



基于DAMPE卫星的福布什下降研究

2023.10.22 @ 合肥

PMO 李文昊

& 藏京京 袁强 岳川 李翔 on behalf of the DAMPE collaboration

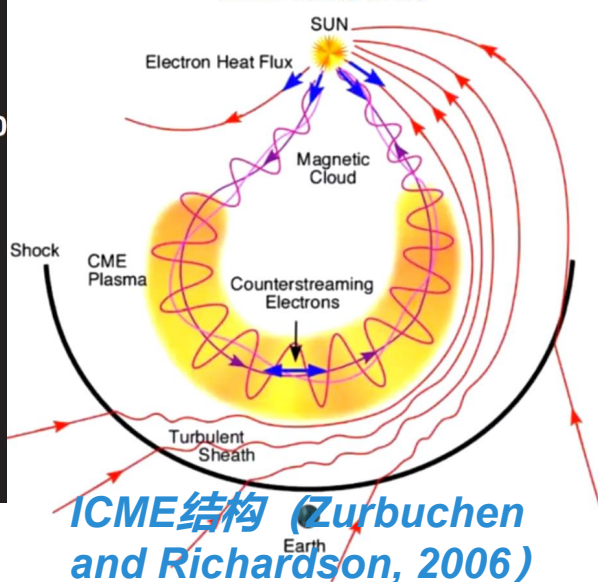
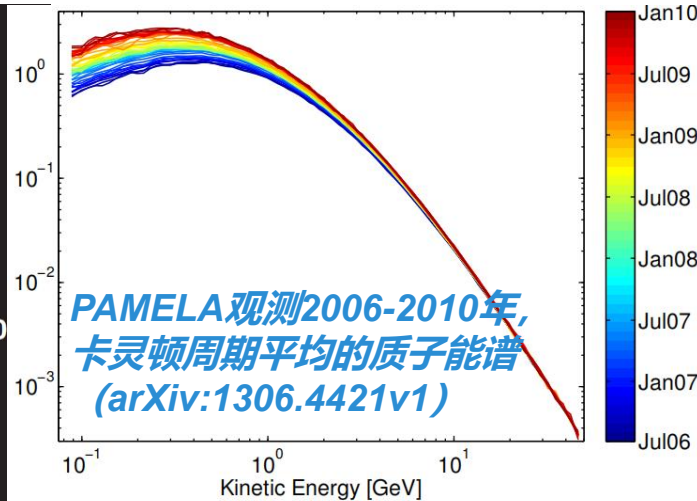
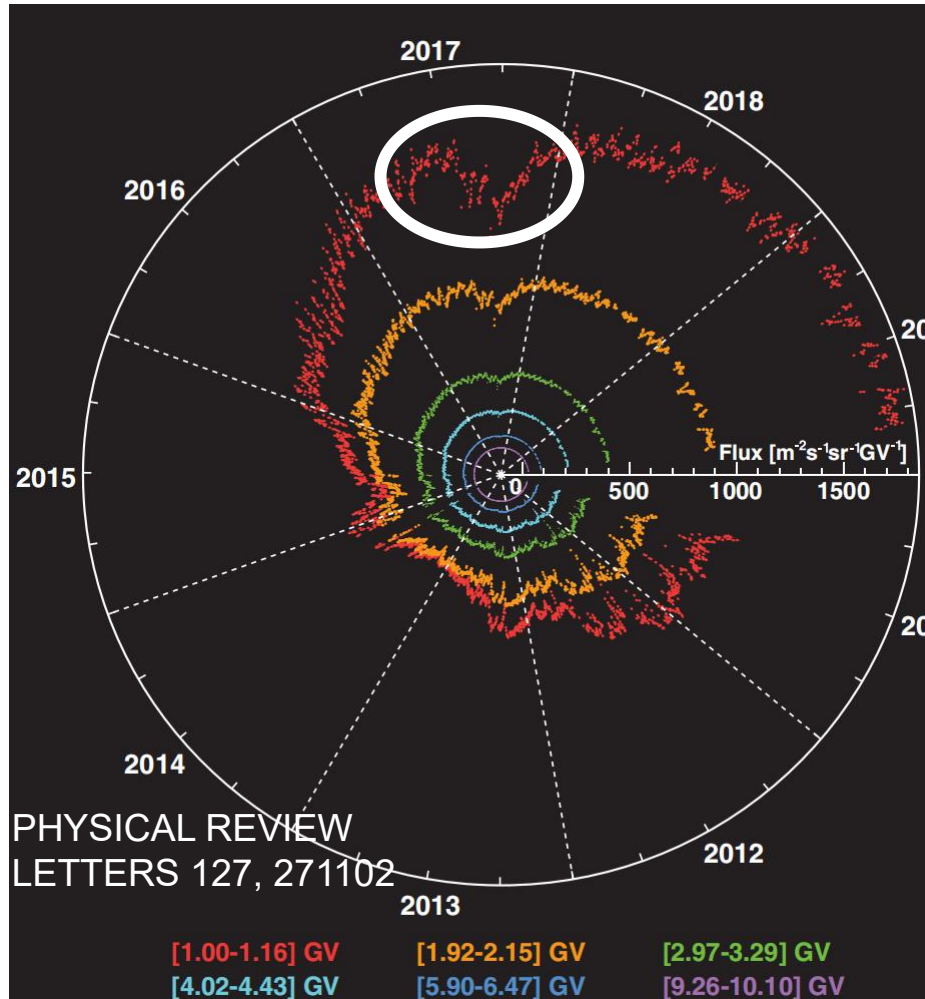


目录



1. 福布什下降及简介
2. DAMPE卫星数据分析及结果
3. 随机微分模型及其模拟
4. 结果及讨论

宇宙线的太阳调制



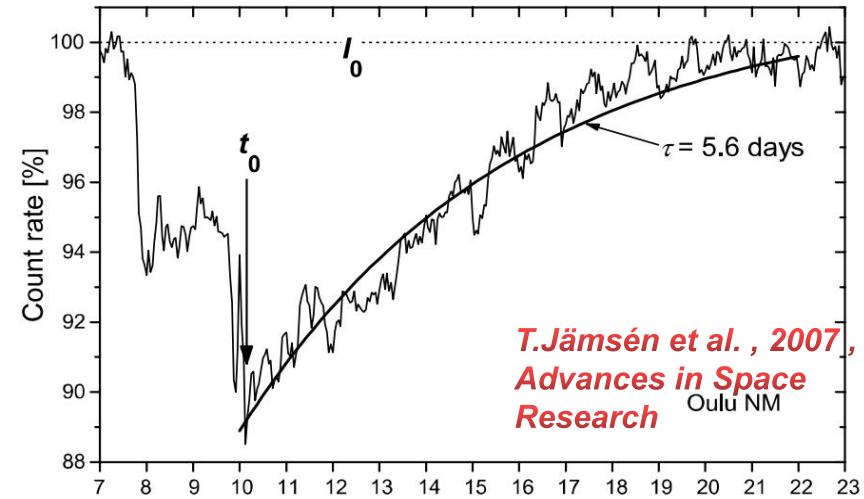
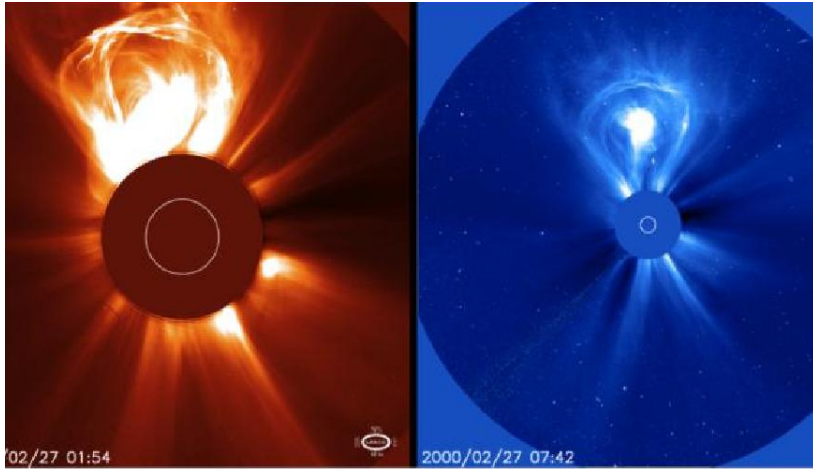
太阳活动对宇宙线的长期调制:

- 以11年为周期, 缓变的过程
- 能量越低, 调制效应越明显, 与 HMF等参数有强相关性

太阳活动对宇宙线的短期调制:

- 太阳调制极大期, ICME/flare等太阳活动发生频繁
- 短期调制结束后, GCR流量能恢复到调制前状态

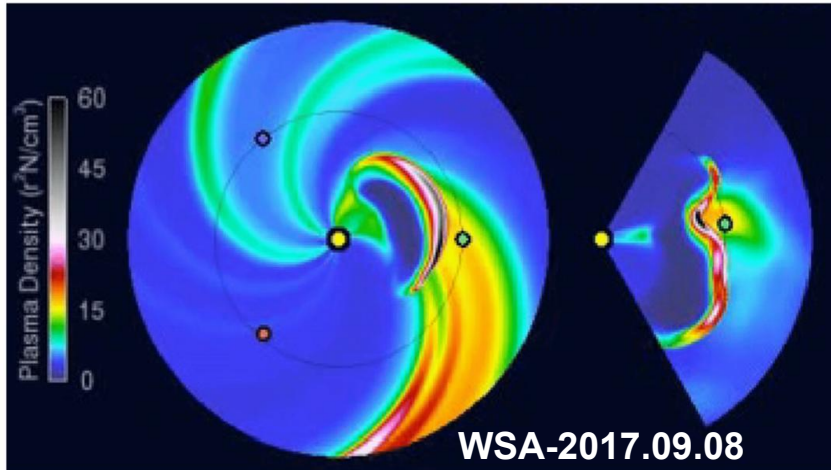
福布什下降

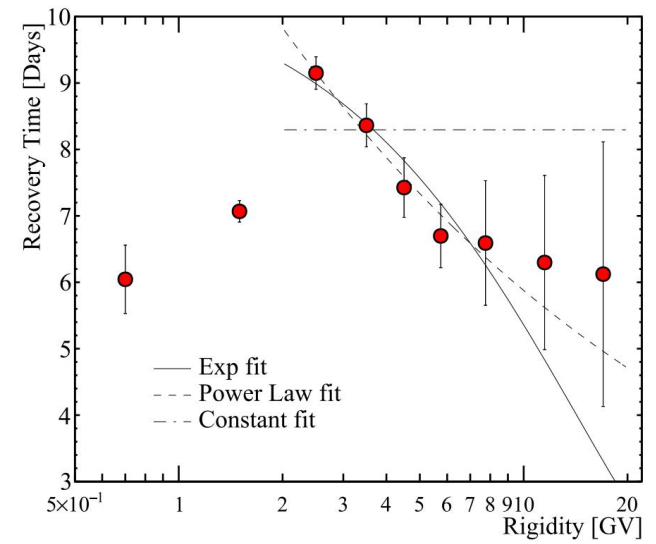
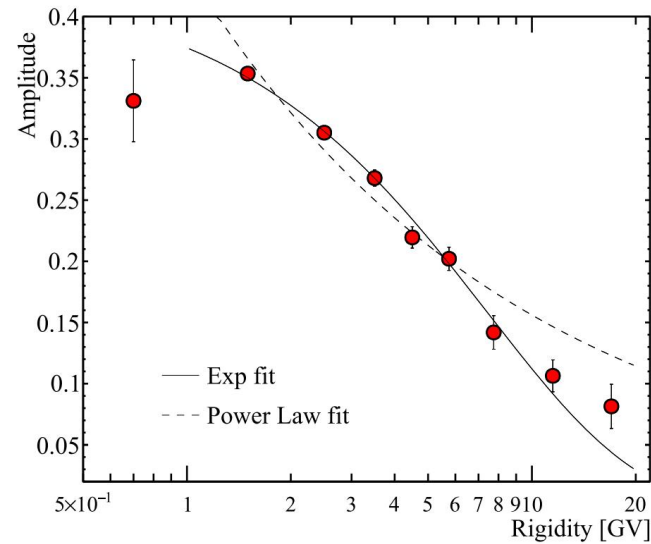
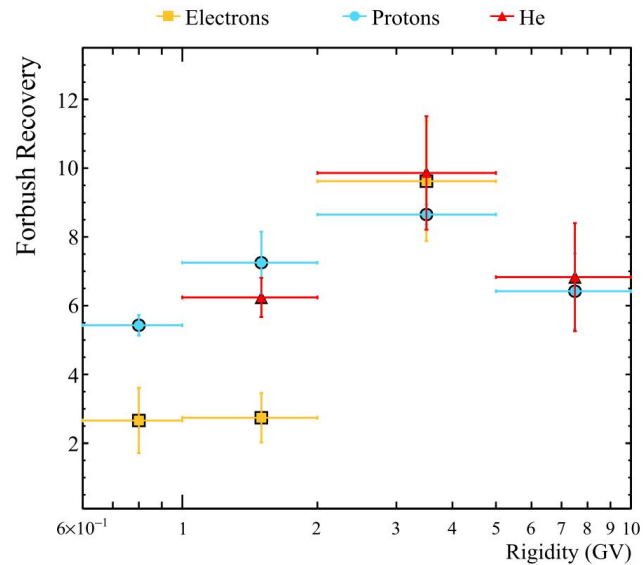


$$E_m = 0.088P_c^2 + 0.154P_c + 10.12 \quad (1)$$

$$\frac{\Phi(t)}{\Phi_{ref}} = 1 - A_e \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \quad (2)$$

- 福布什下降 (FDs)：银河系宇宙线的突然下降并且缓慢恢复的过程。下降过程约1天，完全恢复超过5天
- 早期观测主要来自于分布于全球的地基中子探测器 (Neutron Monitor, NM)，其能量为中位能量 E_m



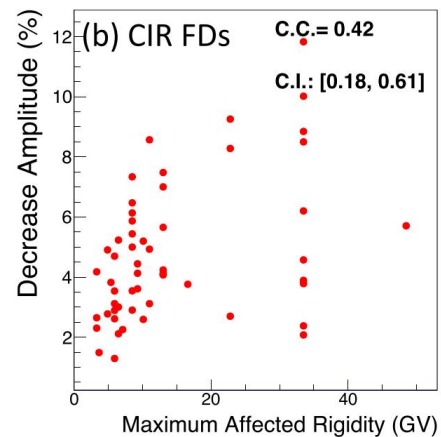
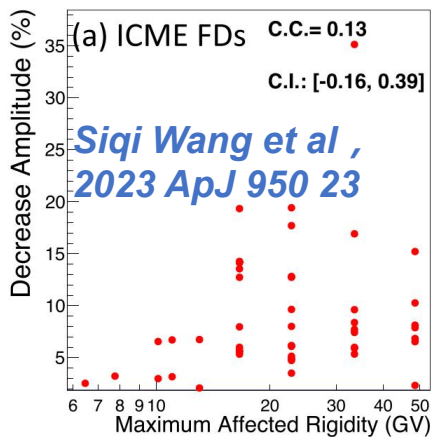
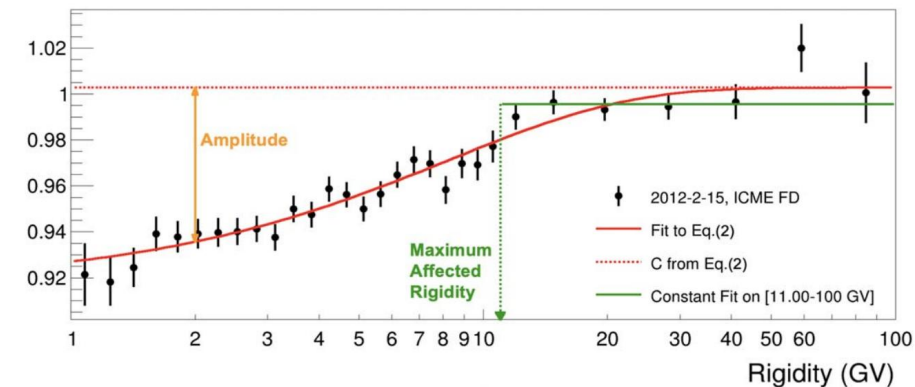


R. Munini et al. 2018

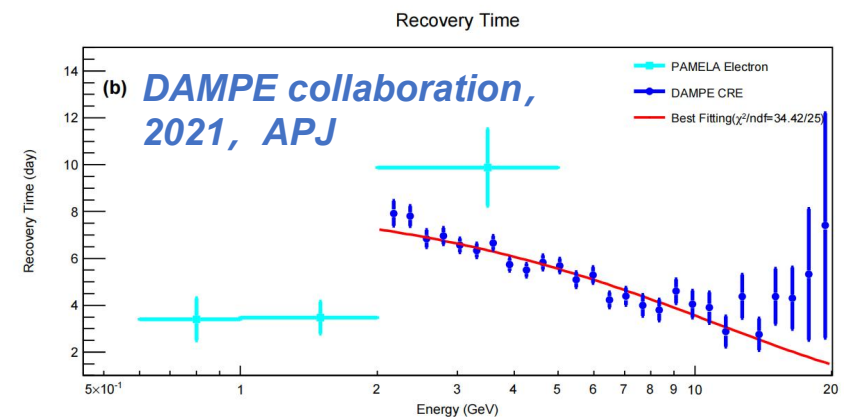
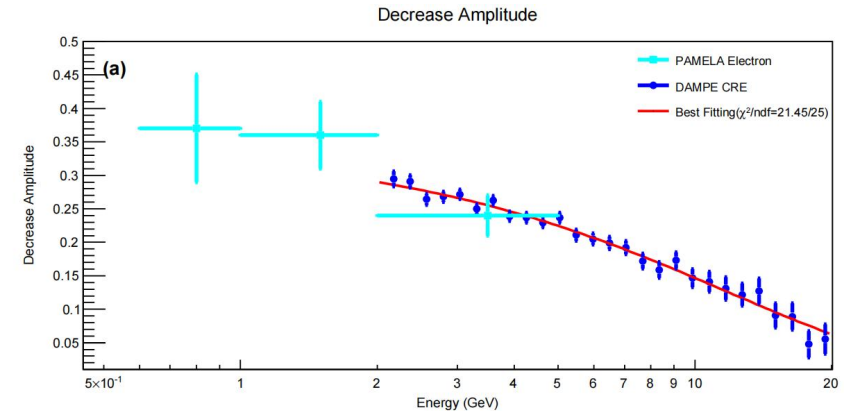
PAMELA (2018) 观测结果:

- 电子/质子/氦的联合结果, 电子的恢复时间小于质子/氦
- 最大下降强度和恢复时间 (τ) 与刚度的依赖关系, 均可以用对数函数及幂律函数拟合

福布什下降的空间观测

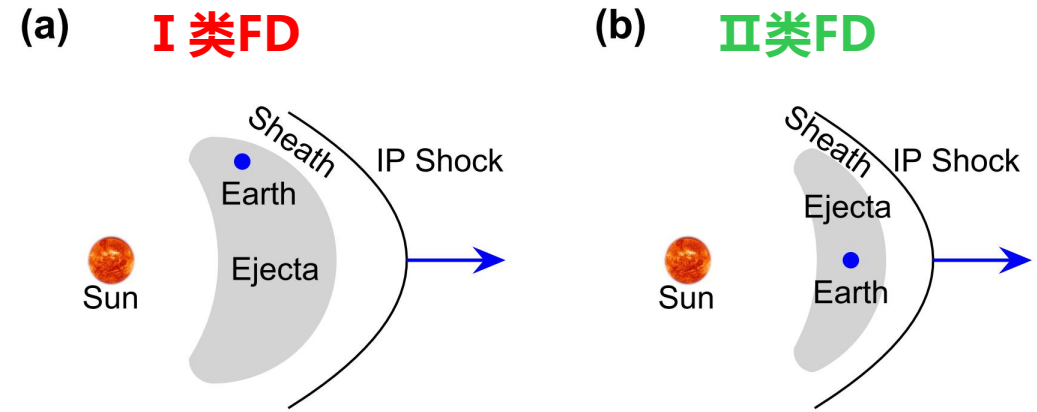
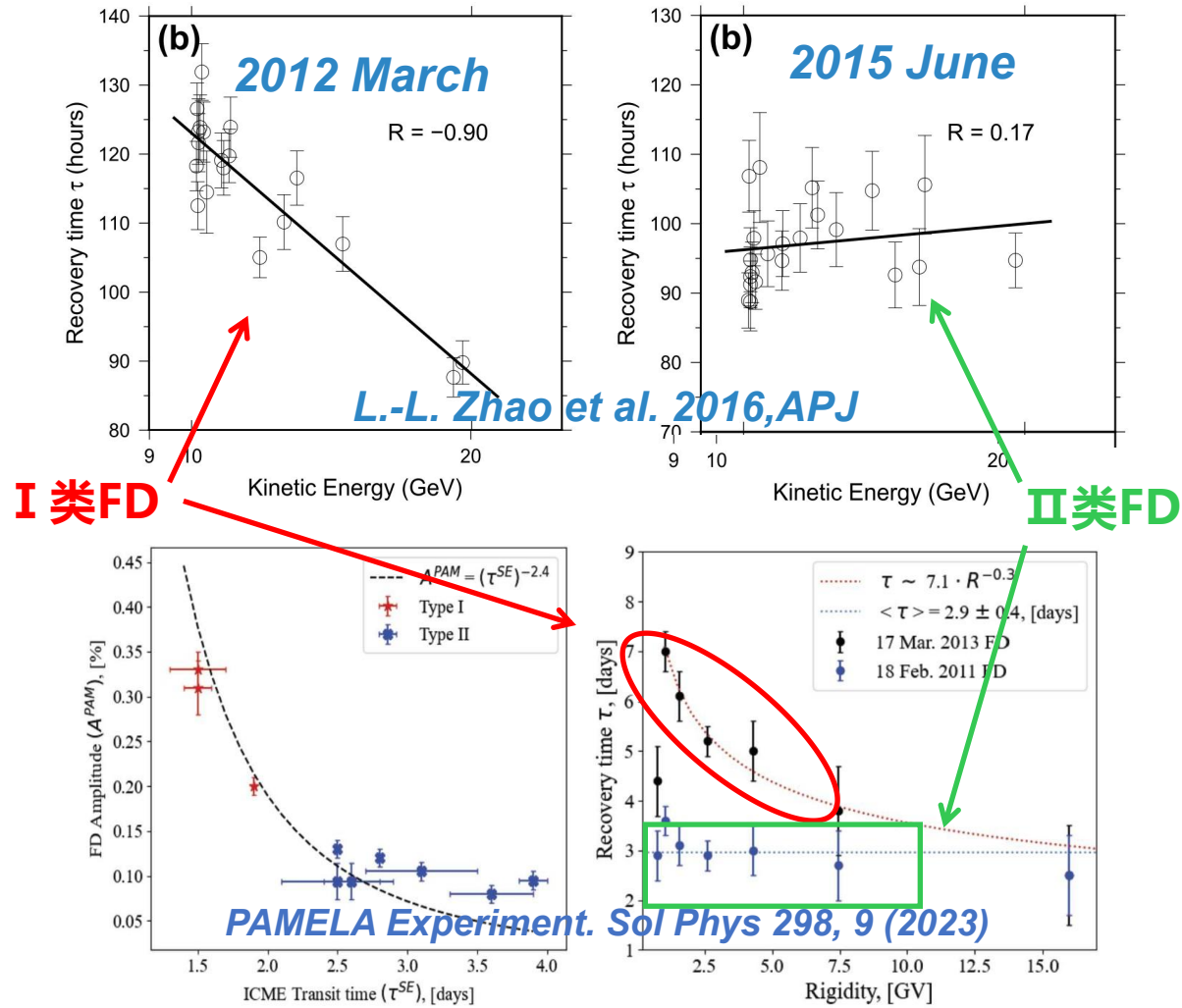


- 最大影响刚度：可以线性拟合的最小能量
- ICME型FD下降强度与最大影响刚度没有关系，而CIR型有弱关系



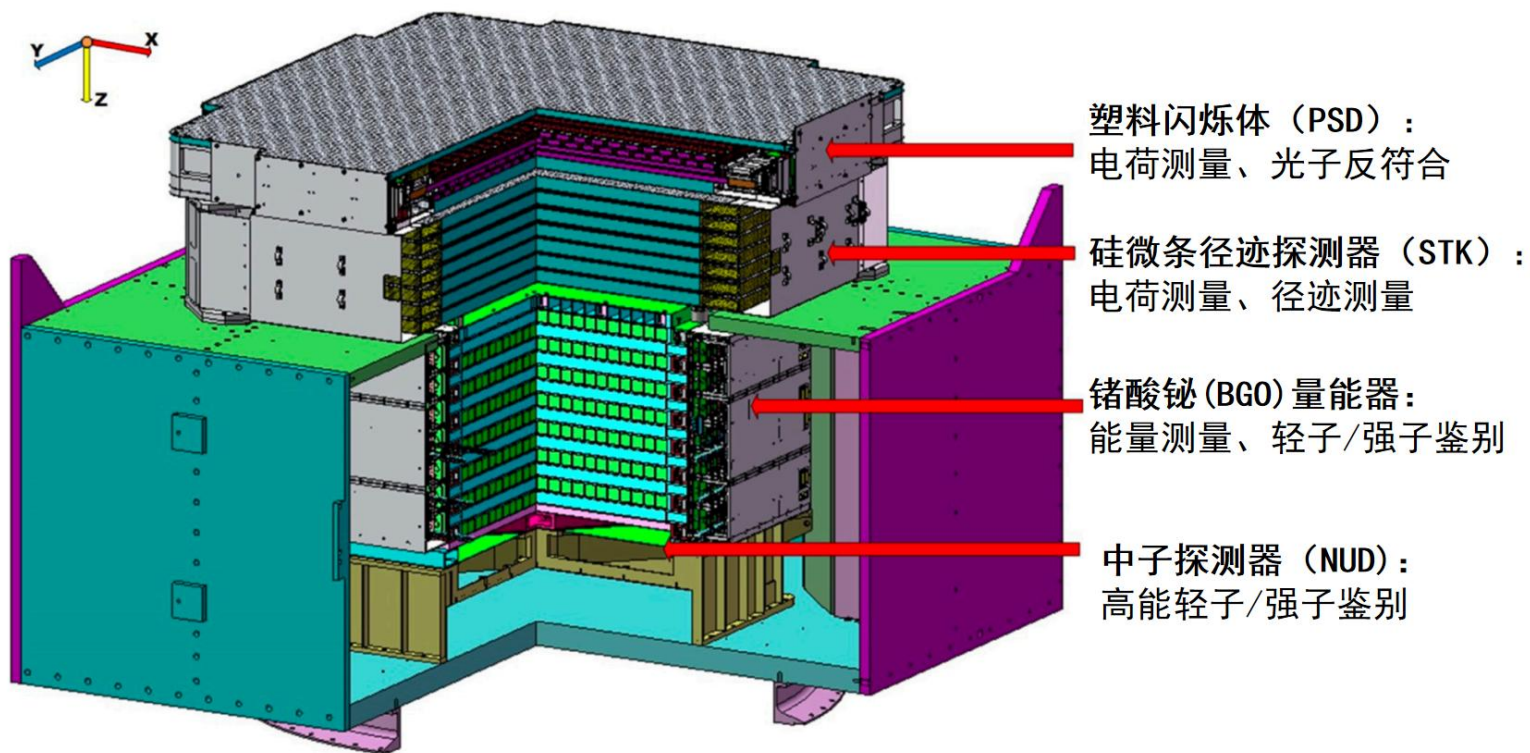
- 6小时时间分辨率，大接受度，以及高能量分辨
- 2017年9月发生的FD，其宇宙线电子恢复时间、下降强度是能量相关的
- 使用随机微分方程模型重现FD

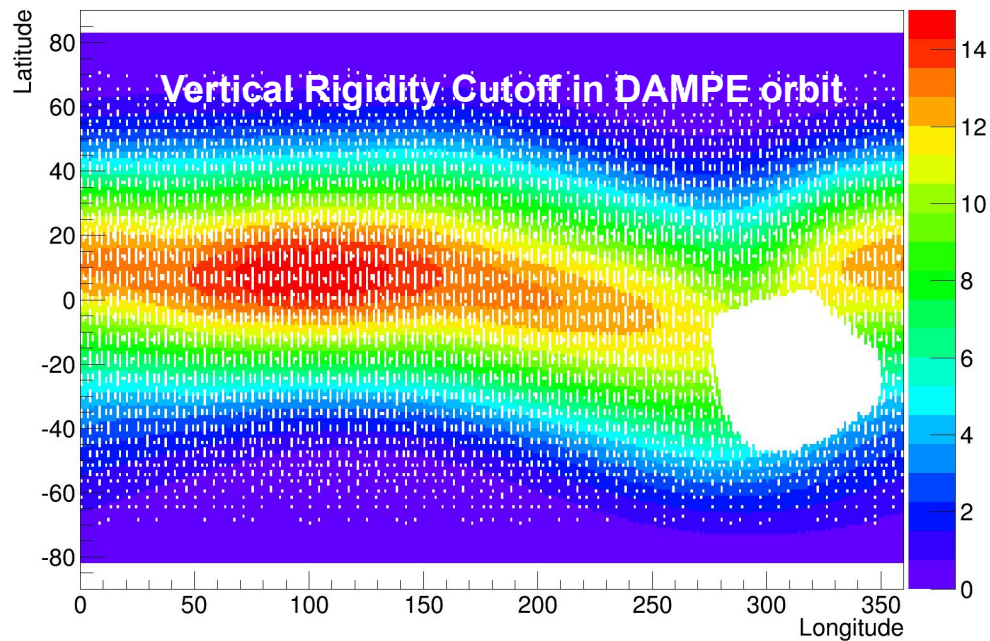
福布什下降的观测



- 福布什下降性质：恢复时间与能量有相关的FD事件（I），也有不相关的FD事件（II）
- Zhao L.L (2016) 假设：I 类事件中，地球位于CME的边缘（a），II类事件中，地球位于CME中心（b）

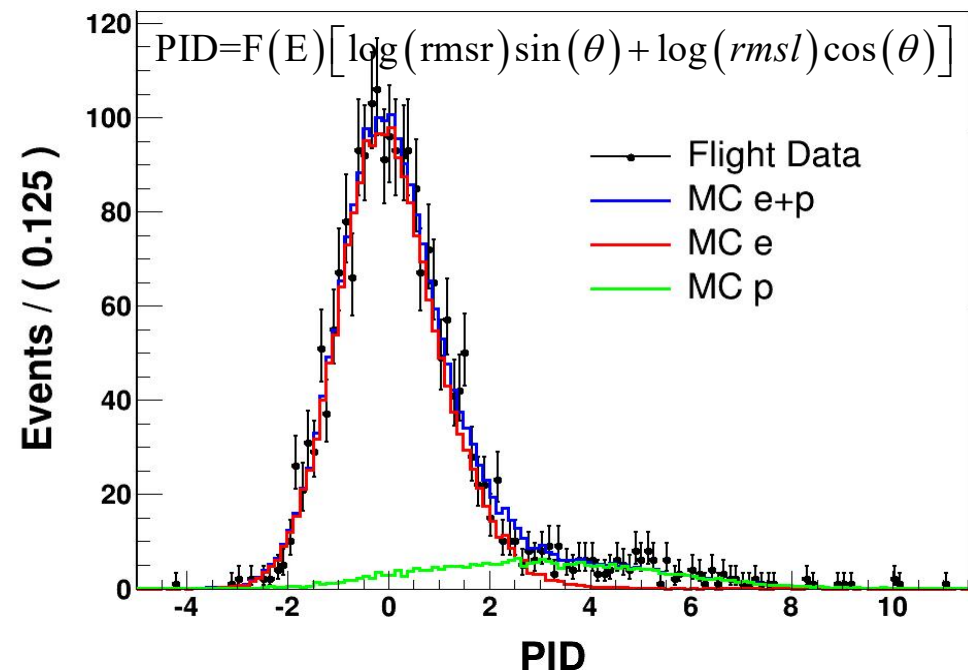
暗物质粒子卫星





FD选择曝光时间修正:

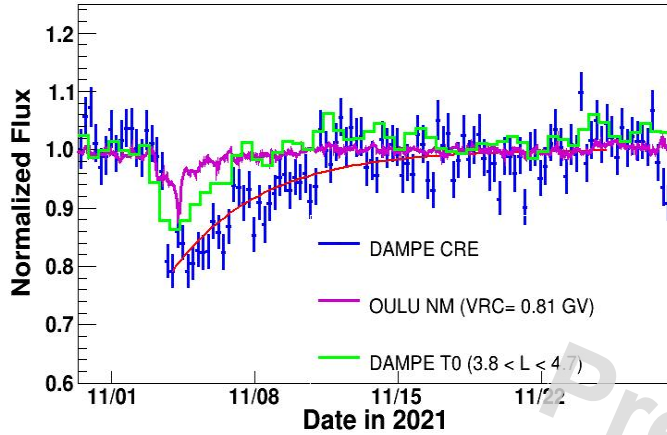
- DAMPE发射至2022年12月飞行数据
- 符合: **T0触发**与NM数据的一致性检验
- 由于触发及相应数据采集系统的死时间, SAA区排除



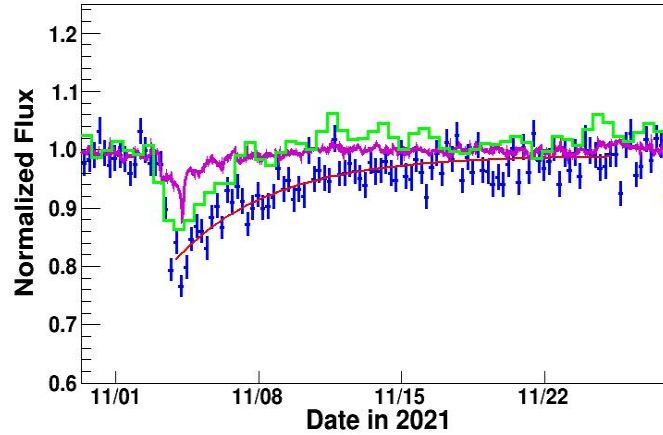
粒子选择条件:

- 较好的电子簇射及径迹重建事例, 低能&高能触发
- PSD重建电荷及其选择
- 能量大于截止刚度能量的1.2倍, $VRC = 14.5/L^2$

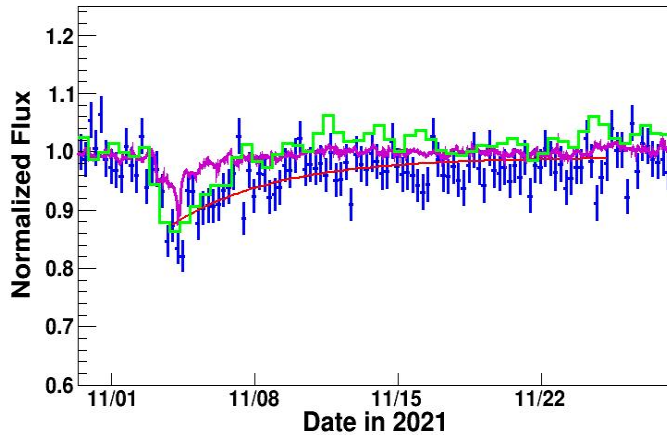
Electron 2.26-2.46 GeV



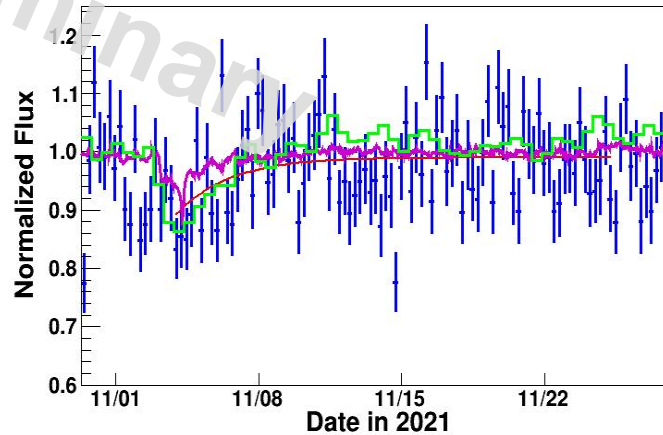
Electron 4.44-4.83 GeV



Electron 7.35-8.00 GeV



Electron 14.42-15.69 GeV



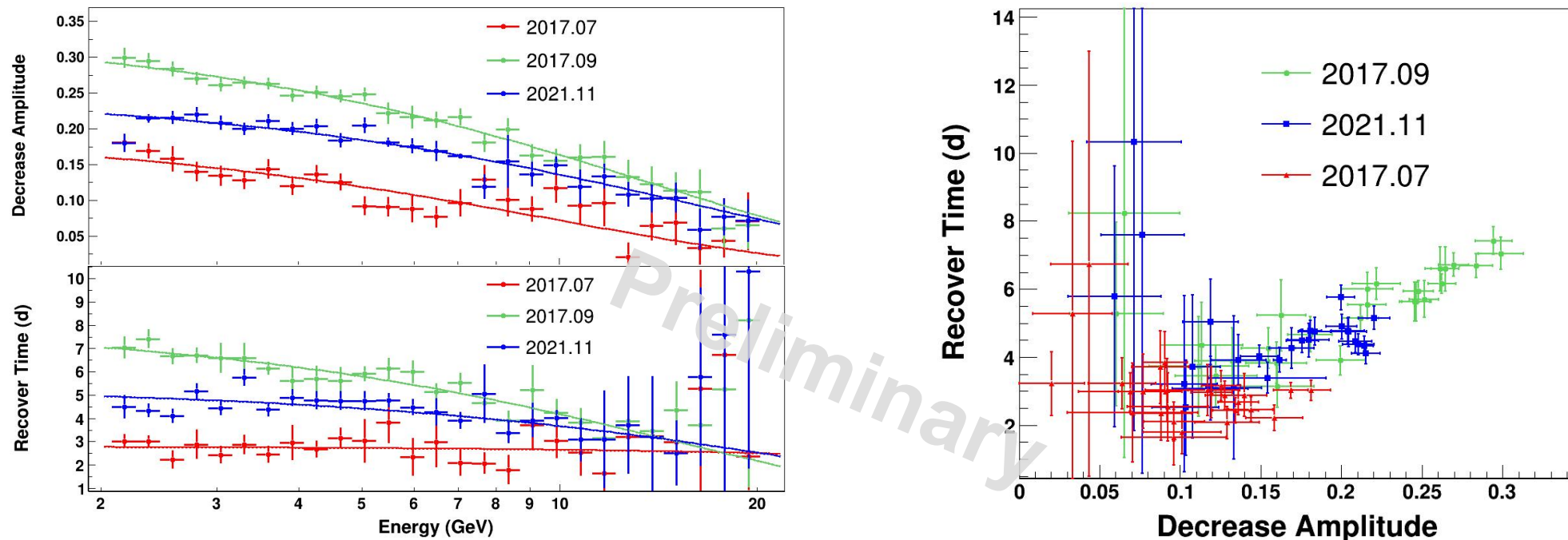
$$I_{i,j} = \frac{N_{i,j}(1-f_{i,j})}{\Delta E_i A_i T_{i,j} \eta_i} \quad (1)$$

- 其中 $f_{i,j}$ 为不同时间/能量段的本底率,
 A_i , $T_{i,j}$, η_i 分别为接收度、曝光时间、
 效率

$$\frac{\Phi(t)}{\Phi_{ref}} = 1 - A_e \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \quad (2)$$

- 其中 A_e 为最大下降强度, τ 为恢复时间

DAMPE电子福布什下降结果



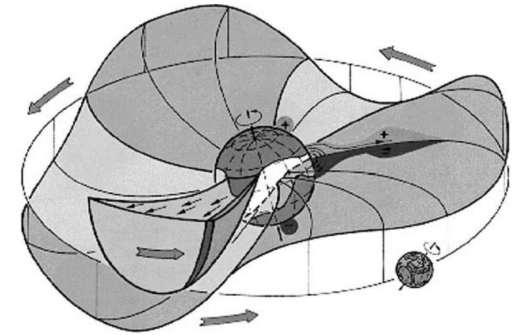
- 福布什下降的强度与恢复时间使用对数函数拟合 (R. Munini et al. 2018)
- 拟合结果显示, 2017.07福布什下降的回复时间与能量没有相关性, 而其他两次FD能量相关
- 最小回复时间约为2天, 下降强度小于10%后接近该最小值

A. Parker Equation

$$\underbrace{\frac{\partial f}{\partial t}}_a = -(\underbrace{\mathbf{V}}_b + \underbrace{\langle \mathbf{v}_d \rangle}_c) \cdot \nabla f + \underbrace{\nabla \cdot (\mathbf{K}_s \cdot \nabla f)}_d + \underbrace{\frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \frac{\partial f}{\partial \ln P}}_e$$

b, c: 对流及漂移, d: 扩散项, e: 能损

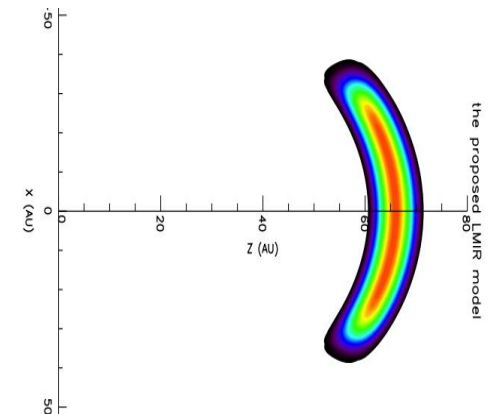
$$\mathbf{B}(r, \theta) = \frac{A}{r^2} \left(\hat{e}_r - \frac{r\Omega \sin \theta}{V_{sw}} \hat{e}_\phi \right) [1 - 2H(\theta - \theta_{cs})], \quad K^{(s)} = \begin{pmatrix} \kappa_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_{\perp\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_{\perp r} \end{pmatrix}$$



B. 扩散传播屏障 (PDB)

$$\kappa'_{\parallel, \perp, T} = \frac{\kappa_{\parallel, \perp, T}}{[1 + \rho h(\theta) f(r) g(\phi)]}$$

- ρ : 屏障的阻碍能力
- $g(\Phi)$ 、 $h(\theta)$: 屏障在黄道面/垂直黄道面的扩展



- 基于Ito公式, Parker方程可以写为:

$$d\vec{X} = (\nabla \cdot \vec{K}^{(s)} - V_{sw} - \langle v_D \rangle) ds + \sum_{\sigma=1}^3 \alpha_{\sigma} dW_{\sigma}(s)$$

$$dp = \frac{1}{3} p (\nabla \cdot \vec{V}_{sw}) ds$$

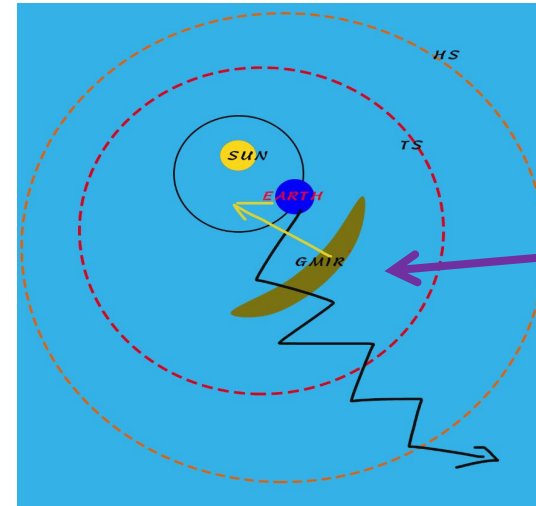
- 流量f 含时解:

$$f(t, \vec{X}, p) = \langle f_b^i(t - \chi_i, \vec{X}_i, p_i) \rangle.$$

$$\kappa_{//} = \kappa_{//0} \beta \frac{B_0}{B} \left(\frac{P}{P_k} \right)^{0.8} \left[1 + \left(\frac{P}{P_k} \right)^{\frac{b-a}{c}} \right]^c$$

$$\kappa_{\perp r, \perp \theta} = 0.02 \kappa_{//0} \beta \frac{B_0}{B} \left(\frac{P}{P_k} \right)^{0.8} \left[1 + \left(\frac{P}{P_k} \right)^{\frac{b-a}{c}} \right]^c$$

Xi Luo et al, 2019 ApJ 878 6

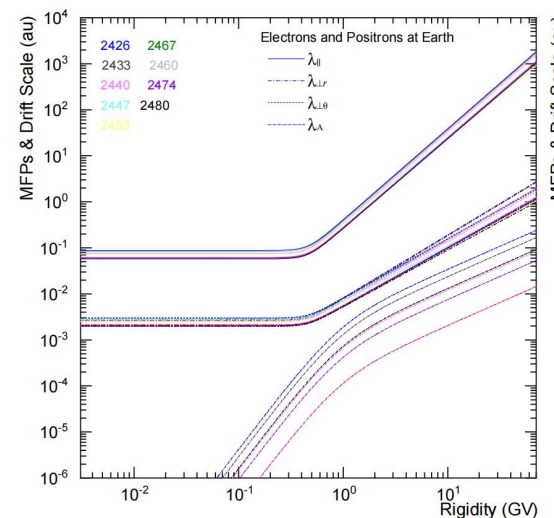


- PDB内扩散系数

$$h(\theta) = e^{-\left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{br}}\right)^{10}}$$

$$g(\phi) = e^{-\left(\frac{\phi - \phi_0}{\phi_{br}}\right)^{10}}$$

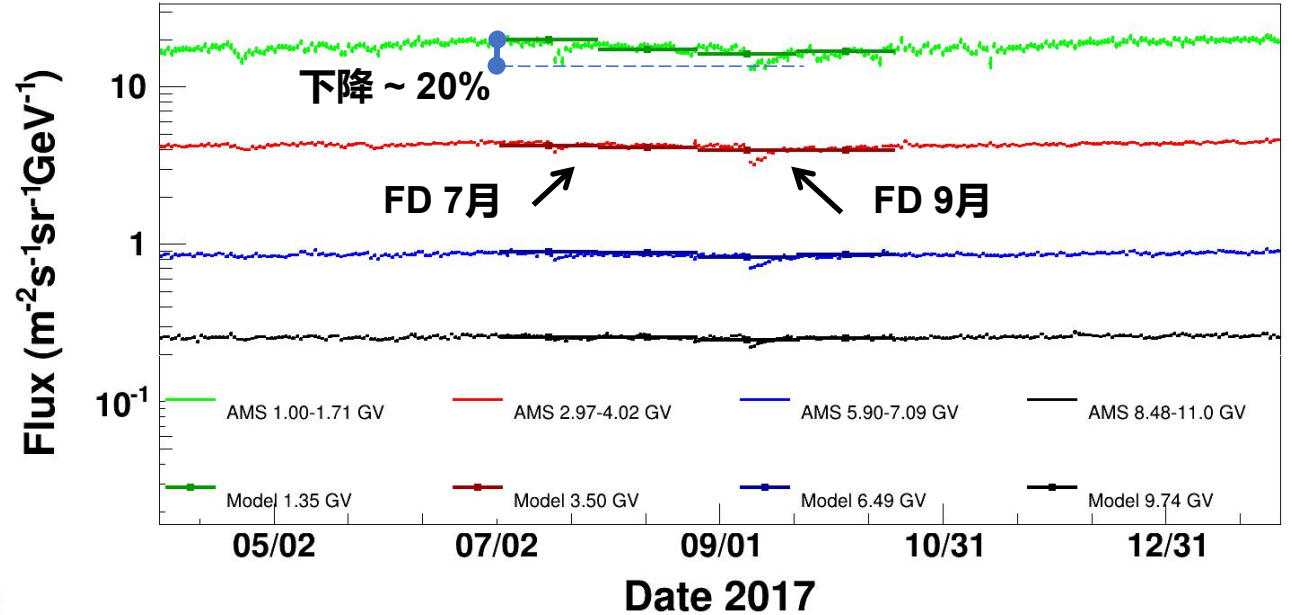
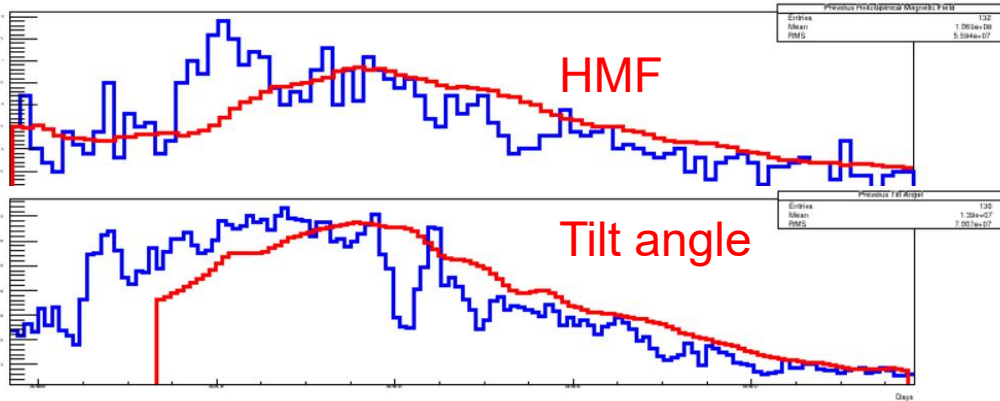
$$f(r) = \begin{cases} 1 - \frac{r - r_{cen}}{ra} & r_{cen} < r < r_{sh} \\ \frac{r - r_{end}}{r_b} & r_{end} < r \leq r_{cen} \end{cases}$$



- arXiv:2212.13397v1

- 电子的扩散系数在不同刚度呈现不同幂律

- 重要的太阳观测量如地球附近HMF、Tilt angle作15巴特尔周期 (27.27d / BR) 的平均
- FD是发生在太阳长周期调制基础上的短周期调制，首先重现AMS02的电子长周期调制谱

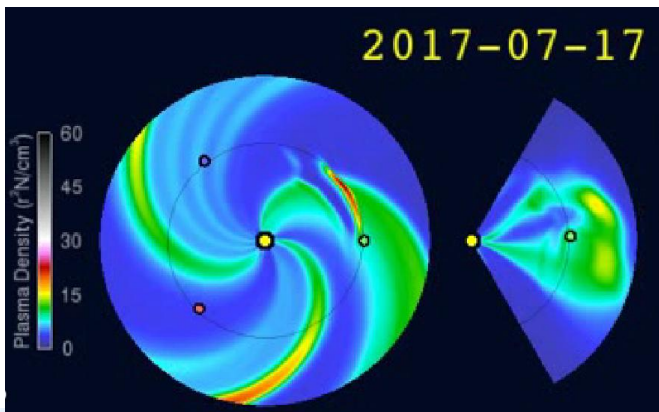


	K0	b	c	a	Pk (GV)
2017.07	230	1.46	2.2	0	1
2017.09	195	1.50	2.2	0	1
2021.11	200	1.40	2.2	0	1

SDE参数—WSA model

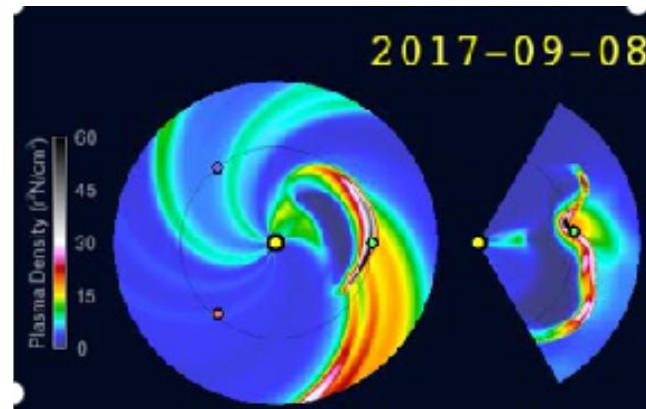
2017.07 FD Paramrter:

- $R_a = 0.5 AU$
- $R_b = 0.2 AU$
- $V_{sw} = 1200 \text{ km/s}$
- $\rho = 5.5$
- $\theta = 90^\circ, \varphi = 45^\circ$
- $\theta_0 = 90^\circ, \varphi_0 = -20^\circ$



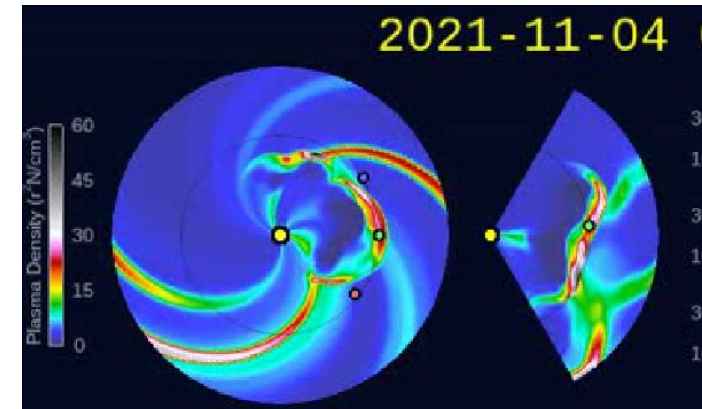
2017.09 FD Paramrter:

- $R_a = 0.3 AU$
- $R_b = 0.3 AU$
- $V_{sw} = 1500 \text{ km/s}$
- $\rho = 8.0$
- $\theta = 100^\circ, \varphi = 150^\circ$
- $\theta_0 = 90^\circ, \varphi_0 = 45^\circ$

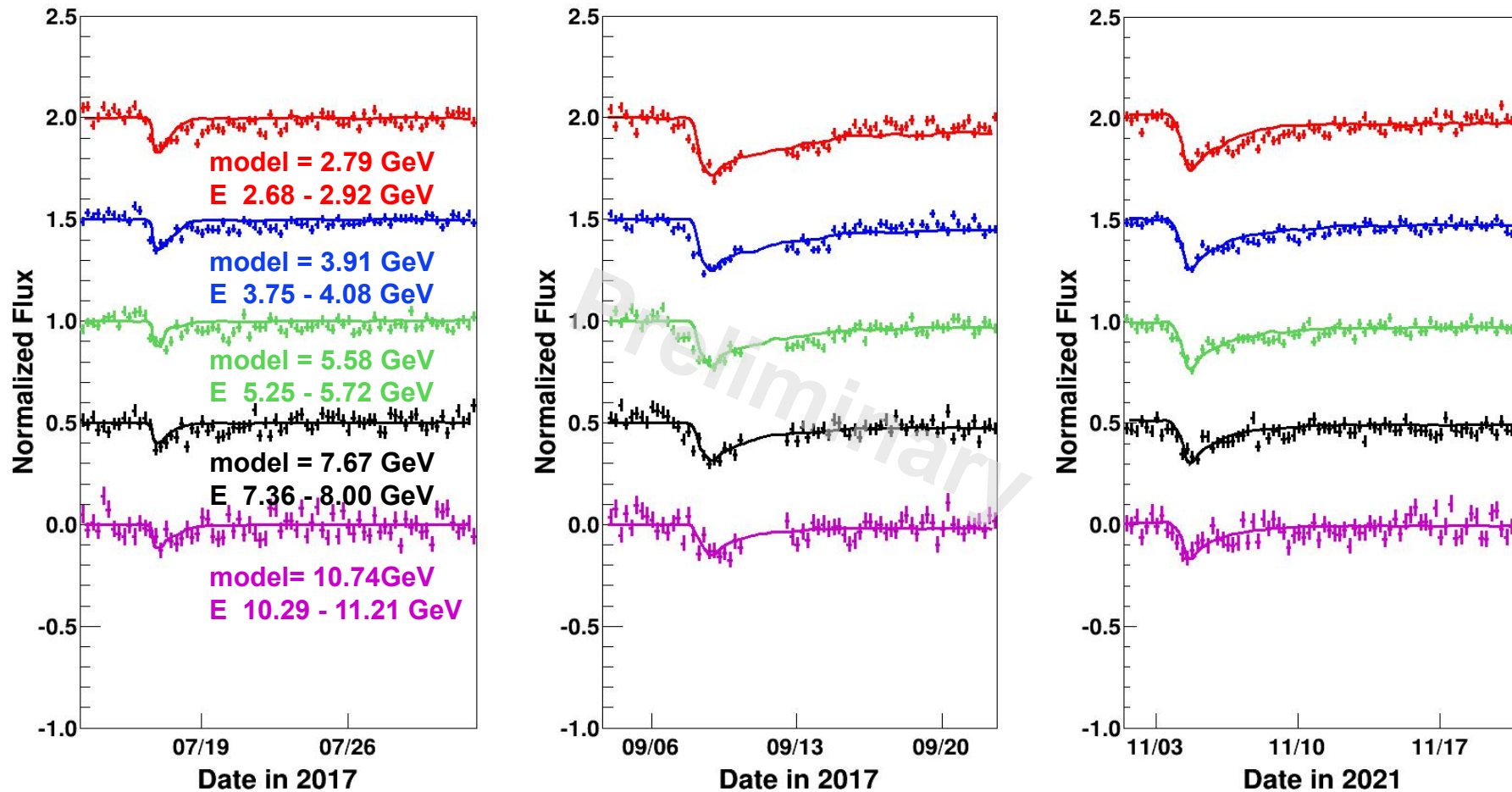


2021.11 FD Paramrter:

- $R_a = 0.3 AU$
- $R_b = 0.3 AU$
- $V_{sw} = 1473 \text{ km/s}$
- $\rho = 7.0$
- $\theta = 100^\circ, \varphi = 120^\circ$
- $\theta_0 = 90^\circ, \varphi_0 = 20^\circ$

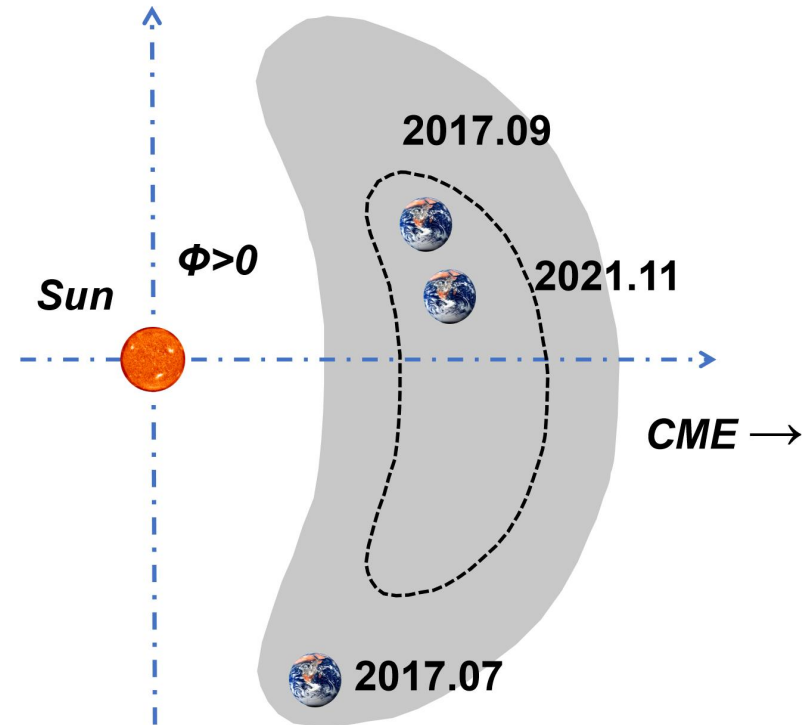


模拟结果



- SDE方法很好的重现了三次FD的下降及恢复过程，模拟能量2.68 GeV 至11.21GeV
- 在模拟过程中使用了地球在CME中位置的信息

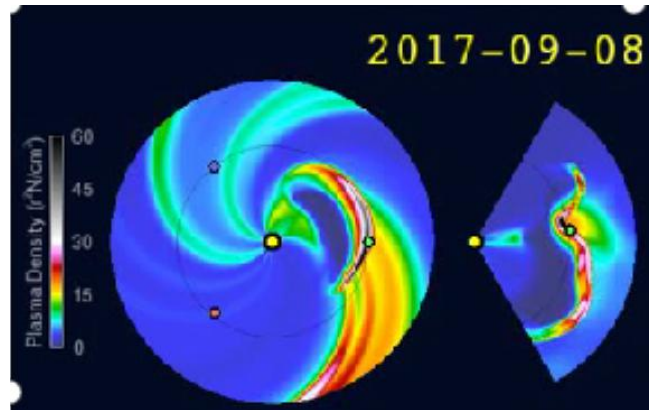
- 使用DAMPE卫星2 ~20 GeV电子数据研究了三次FD下降，并使用SDE方法重现了结果
- 当地球处于CME中心位置时，FD展现出了能量相关的恢复时间，而地球位于CME边缘时，体现了能量不相关性
- 可以根据CME的延展性及地球所在位置，给出近地空间的辐射变化
- 从Parker方程及Ito公式给出的解，恢复时间应当体现出能量相关性，不相关性可以用不同的CME结构解释？



Backup

2017.09 FD:

- $R_a = 0.3 \text{ AU}$
- $R_b = 0.3 \text{ AU}$
- $V_{sw} = 1500 \text{ km/s}$
- $\rho = 8$
- $\theta = 100^\circ$, $\Phi = 150^\circ$
- $\theta_0 = 90^\circ$, $\Phi_0 = 45^\circ$



On February 3rd, 2022, SpaceX launched the satellite "Starlink". But it re-entered the atmosphere soon after the launch, due to the second magnetic storms of the successive two storms.

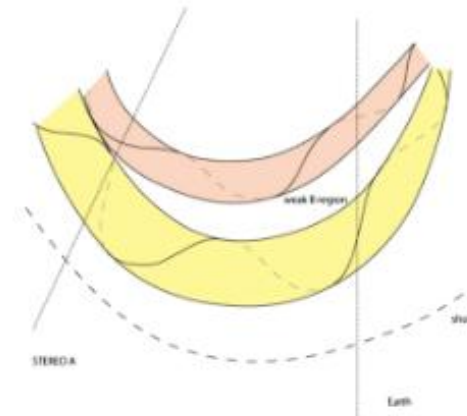


Figure1. Schematic illustration of two flux ropes encountering the Earth. Kataoka et al. (2022)

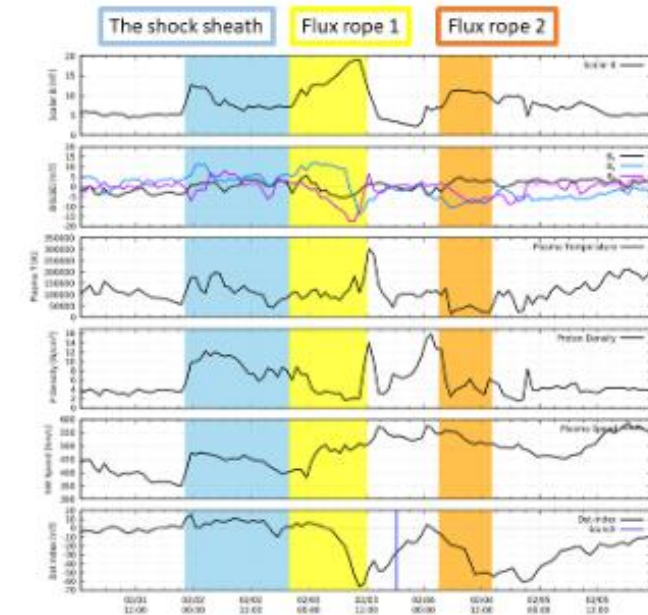


Figure2. Magnetic field data and solar wind data.