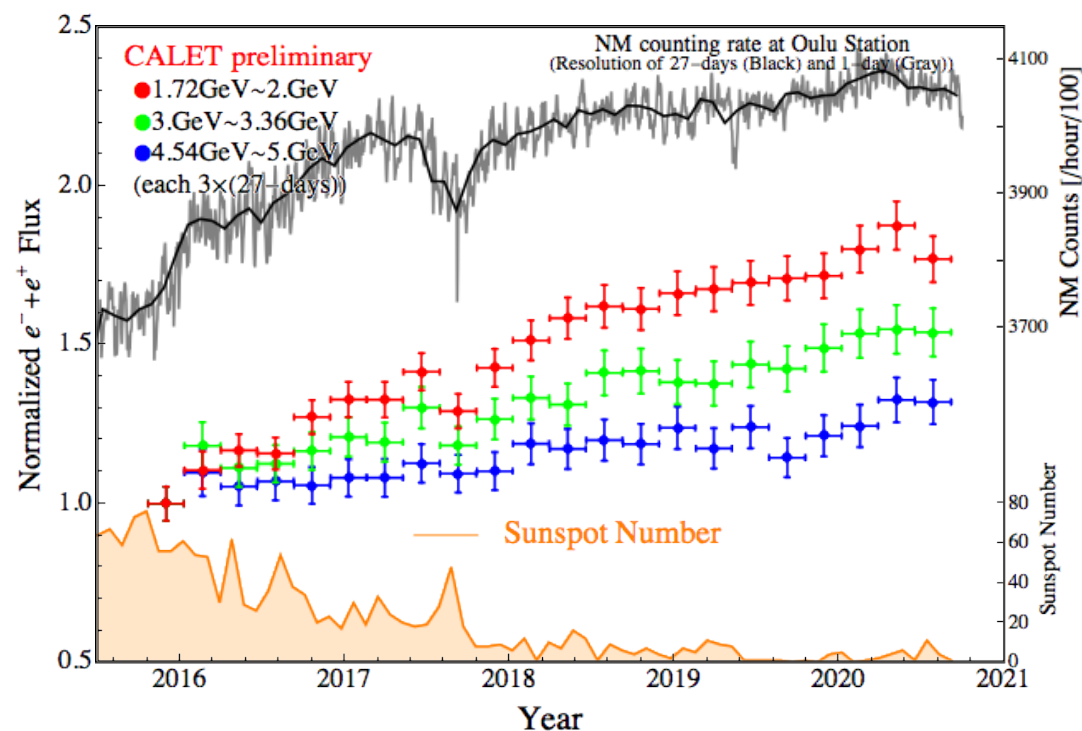


全電子(電子+陽電子)フラックスの長期変動

全電子エネルギースペクトルの長期変動



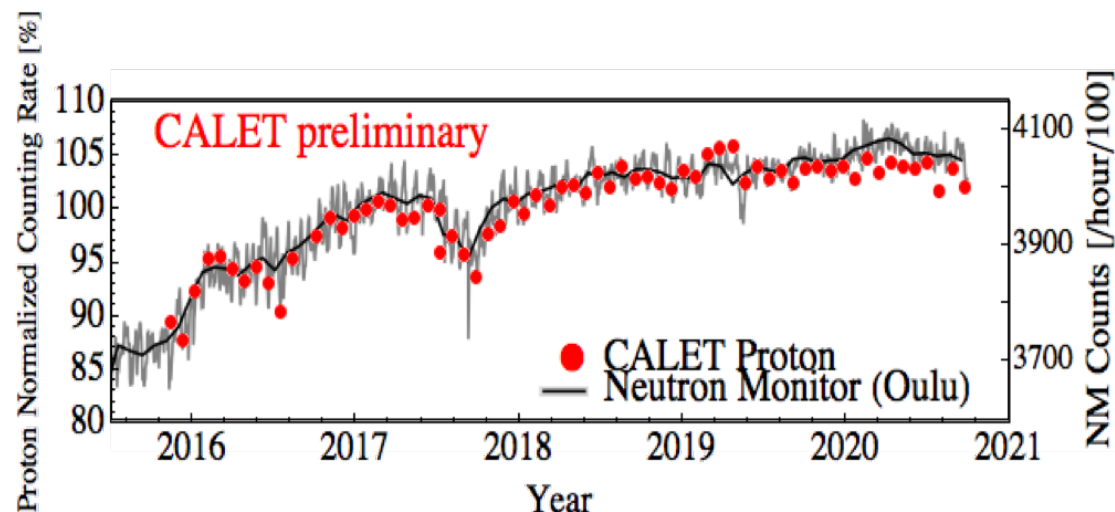
全電子フラックスの長期変動



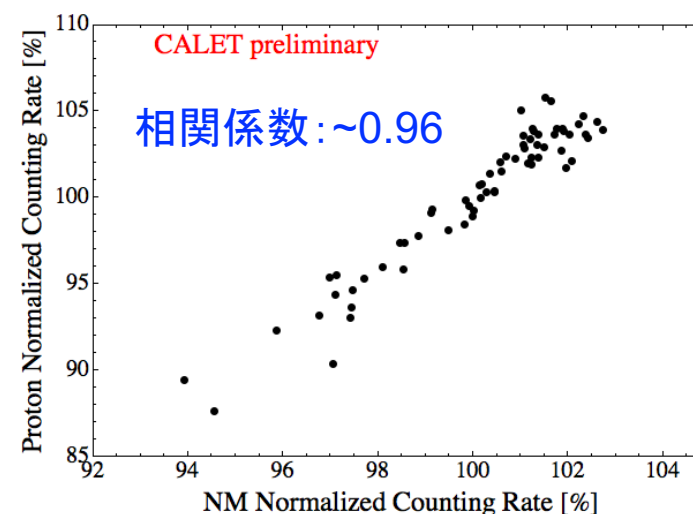
2015年10月以来、太陽活動の低下に伴う全電子フラックスの増大が継続的に観測されている。とりわけこの約2年間のフラックスは電子観測史上最高であったPAMELAによるフラックスに匹敵する。

陽子の計数率の長期変動

陽子の計数率と地上の中性子モニタ計数率の長期変動



陽子の計数率と地上の中性子モニタ計数率の相関



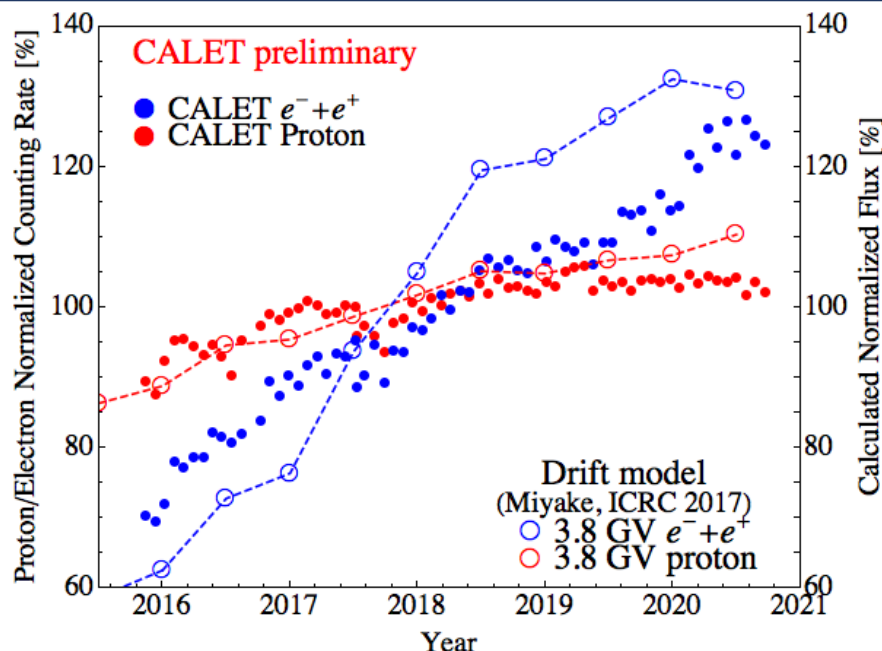
※ 両図とも、陽子と中性子モニタの計数率はそれぞれの平均値で規格化している。

陽子の計数率にも太陽活動の低下に伴う計数率の増大を観測した。陽子の計数率と地上の中性子モニタの計数率には強い相関関係があり、CALETの陽子選別の解析が正確に行われていることも確認した。

太陽変調の荷電依存性

太陽変調は、惑星間空間磁場による宇宙線のドリフト運動のために、磁場の極性Aと宇宙線の電荷qの積qAの符号に依存した荷電依存性を持つ。陽子と電子の太陽変調を比較することで、太陽変調の荷電依存性を調べることができる。

陽子および全電子の計数率の長期変動



※ 陽子、全電子の計数率はそれぞれの平均値で規格化している。

陽子に比べて全電子の計数率の変動幅が大きく、太陽変調の影響が強い。この傾向は太陽変調のドリフトモデルから期待される荷電依存性の傾向と矛盾しない。

太陽変調のドリフトモデル
(Miyake, ICRC 2017)

移流拡散方程式に等価な確率微分方程式

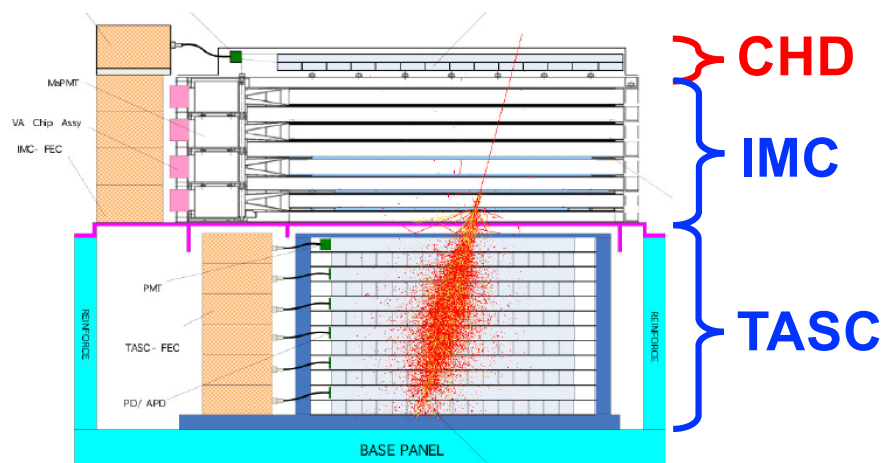
$$\begin{cases} d\vec{r} = (\nabla \cdot \hat{k} + \vec{V}_{sw} + \vec{V}_{drift})dt + \sum_s \alpha_s dW_s(t) \\ dp = -\frac{1}{3}p(\nabla \cdot \vec{V}_{sw})dt \end{cases}$$

拡散係数

$$\begin{cases} \kappa_{||} = 1 \times 10^{22} \beta \left(\frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left(\frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right) [\text{cm}^2/\text{s}] \\ \kappa_{\perp\theta} = 1 \times 10^{20} \beta \left(\frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left(\frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right)^{1.4-0.7 \sin^2 \theta} [\text{cm}^2/\text{s}] \\ \kappa_{\perp 2} = 2 \times 10^{20} \beta \left(\frac{p}{1 \text{ GeV}/c} \right) \left(\frac{B_{1\text{AU}}}{B} \right) [\text{cm}^2/\text{s}] \end{cases}$$

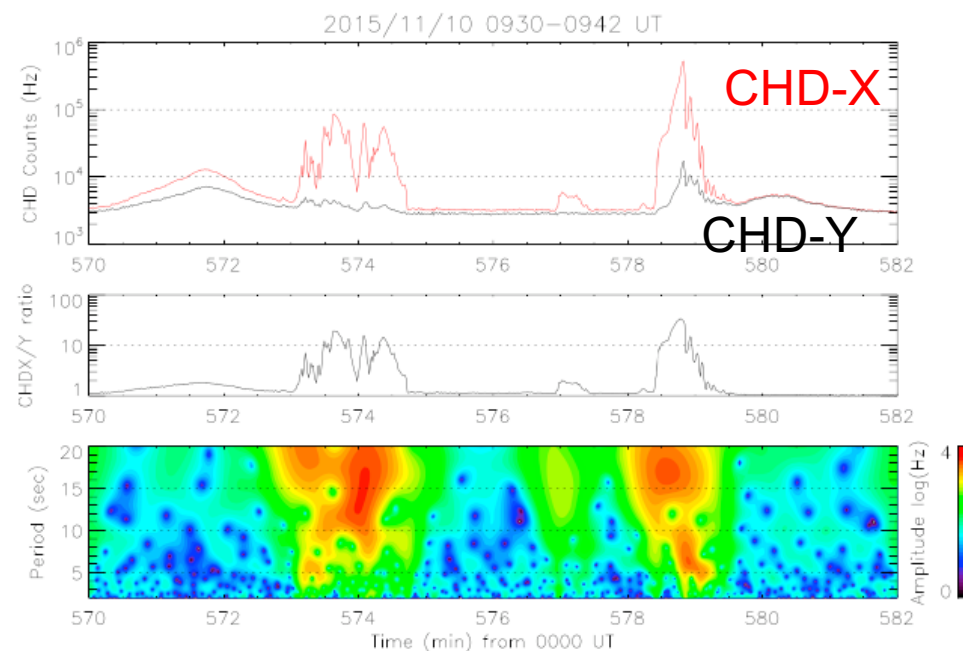
CALETによるMeV電子の観測

CALET Calorimeter



CHD-X : 約1.6MeV以上の電子を検出
CHD-Y : 約3.6MeV以上の電子を検出

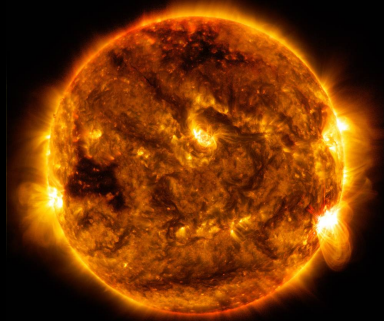
CALETで初検出したREPイベント



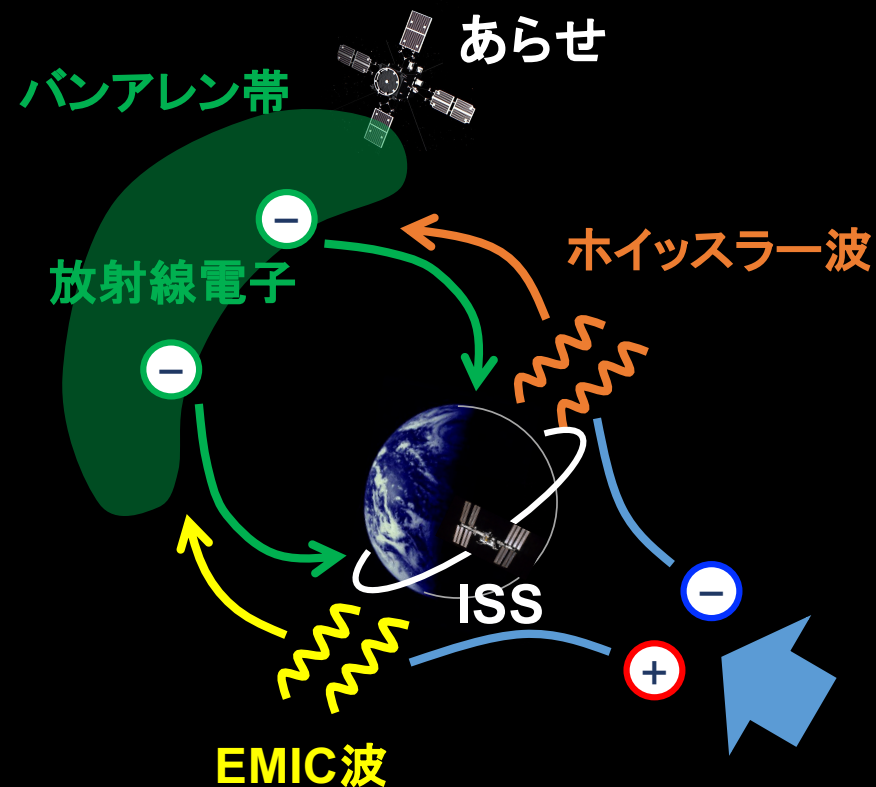
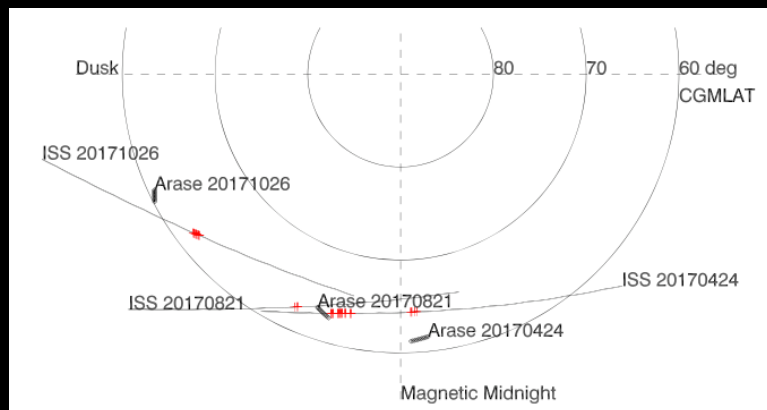
(Kataoka et al., GRL 2016)

CHD-XおよびCHD-Yの計数率の変動を見ることで、MeV電子
(REP現象)を観測

CALETとあらせによる相対論的電子降下(REP現象)の共同観測



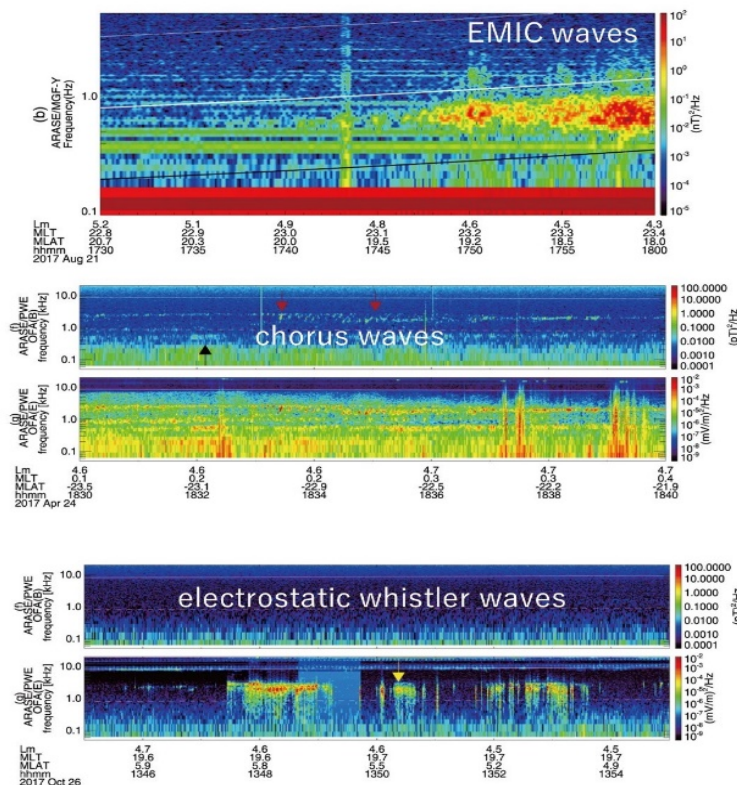
ISSの軌道とあらせの観測地点



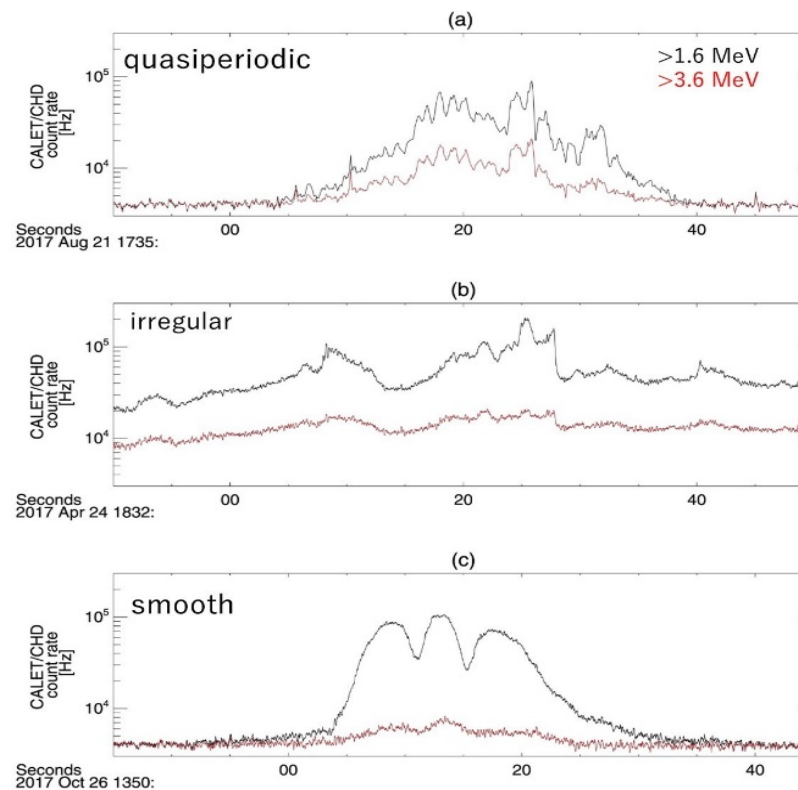
CALET、MAXI、SEDA-AP、そしてジオスペース探査衛星「あらせ」の共同観測を実施。あらせとISSが同じ磁力線上を通過した機会のうち、CALETがREP現象を観測した事例を選び、あらせの観測したプラズマ波動と比較・解析

3種のプラズマ波動とREP現象

プラズマ波動のダイナミックスペクトル (あらせ)



REP現象 (CALET/CHD)



(Kataoka et al., JGR 2020)

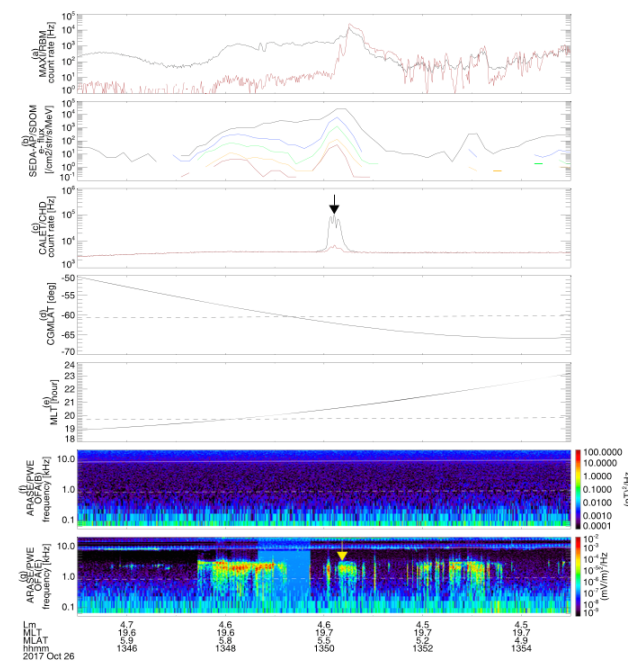
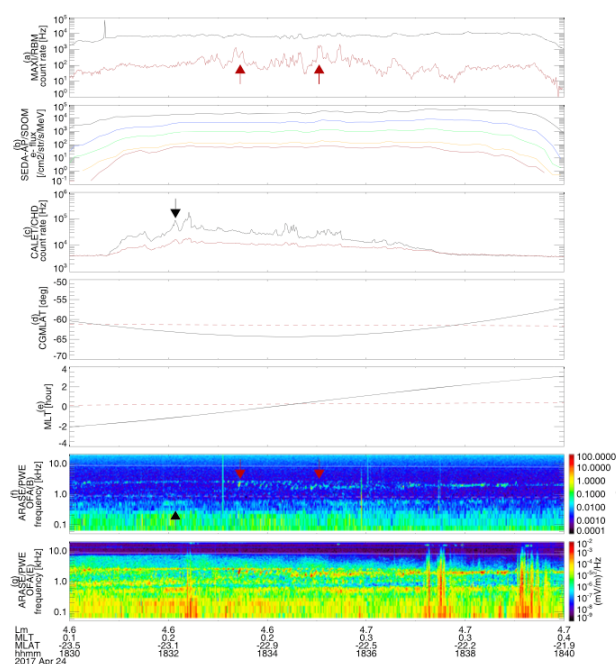
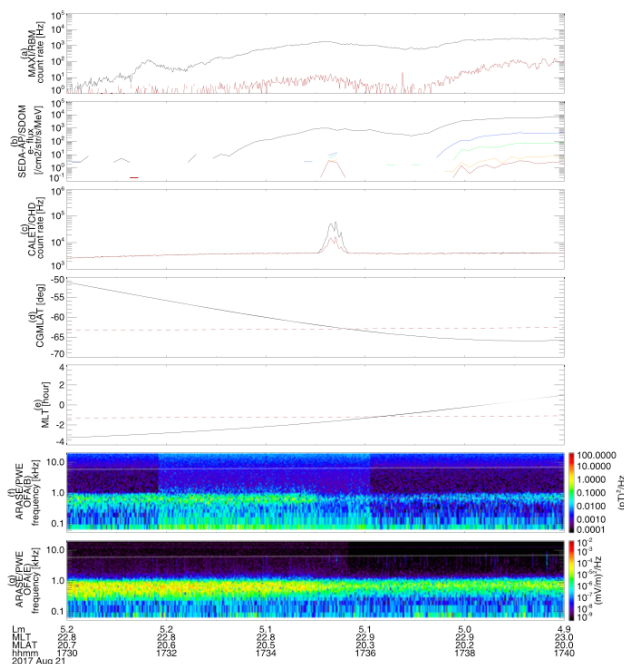
CALET/CHDで観測された3つのタイプのREP現象が、それぞれ陽子を起因とするEMIC波、電子を起因とするコーラス波および静電ホイッスラー波により引き起こされたことが明らかになった。

CALET, MAXI, SEDA-AP, あらせによる共同観測

EMIC波によるREP

コーラス波によるREP

静電ホイッスラー波によるREP



※ 各図、上から順に(a)MAXI/RBM計数率、(b)SEDA-AP/SDOM電子フラックス、(c)CALET/CHD計数率、(d)ISSおよびあらせの磁気緯度、(e)ISSおよびあらせの磁気局所時刻、(f)あらせ/OFA磁場スペクトル、(g)OFA電場スペクトル

(Kataoka et al., JGR 2020)

CALETによるMeV電子観測、MAXIによるsub-MeV電子観測、SEDA-APによるエネルギースペクトル、あらせによるプラズマ波動の観測が実現。各REP現象の詳細が明らかになった。

Summary

- CALETの観測開始以来、太陽変調および相対論的電子降下（REP現象）の観測は順調に実施されている。
- 全電子フラックスは太陽活動の低下に伴い増大している。とりわけこの約2年間のフラックスは電子観測史上最高であったPAMELAによるフラックスに匹敵する。
- 陽子の計数率にも太陽活動の低下に伴う計数率の増大が観測された。全電子の計数率の変動幅は陽子に比べて大きく、太陽変調の影響が強い。この傾向は太陽変調のドリフトモデルから期待される荷電依存性の傾向と矛盾しない。
- CALET/CHDで観測された3つのタイプのREP現象が、それぞれ陽子を起因とするEMIC波、電子を起因とするコーラス波および静電ホイッスラー波により引き起こされたことが明らかになった。
- CALETによるMeV電子観測、MAXIによるsub-MeV電子観測、SEDA-APによるエネルギースペクトル、あらせによるプラズマ波動の観測が実現し、各REP現象の詳細が明らかになった。