

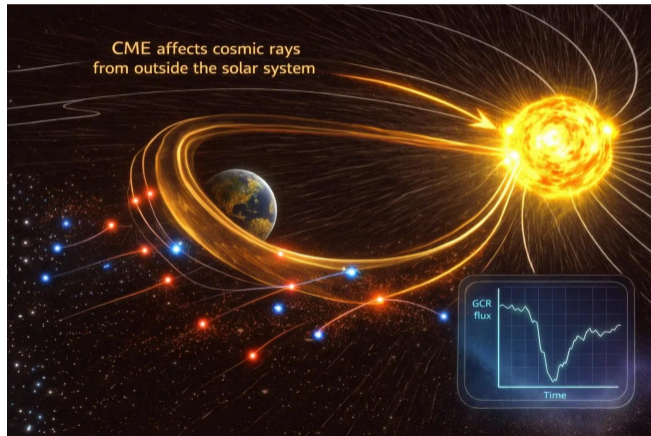
基于DAMPE的宇宙线电子福布什下降研究

报告人：李文昊

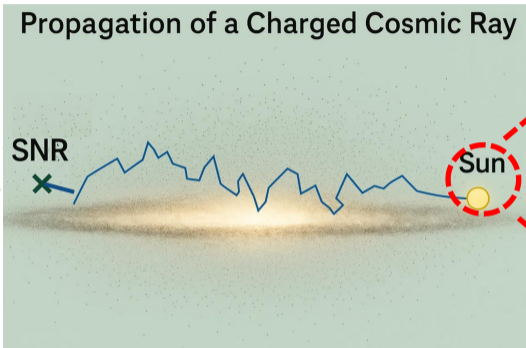
F. Alemanno et al. (DAMPE Collaboration), Phys. Rev. Lett. 136, 101004

2026 年 4 月 21 日

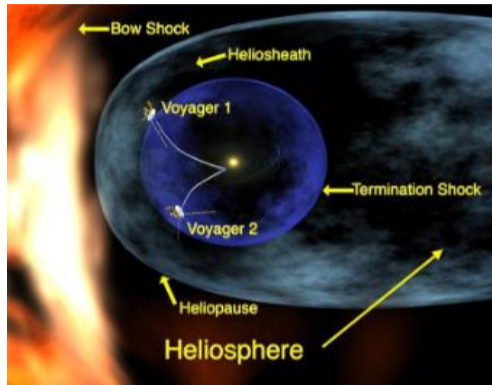
1. 太阳调制及福布什下降
2. 福布什下降研究现状
3. DAMPE卫星数据分析及结果
4. 随机微分模型及其模拟
5. 结论与展望



1. 太阳调制及福布什下降



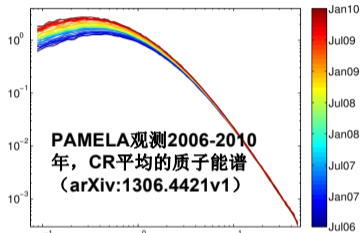
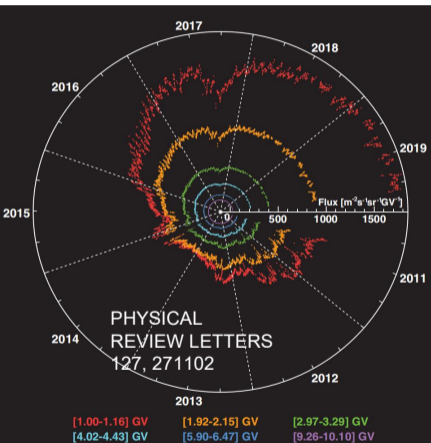
Credit: Sora



Credit: NASA

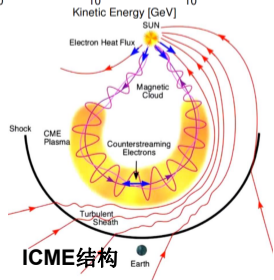
- 地球附近的宇宙线：银河系传播以及太阳系的传播
- 日球层不同位置的结构

1. 太阳调制及福布什下降



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:

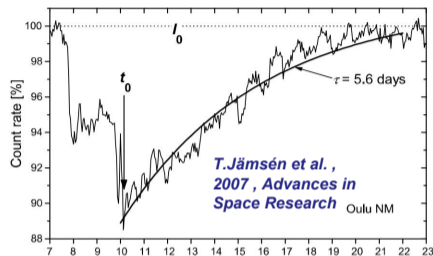
- 太阳调制极大期, ICME/flare等太阳活动发生频繁
- 短期调制结束后, GCR流量能恢复到调制前状态

1. 太阳调制及福布什下降

定义： 宇宙线通量在几十小时内快速下降，随后几天 - 几周缓慢恢复的现象。

成因： 日冕物质抛射 (CME) 或共转相互作用区 (CIR) 扰动行星际空间， 屏蔽部分银河宇宙线到达地球。

传统观测： 中子监测器 (NM) 探测次级中子，受地磁截止刚度影响，时间分辨很好 (min)，但成分和能量分辨有限 (积分效应)。



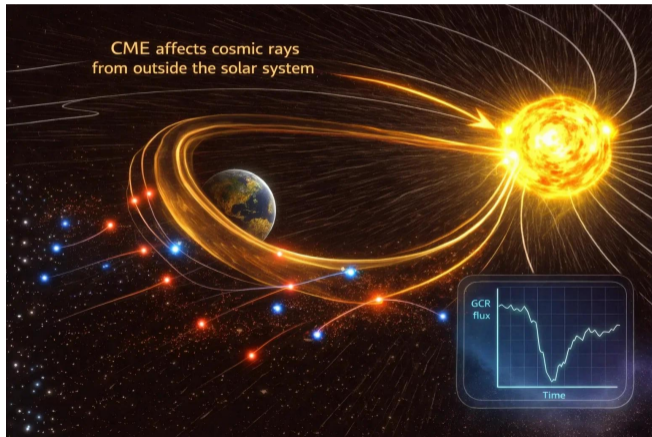
$$E_m = 0.088P_c^2 + 0.154P_c + 10.12$$

用带电粒子研究太阳活动

- 带电粒子受太阳调制的过程，其时变能谱是研究行星际运输最直接、有效的物理量。
- 空间探测结果少 (PAMELA能量、时间分辨有限，AMS-02 公布日通量但未做 FD 分析)。
- 高统计量、宽能段的电子测量可以揭示太阳物理 (CME)、空间物理 (传播参数) 的性质。

目录

1. 太阳调制及福布什下降
2. 福布什下降研究现状
3. DAMPE卫星数据分析及结果
4. 随机微分模型及其模拟
5. 结论与展望



2. 福布什下降研究现状：强子与轻子

强子 FD:

- PAMELA: 质子 FD 存在两类恢复时间 (图1) —— 能量强依赖 (I 型) 和 能量无关 (II 型)。
- 地面探测器测量次级中子, 也发现类似二分性 (图2), 但物理解释尚不明确。
- AMS-02 质子数据显示 CME 与 CIR 引起的 FD 差异不大。

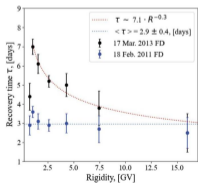


图1: PAMELA对质子FD测量

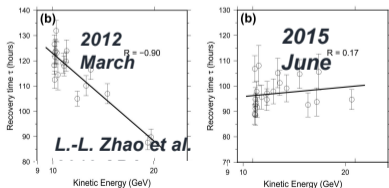


图2: L.L. Zhao等利用中子探测器

轻子 FD:

- PAMELA: 仅报道一个电子事件, 恢复快于质子 (图3)。
- DAMPE 曾详细分析 2017 年 9 月事件, 发现恢复时间随能量变短, 可用扩散屏障模型解释。
- 核心问题: 电子 FD 的恢复时间是否也存在两种能量依赖行为? 其背后的物理机制是什么?

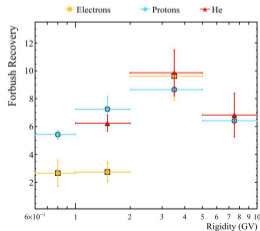
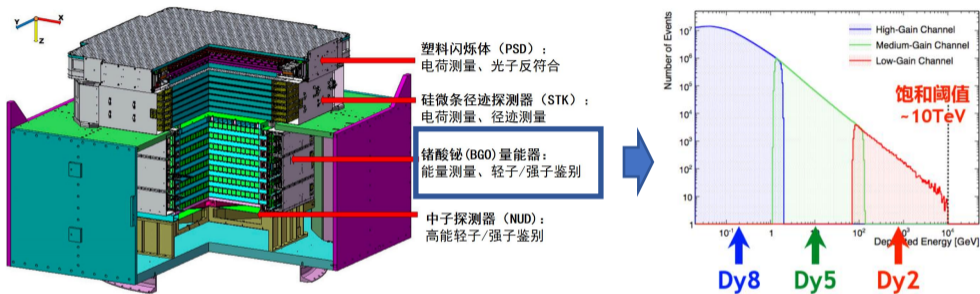


图3: PAMELA对单个FD事件中电子、质子、He的测量结果比较

2. 福布什下降研究现状：强子与轻子



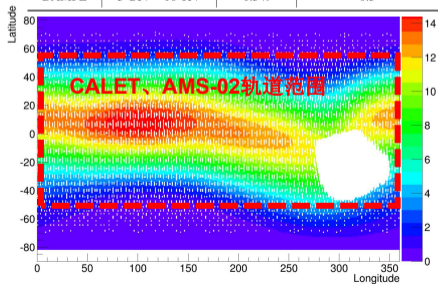
- 空间FD下降研究主要由AMS、PAMELLA等展开，可以探测到低至 ~ 1 GeV的粒子
- DAMPE卫星以极高的接受度和e/p分辨本领，可以进行电子FD的研究
- 相比于其他空间卫星，DAMPE大大提高宇宙电子测量的时间分辨率（6h），能量测量范围（ >2 GeV）

2. 福布下降研究现状：DAMPE的测量结果

DAMPE测量优势

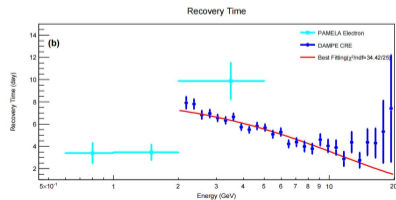
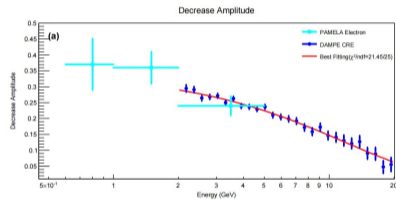
- 能量分辨：测得准
- 接收度：统计量大
- 轨道范围：低能区曝光多

探测器	探测能段	能量分辨率	有效接受度 ($\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)
Fermi-LAT	0.1 GeV~300 GeV	5%~15%	~1
AMS-02	0.5 GeV~1 TeV	2%	0.055
CALET	5 GeV~10 TeV	3%	0.1
DAMPE	5 GeV~10 TeV	1.5%	0.3



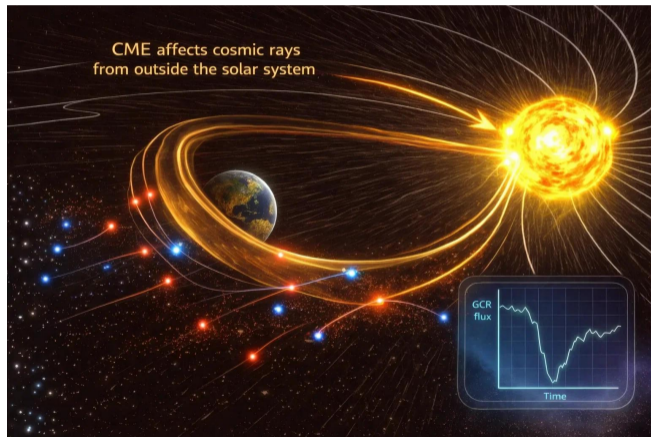
DAMPE单次测量结果 (2021)

- 实现6小时级别的事件分辨
- 能量bin宽度为5%测量更准
- 下降强度/恢复时间能量依赖拟合合



目录

1. 太阳调制及福布什下降
2. 研究现状-地面与空间观测
- 3. DAMPE卫星数据分析及结果**
4. 随机微分模型及其模拟
5. 结论与展望

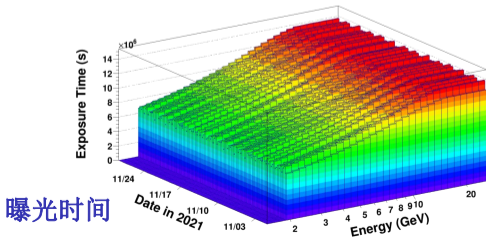


3. DAMPE数据分析及结果

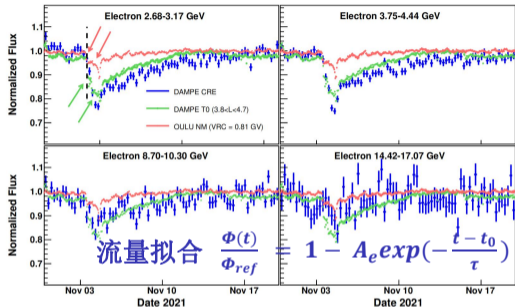
电子筛选: 簇射良好 (经过PSD与BGO前4层)、电荷 $Z \leq 1.7$, 簇射发展参数 $PID \leq 2$, 结合 MC 模板, 逐个时间、能量期间扣除质子本底 (2% - 8%)。

曝光修正: 考虑地磁截止 (VRC) 及南大西洋异常区 (SAA), 低能区有效曝光时间下降。

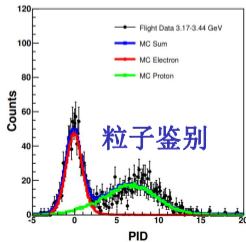
候选事件识别: 结合 DAMPE 本底触发率 (T_0) 与 OULU 中子监测器数据, 寻找快速下降 + 缓慢恢复结构。时间窗口: 下降开始前 10 天至开始后 30 天。



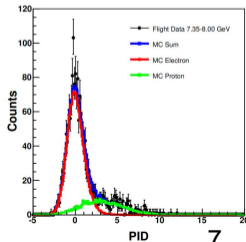
曝光时间



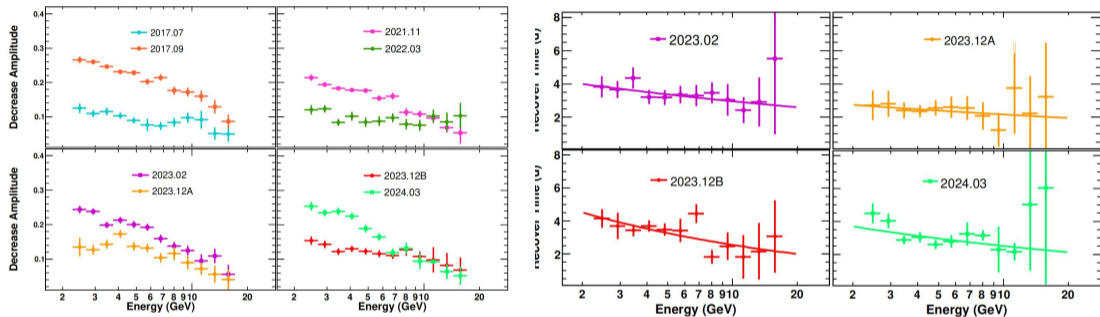
流量拟合 $\frac{\Phi(t)}{\Phi_{ref}} = 1 - A_e \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right)$



粒子鉴别

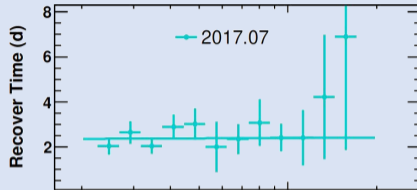
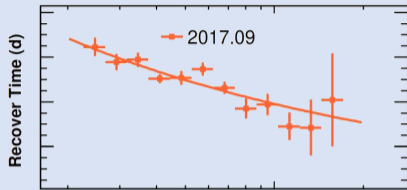


3. DAMPE数据分析及结果



- 8 个事件的下降幅度均随能量升高而减小。
- 最高幅度 $\sim 30\%$ (低能), 高能区 (~ 20 GeV) 降至 $< 15\%$ 。
- 高能粒子受磁场影响更小, 更容易穿透 CME 扰动区。

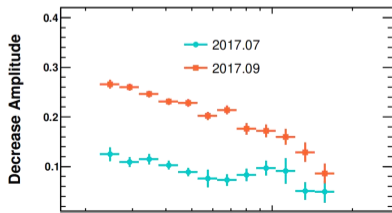
3. DAMPE数据分析及结果



定义幂律 $\tau = aE^b$, b 表征能量依赖强弱 (负值越大依赖越强)。

- τ 随能量增加明显变短。
- 幂律指数 $b = -0.348 \pm 0.054$

- τ 基本不随能量变化。
- $b = 0.010 \pm 0.091$



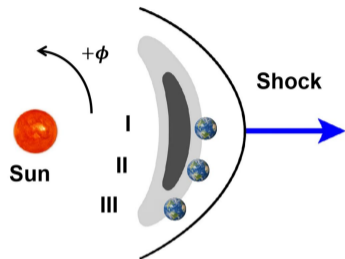
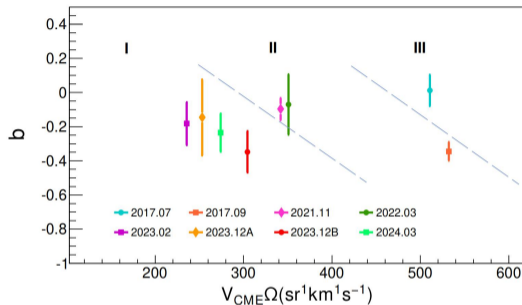
- 电子 FD 恢复时间同样存在“两类行为”，与强子 FD 类似
- 但下降强度均满足随能量增加，强度减弱的现象，5%接近统计误差

3. DAMPE数据分析及结果

- 分析时段： 2016 年 1 月 1 日 - 2024 年 5 月 31 日。
- 共识别出 8 个显著电子 FD 事件（下降幅度 > 10%@ 2 GeV）
- 能量范围： 2 - 20 GeV，时间分辨率 6 小时。

DAMPE CRE Observations				CME Parameters		Simulation Parameters				
Time (UTC)	A_e^{\max}	τ (day)	b	V_{CME} (km s $^{-1}$)	Θ ($^{\circ}$)	ρ	θ_0 ($^{\circ}$)	ϕ_0 ($^{\circ}$)	θ_{br} ($^{\circ}$)	ϕ_{br} ($^{\circ}$)
2017-07-17 04:30	0.125	2.03	0.010	1199	57	4.25	70	-50 (III)	100	120
2017-09-08 13:30	0.266	6.46	-0.348	1611	48	8.25	90	45 (II)	90	120
2021-11-04 21:30	0.214	4.69	-0.099	1397	41	7.00	90	30 (II)	90	90
2022-03-14 19:30	0.123	2.61	-0.074	983	50	6.50	100	0 (I)	100	100
2023-02-28 14:30	0.244	3.83	-0.187	1237	36	5.00	90	0 (I)	60	80
2023-12-01 18:30	0.137	2.71	-0.148	944	43	5.50	90	0 (I)	90	90
2023-12-17 22:30	0.154	4.15	-0.355	921	48	7.25	90	10 (I)	100	90
2024-03-24 22:30	0.254	4.49	-0.239	1438	36	10.0	100	0 (I)	90	80

3. DAMPE数据分析及结果

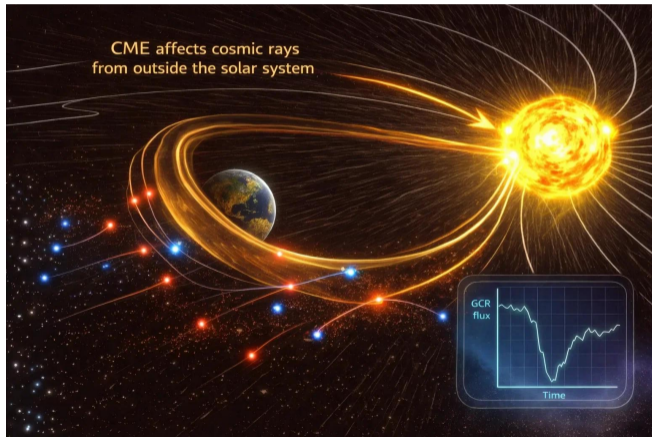


结合 WSA-ENLIL 模型提供的 CME 速度 V_{CME} 和立体角 Ω 给出:

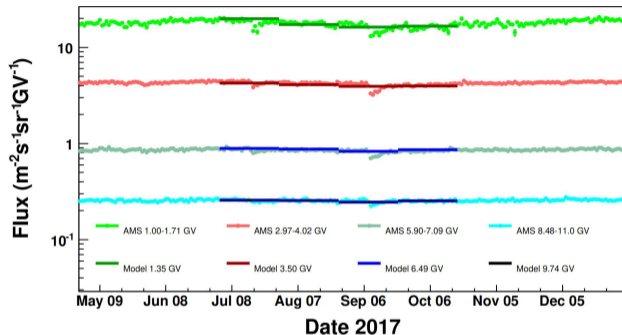
- 对于对头碰撞事件 (I 类) 和中间事件 (II 类), b 与 $V_{CME} \cdot \Omega$ 呈反相关
- 掠射事件 (III 类) 目前仅一例, 趋势待定
- 物理图像: CME 越快、越宽, 对高能粒子的屏蔽效应越显著, 恢复时间能量依赖越强。

目录

1. 太阳调制及福布什下降
2. FD研究现状
3. DAMPE卫星数据分析及结果
4. 随机微分模型及其模拟
5. 结论与展望



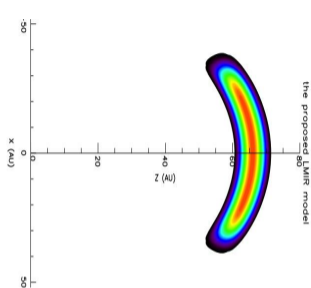
4. 扩散屏障模型与 SDE 模拟



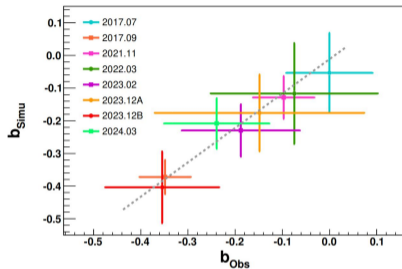
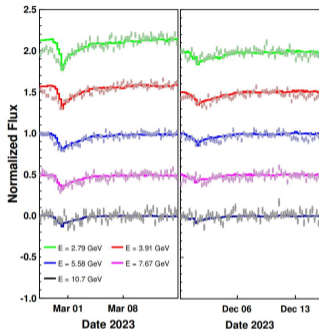
$$\frac{\partial f}{\partial t} = -(\vec{V}_{\text{sw}} + \langle \vec{V}_d \rangle) \cdot \nabla f + \nabla \cdot (K^{(s)} \cdot \nabla f) + \frac{1}{3} (\nabla \cdot \vec{V}_{\text{sw}}) \frac{\partial f}{\partial \ln p}$$

- 利用Luo开发的粒子传播程序拟合AMS-02电子日流量结果，确定不同BR时期的传播参数
- 基于长周期的调制参数拟合短周期调制参数（FD）

4. 扩散屏障模型与 SDE 模拟



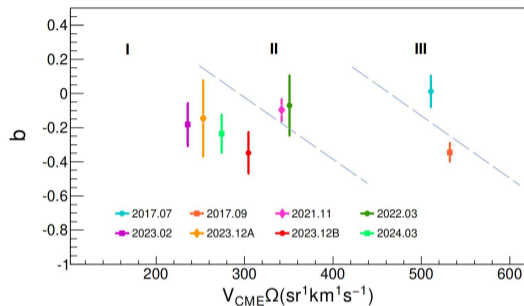
扩散传播屏障模型



模拟-在轨数据b参数比较

- 采用 Parker 方程描述粒子在日球层中的运输， CME 扰动视为一个快速移动的扩散屏障。
- 输入参数： CME 速度、角宽度、方向 (来自 WSA-ENLIL)，屏障内扩散系数缩减因子 ρ 调节。 随机微分方程 (SDE) 方法求解。
- 模拟能很好地再现 DAMPE 观测的电子通量时间轮廓，且得到的斜率 b_{Simu} 与观测值 b_{Obs} 一致

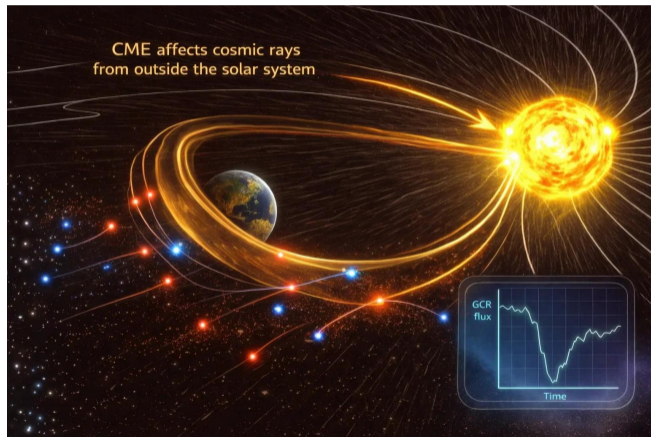
4. 扩散屏障模型与 SDE 模拟



- 恢复时间的能量依赖行为直接与 CME 的 **速度、空间范围、抛射方向** 相关。
- 头碰 CME (I 类): 地球位于 CME 中心, 扰动最强, 恢复时间能量依赖显著。
- 掠射 CME (III 类): 地球仅擦过边缘, 扰动弱, 恢复时间几乎与能量无关。
- 中间情况 (II 类) 则呈现过渡特征。
- 个别事件 (如 2022-03) 分类模糊, 可能因下降幅度小导致 b 不确定度大。

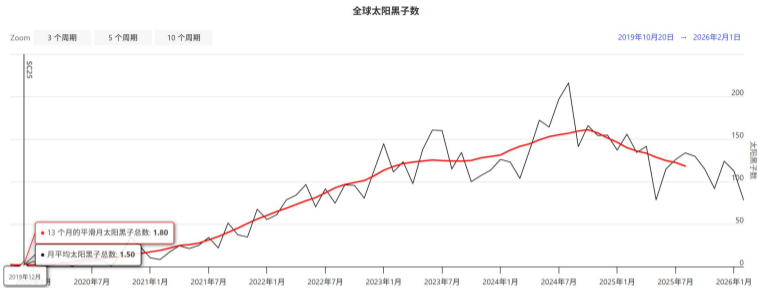
目录

1. 太阳调制及福布什下降
2. 研究现状-地面与空间观测
3. DAMPE卫星数据分析及结果
4. 随机微分模型及其模拟
5. 结论与展望








- DAMPE 在 2 - 20 GeV 能段识别出 8 个电子 FD 事件，下降幅度随能量减小，最大达 30%。恢复时间的能量依赖呈现两类行为：强依赖 ($b \sim -0.3$) 与几乎无关 ($b \sim 0$)。
- 这种多样性与 CME 的速度、立体角及抛射方向有关——头对头碰 CME 导致强能量依赖，掠射 CME 导致弱依赖。
- 基于 Parker 方程的扩散屏障模型能够成功再现观测结果。
- 所有事件均发生在太阳正极性期 ($A>0$)，排除了漂移方向变化的影响。

首次对电子 FD 进行系统研究，揭示了与强子 FD 相似的多样性，并建立了与 CME 参数的直接联系。



- 第 25 周期的太阳活动仍较强， 预计将有更多 FD 事件， 尤其 II、III 类事件， 可用于检验当前发现。
- 与原子核 FD (如 PAMELA、AMS-02 数据) 进行系统比较， 研究荷电符号依赖。
- 联合其他探测实验结果如 LHAASO在TeV的各向异性、ASO-S结果) 进一步揭示行星际磁场结构以及太阳调制物理。
- DAMPE 将继续运行， 积累更高统计量， 有望将电子 FD 研究延伸至更高能量， 且将探测正、负电子独立的性质。

主要参考文献

-  J. Chang et al. (DAMPE Collaboration), *Astropart. Phys.* 95, 6 (2017).
-  F. Alemanno et al. (DAMPE Collaboration), *ApJL* 920, L43 (2021).
-  O. Adriani et al. (PAMELA Collaboration), *ApJ* 810, 142 (2015).
-  X. Luo et al., *ApJ* 860, 160 (2018).
-  F. Alemanno et al. (DAMPE Collaboration), 202? (this work).

谢谢!