

AMS低能电子流强 和宇宙线的电荷符号相关性

高能物理研究所
孙泽同

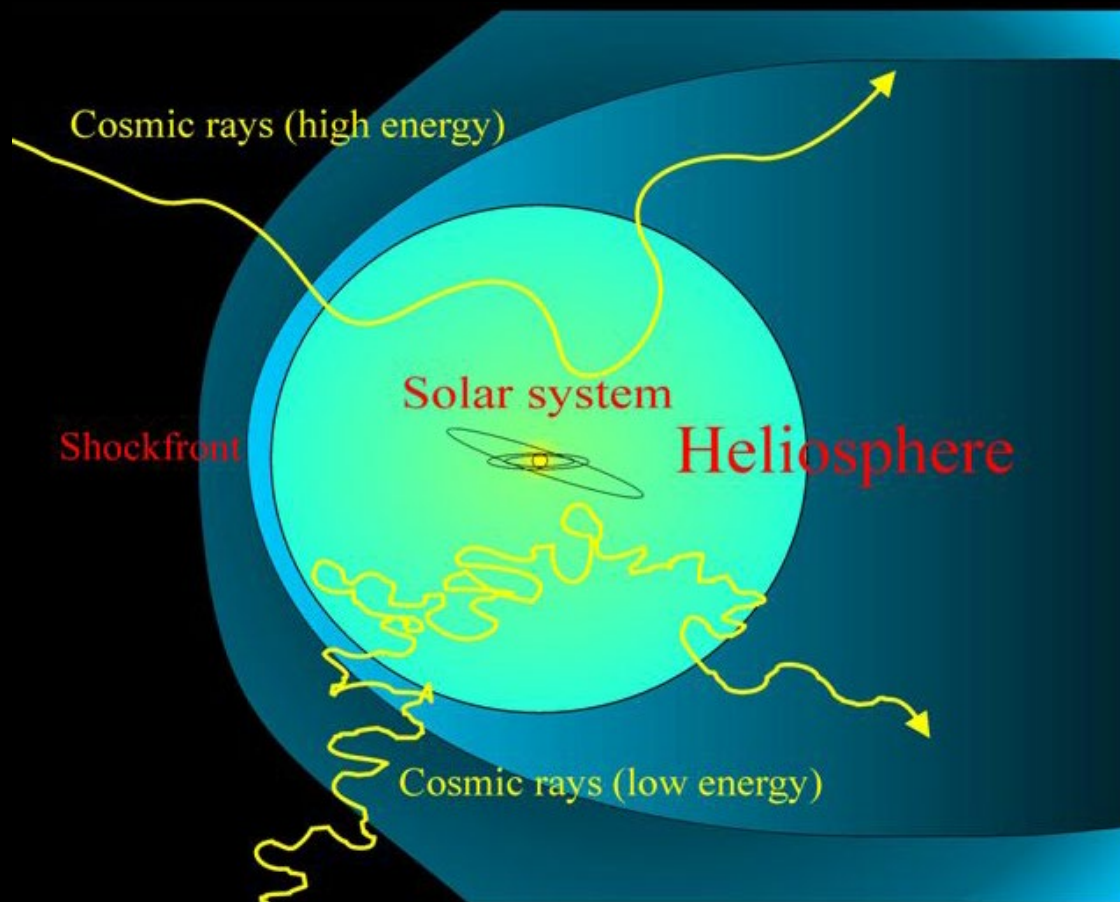
AMS



2024年5月10日，西昌

带电宇宙线受太阳磁场的影响

宇宙线的太阳调制取决于它们的质量、电荷、能量，以及太阳长/短期的活动



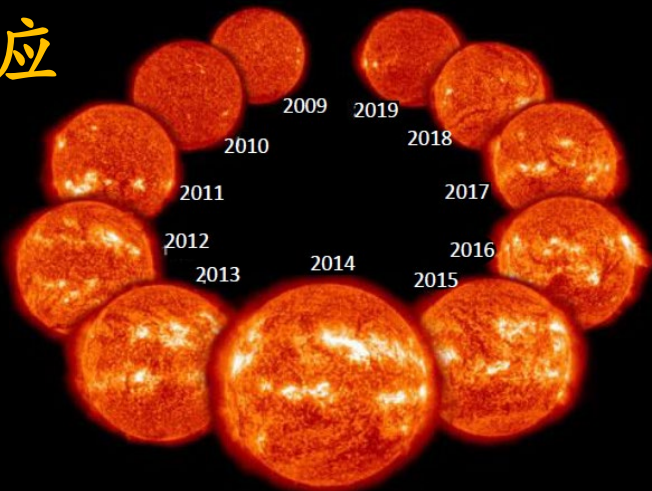
电子是宇宙线中最多的负电荷粒子

电子与正电子质量相同，电荷符号相反

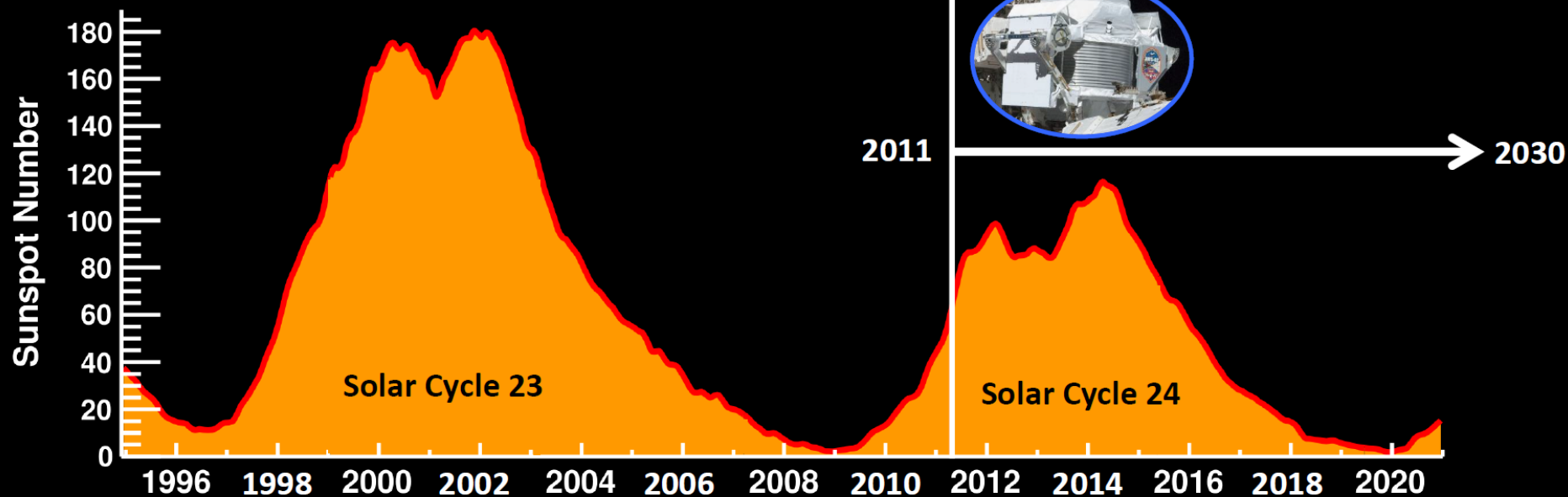
AMS是目前唯一可以区分测量电子、正电子的空间实验

太阳活动对低能宇宙线的长期调制效应

- 太阳活动会影响太阳系的磁场强度及分布，进而对较低能带电宇宙线的流强等性质产生影响，即太阳调制 (Solar Modulation)。由于太阳磁场变化等长期性活动的周期性(周期约11年)，这种影响呈周期性



Sunspot activity is extensively recorded since 1755



- 低能宇宙线电子流强随时间变化的长期测量，对太阳调制以及太阳系内宇宙线传播的研究有着重要意义
- 对近地轨道载人航天环境、宇航员防护也有重要意义

宇宙线的短期周期性调制效应

宇宙线短期的周期性效应与太阳自转周期相关（Bartels rotation, 27天）

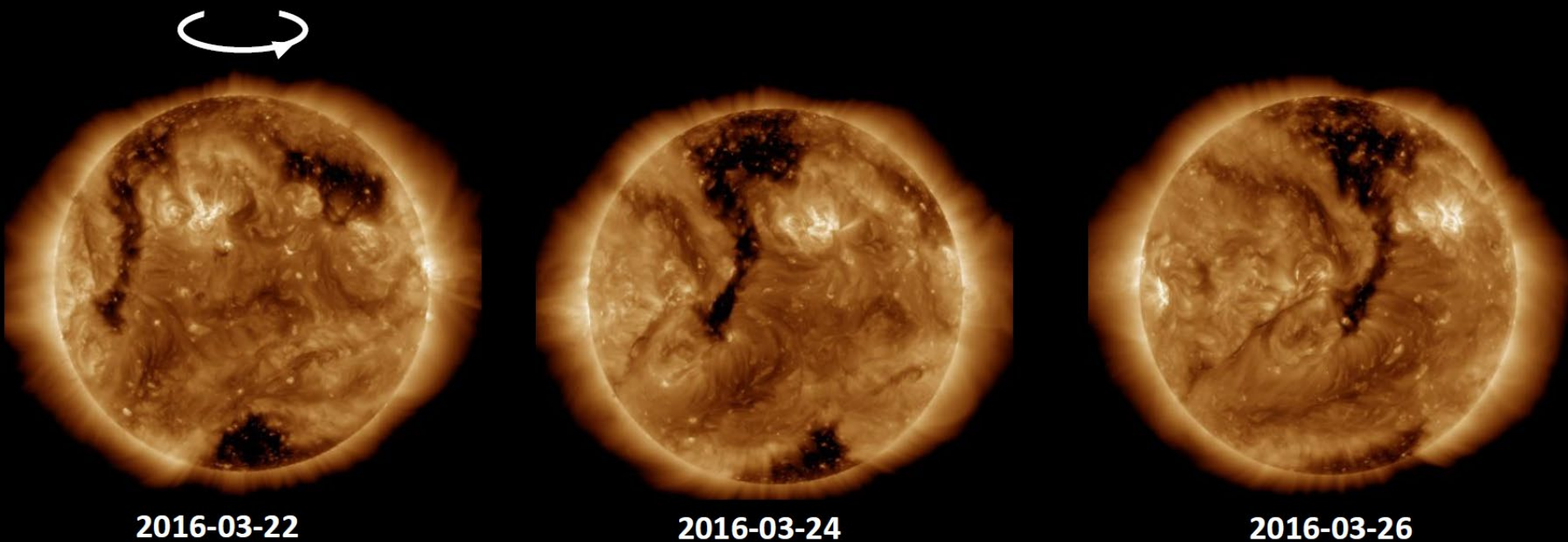
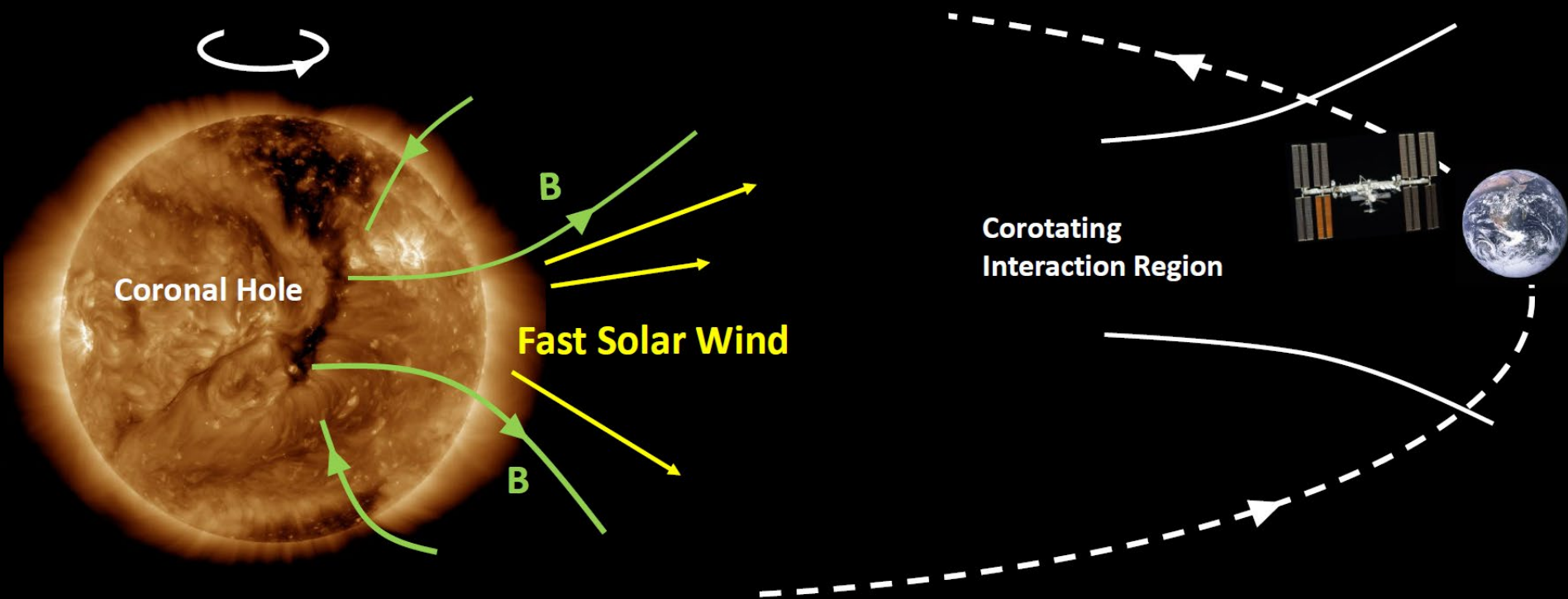


Image taken by Dynamics Observatory (SDO), NASA

日冕洞是太阳表面等离子体密度和温度较低的区域，因此在图片中显得较暗

太阳剧烈活动造成宇宙线短期调制效应

由日冕洞产生的高速太阳风会影响近地轨道的宇宙线环境



对短时间内单一宇宙线粒子流强的测量可以为近地轨道辐射环境的研究提供独特、关键的信息。

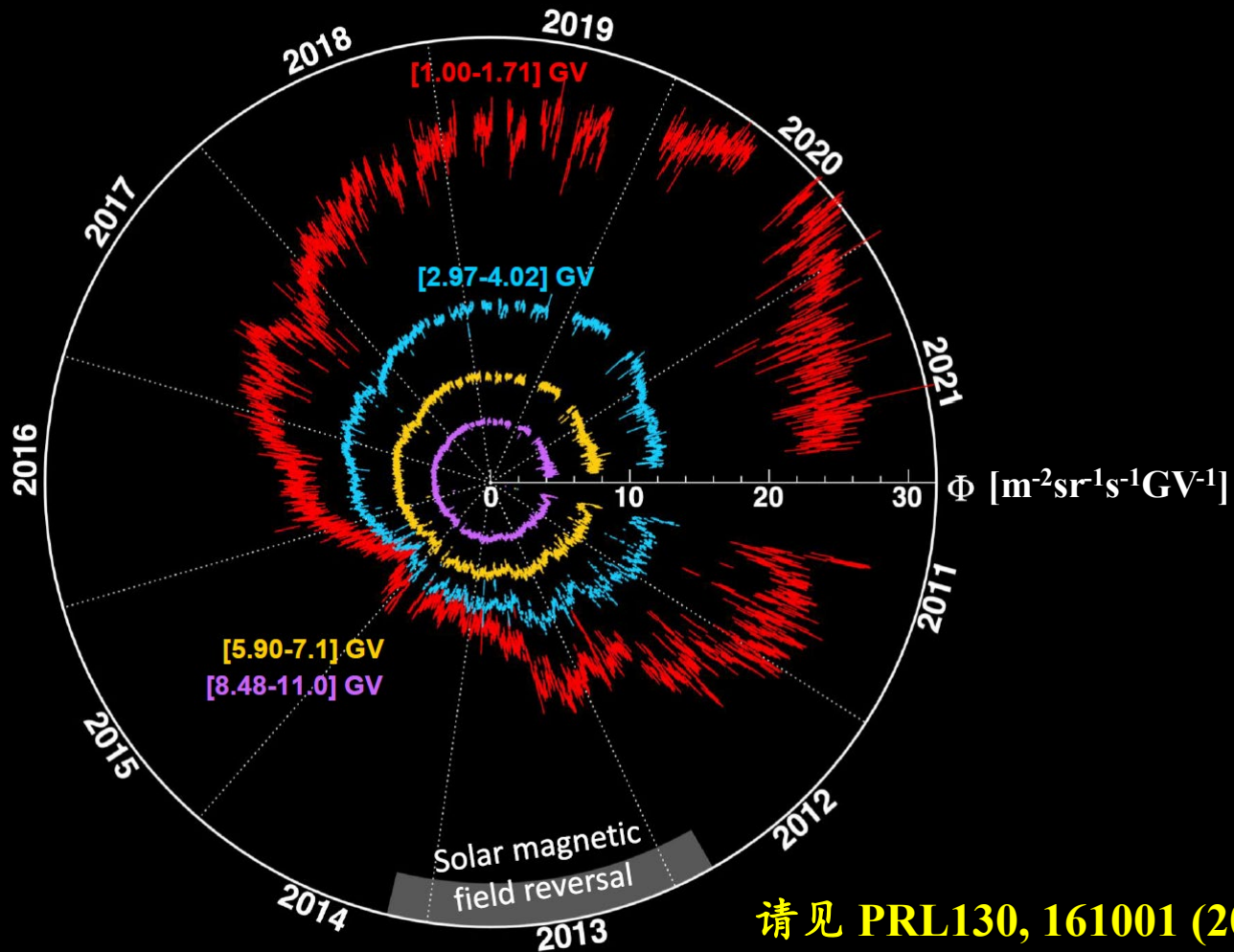
以天为单位的宇宙线电子流强测量结果

PHYSICAL REVIEW LETTERS 130, 161001 (2023)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

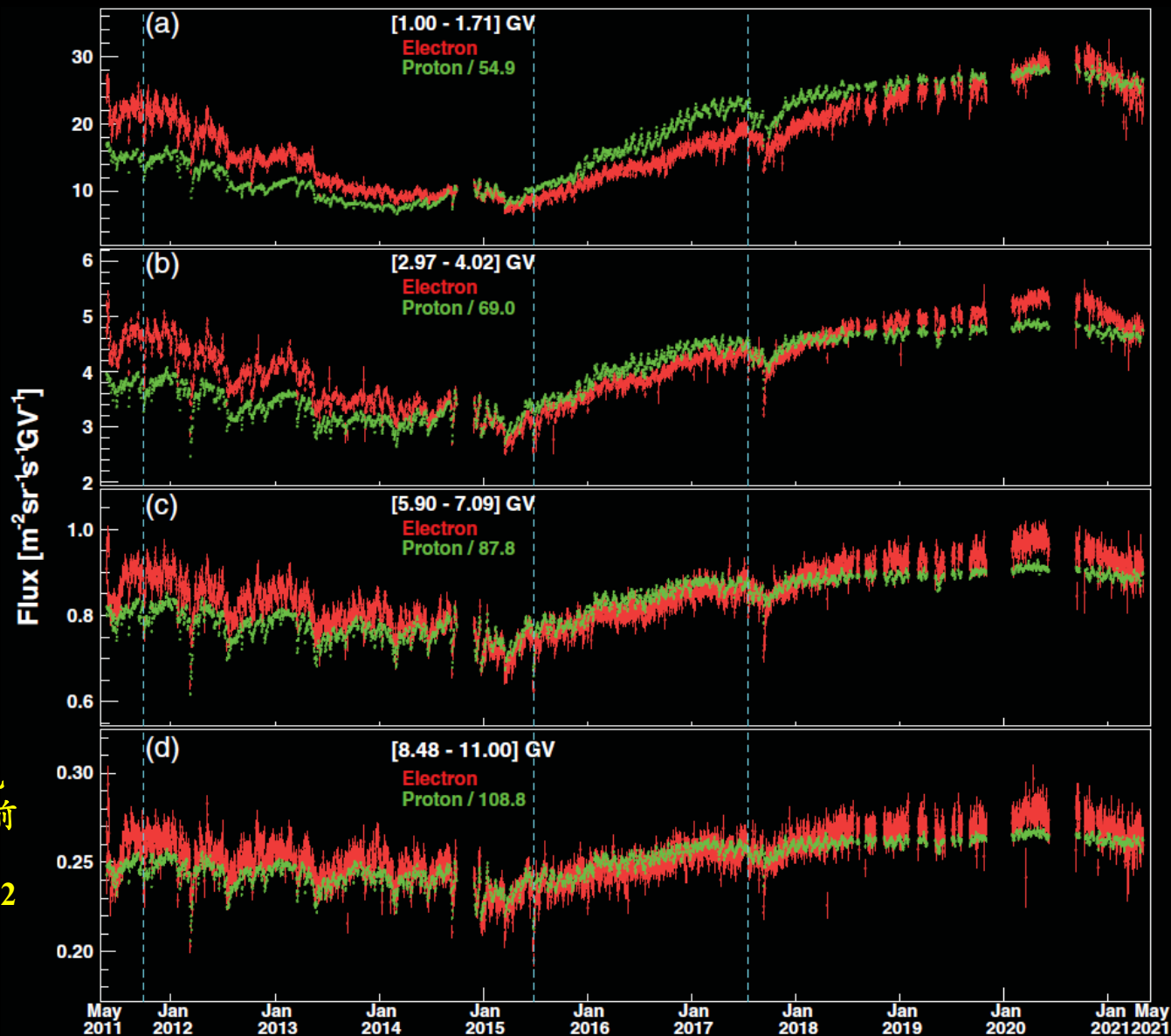
Temporal Structures in Electron Spectra and Charge Sign Effects in Galactic Cosmic Rays



请见 PRL130, 161001 (2023)

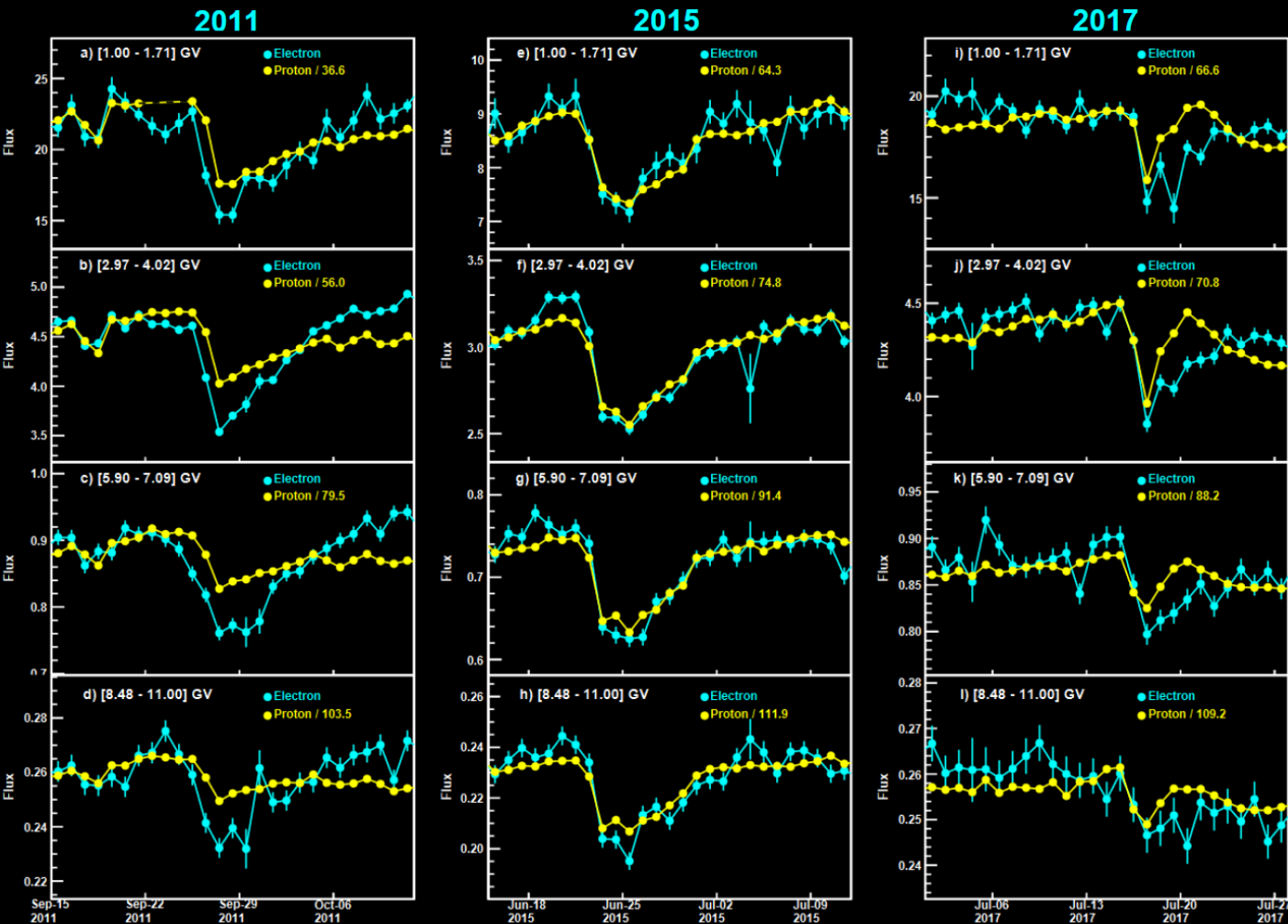
AMS测量电子、质子流强长期时间结构的对比

长期来看，电子与质子的时间结构显著不同



*质子数据请见
AMS合作组之前
发表的文章
PRL 127, 271102
(2021)

电子、质子流强短期时间结构差异

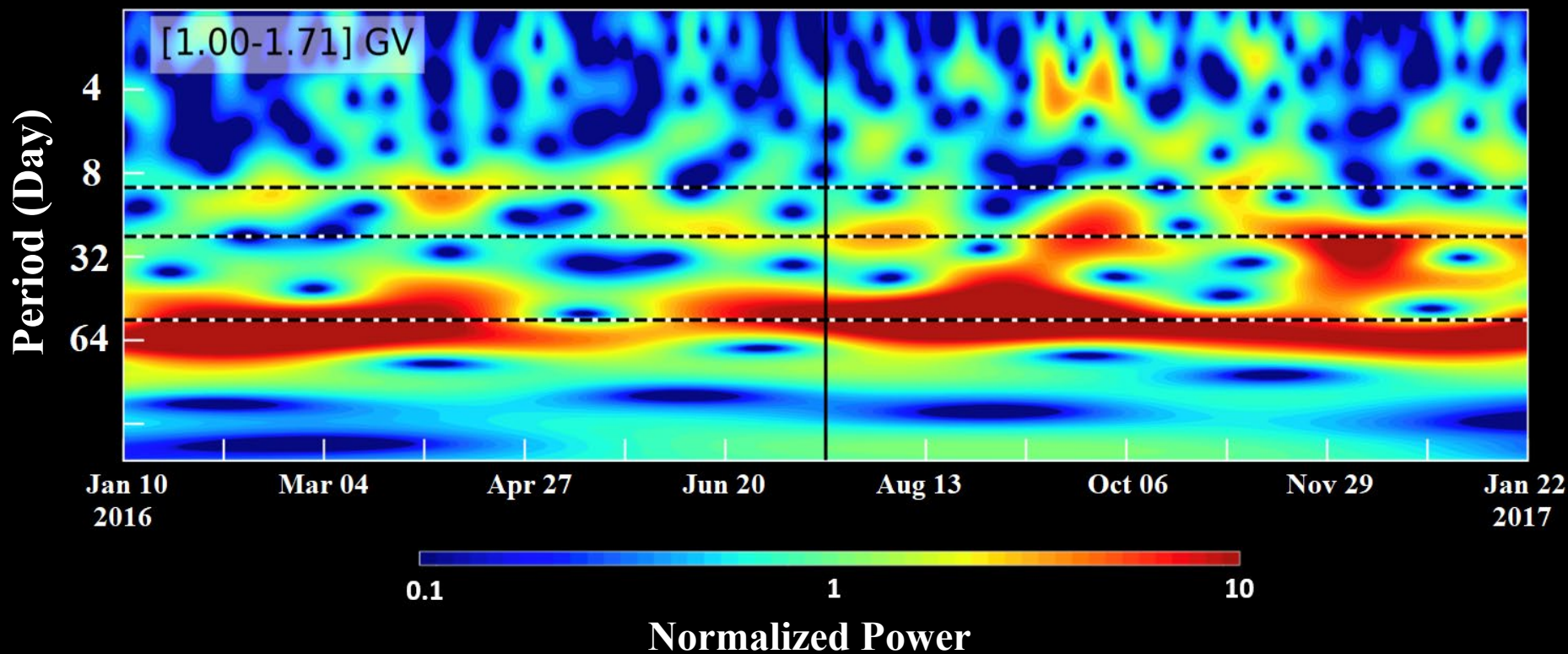


2011年和2017年，太阳活动处于较弱的时期，电子与质子的短期时间结构有着显著不同，而2015年太阳活动较强的时期，这种差异消失。

电子流强的周期性分析

使用小波(Wavelet)分析考察电子流强的短期太阳周期性调制

电子流强存在9天、13.5天、27天的周期性

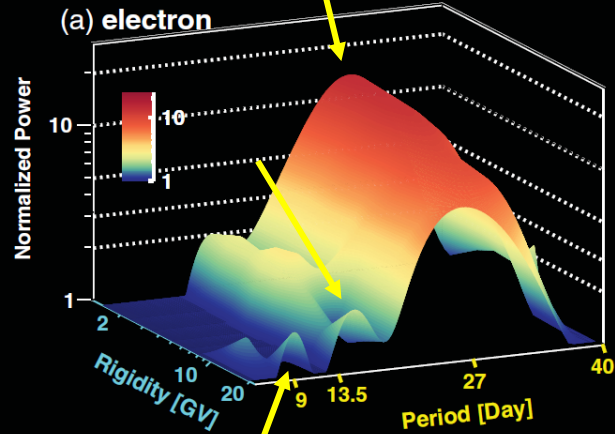


电子流强的周期性分析

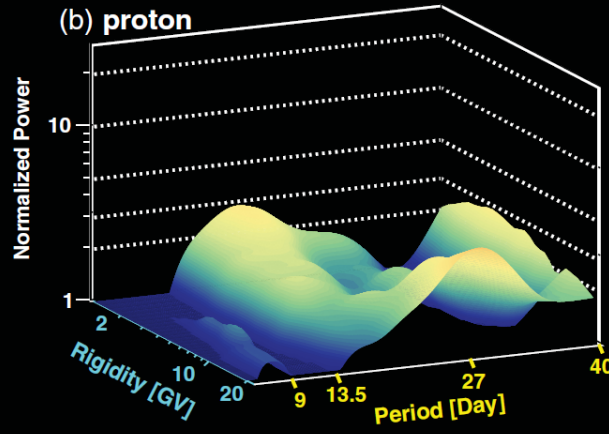
小波(Wavelet)分析

Second half of 2011

(a) electron



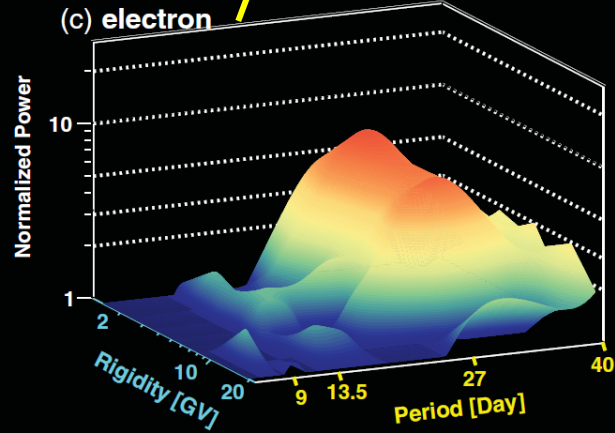
(b) proton



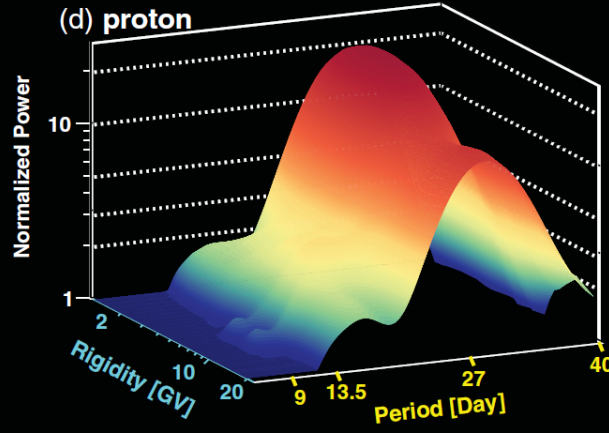
2011年下半年，电子的27天周期调制性强于质子

First half of 2017

(c) electron



(d) proton

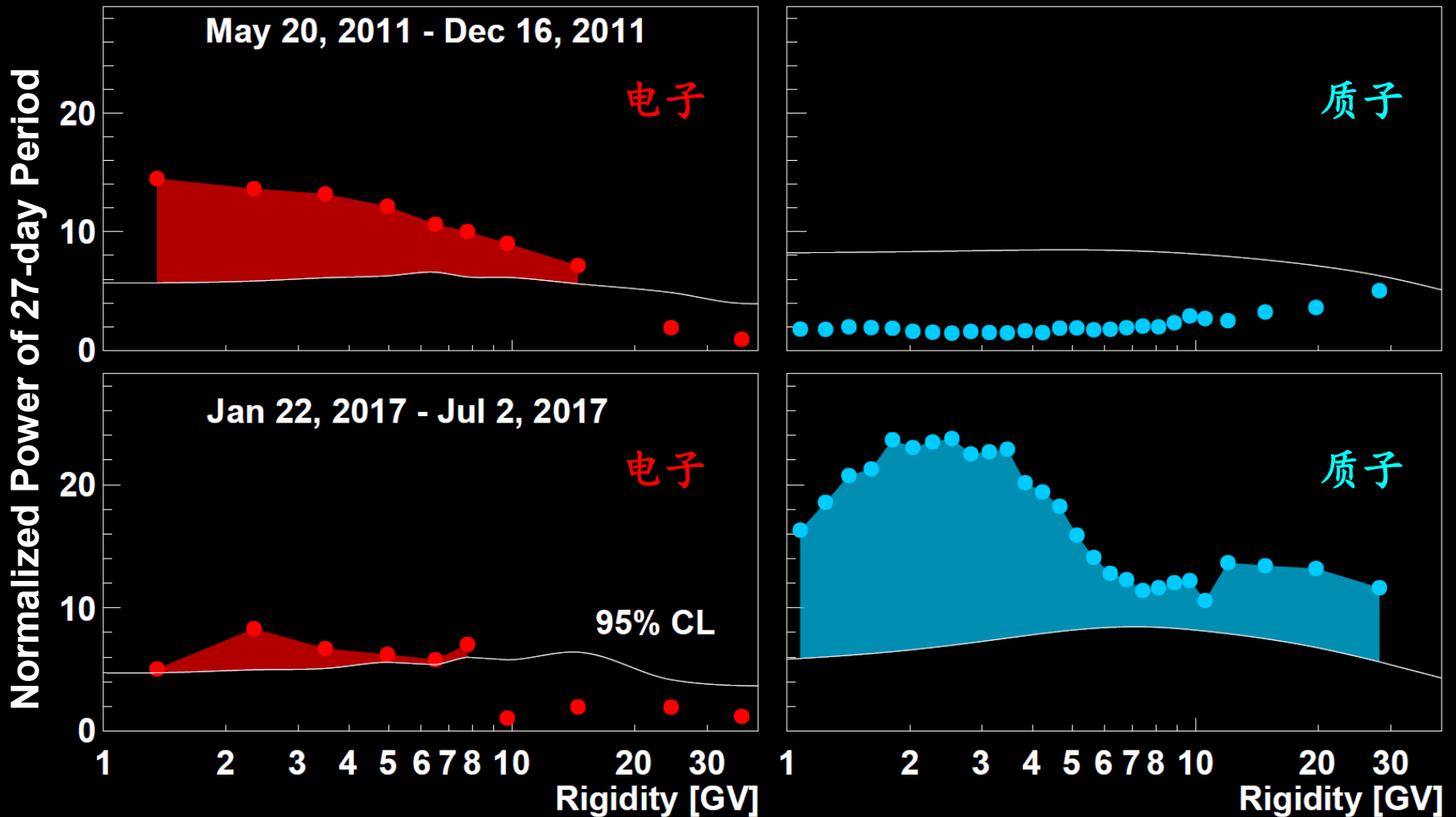


2017年上半年，电子的27天周期调制性弱于质子

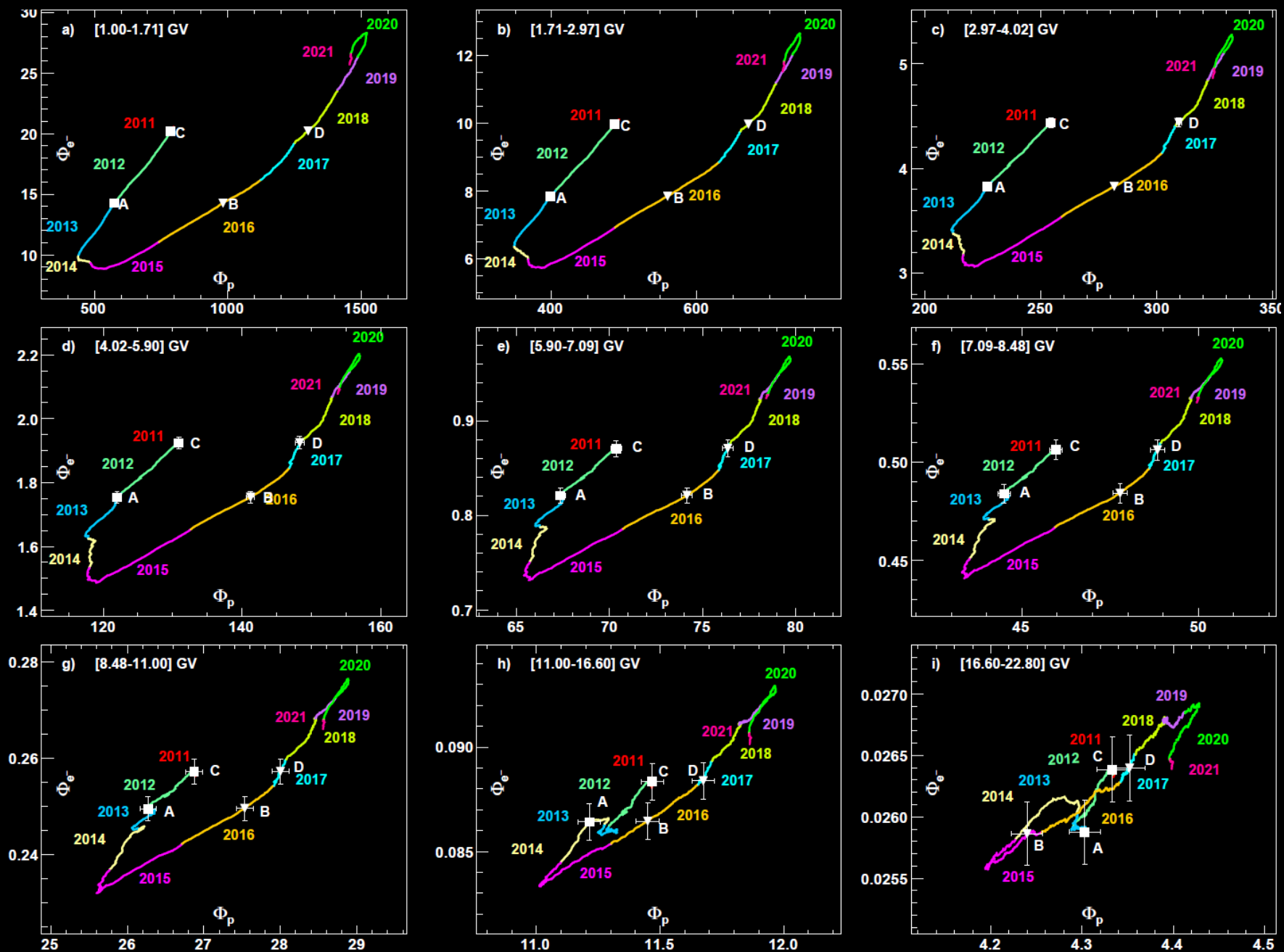
电子流强的周期性分析

2011年下半年, 电子的27天周期调制性强于质子

2017年上半年, 电子的27天周期调制性弱于质子

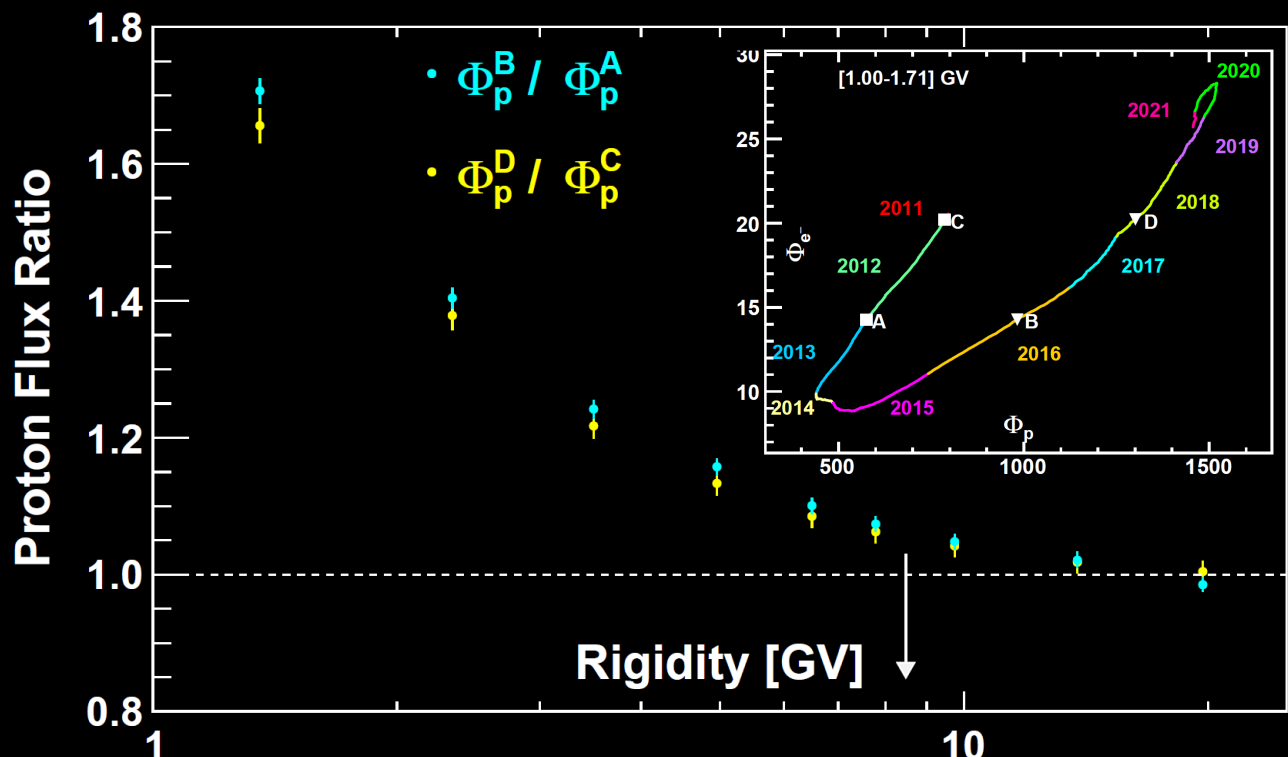
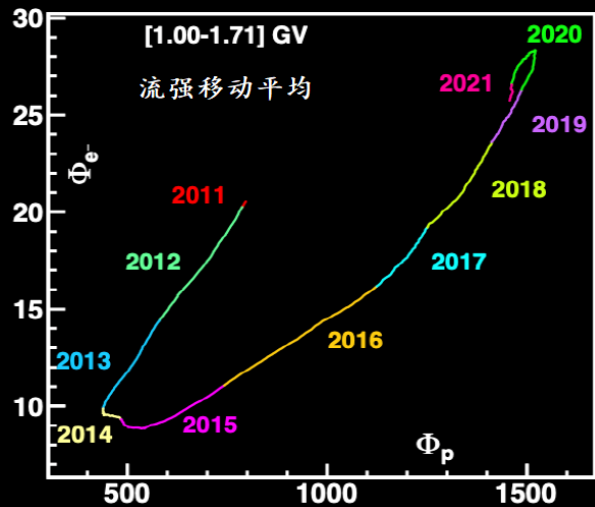
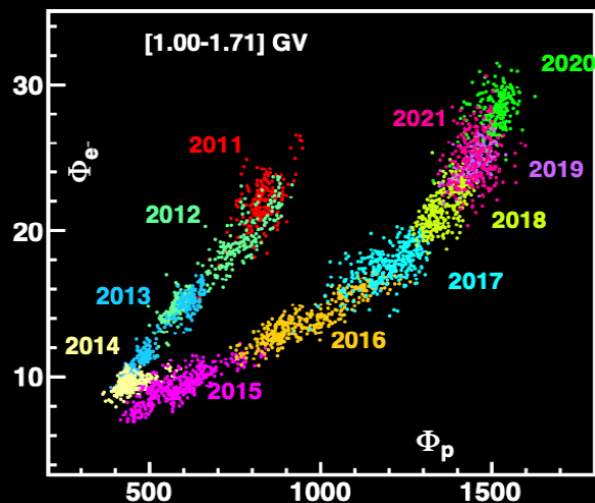


电子、质子流强的时滞(Hysteresis)结构



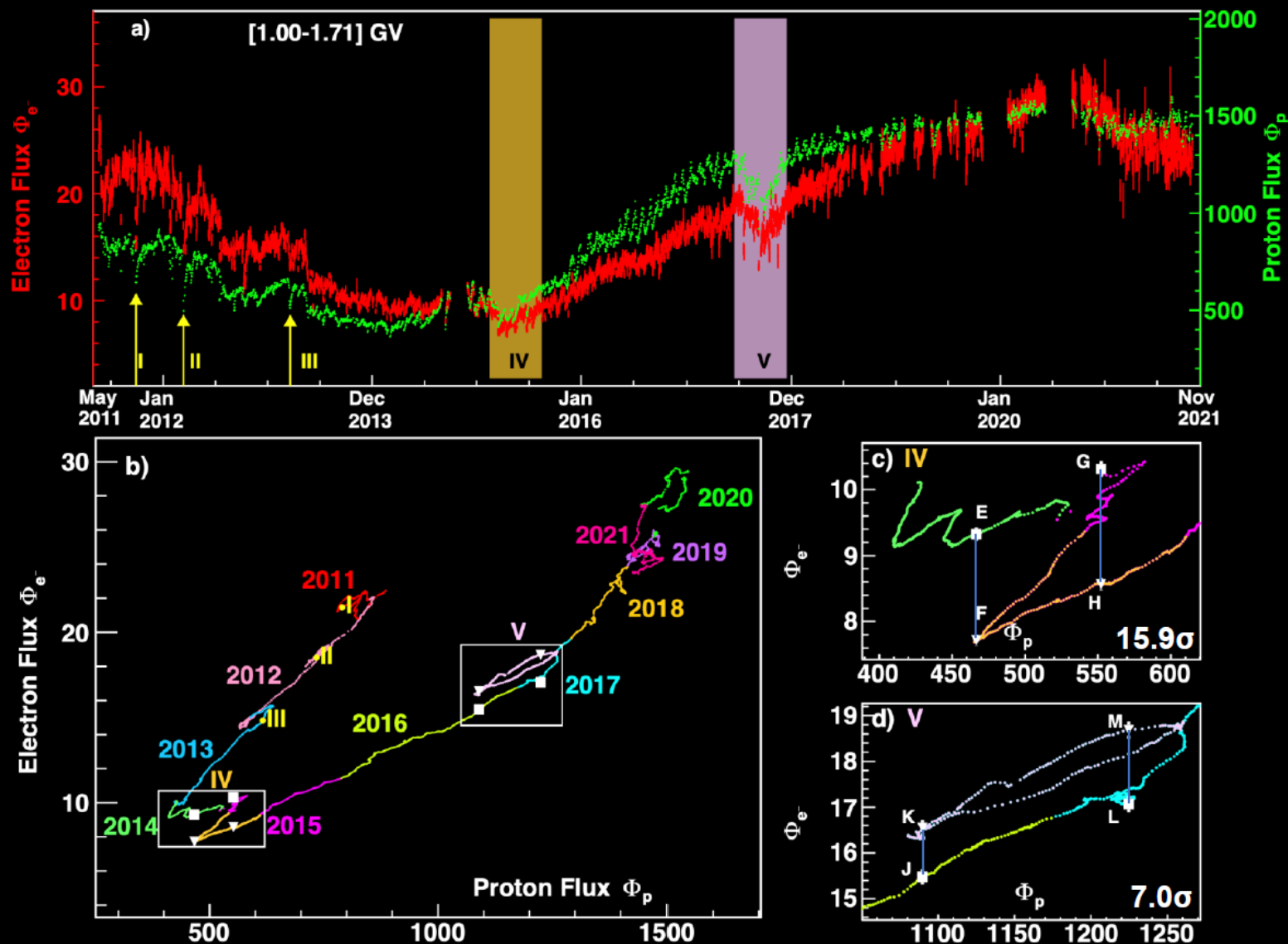
电子、质子流强的时滞结构

在8.5 GV以下，可以在6 σ 显著度以上观测到两种带电粒子流强的时滞结构



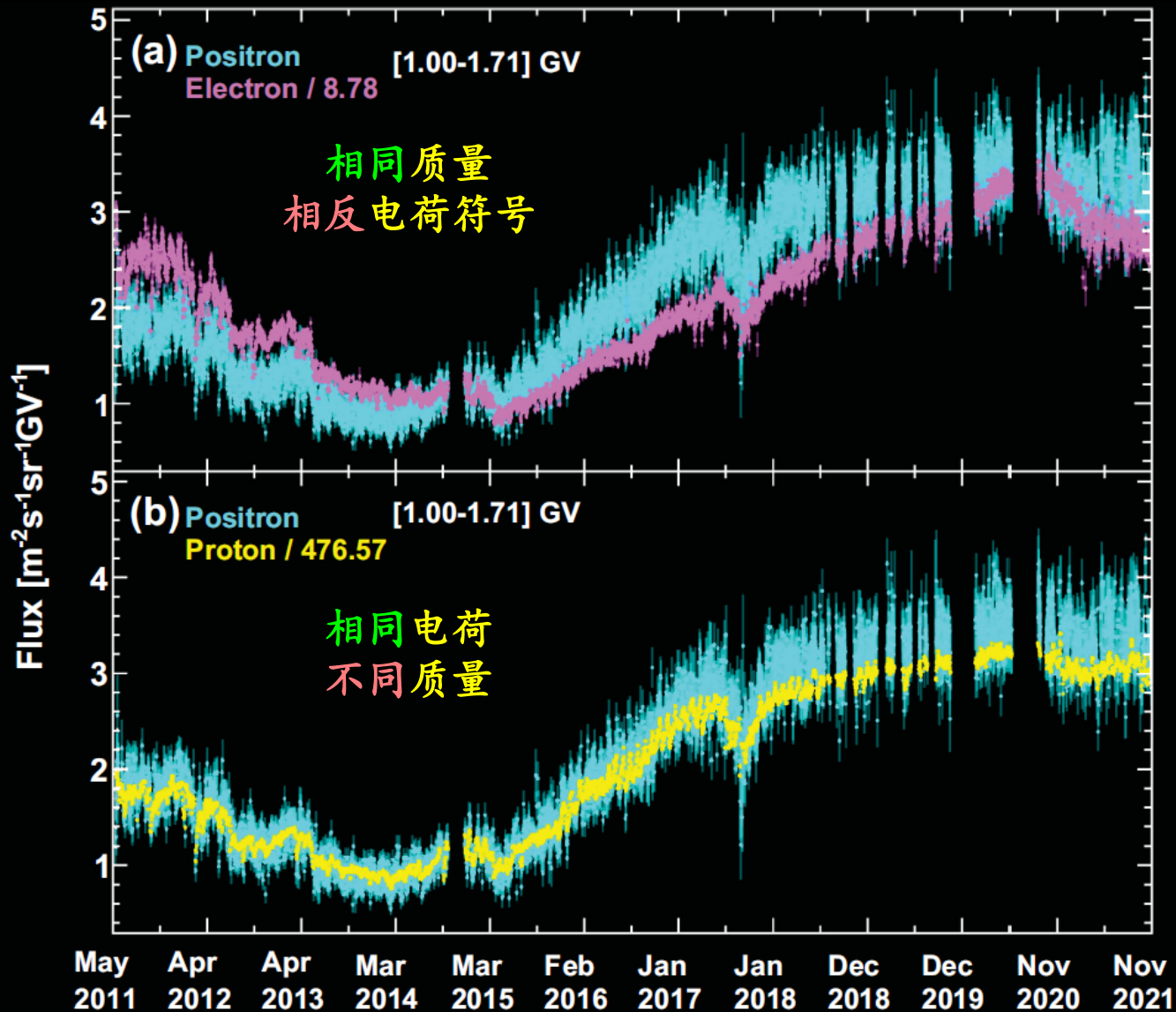
电子-质子流强的时滞结构

电子-质子流强有着显著的时滞结构，且时滞区间与流强短期显著变化的阶段相关



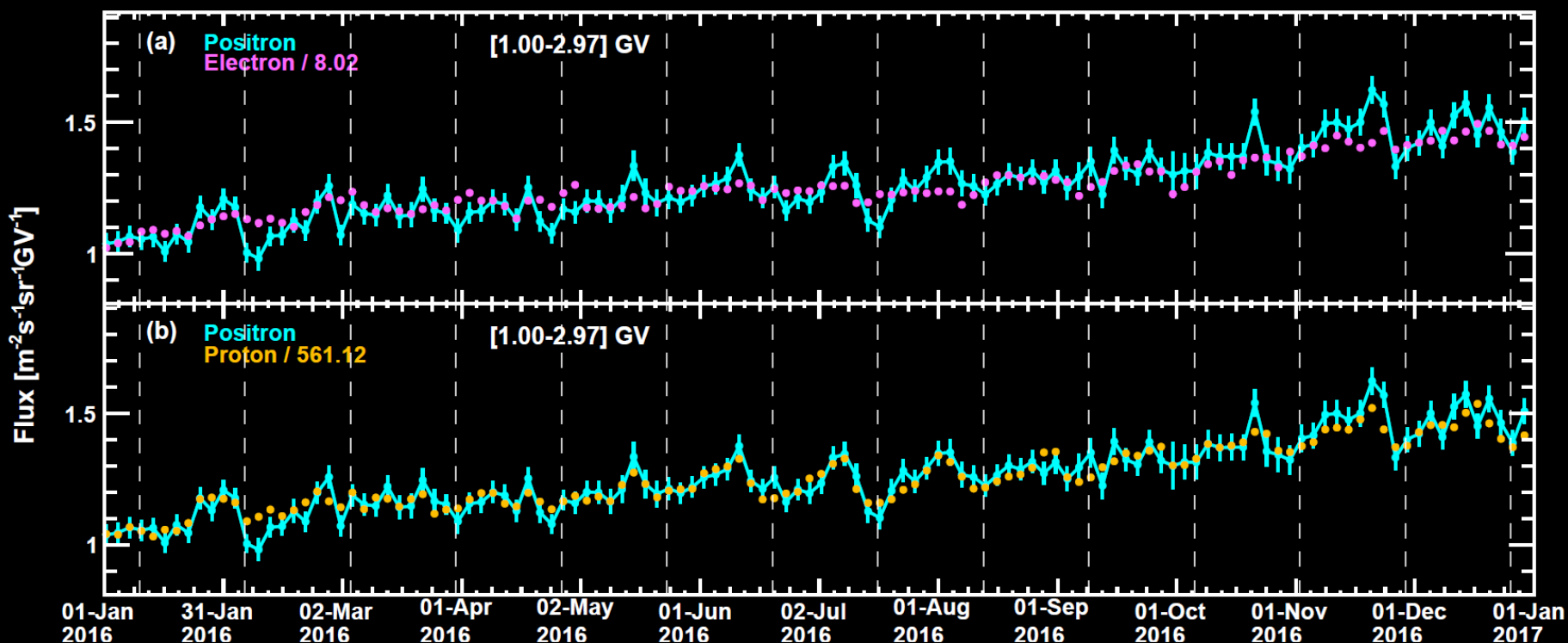
AMS正电子、电子、质子流强的长期时间结构

长期来看，正电子、电子流强有着截然不同的时间结构
而正电子、质子的长期时间结构相似

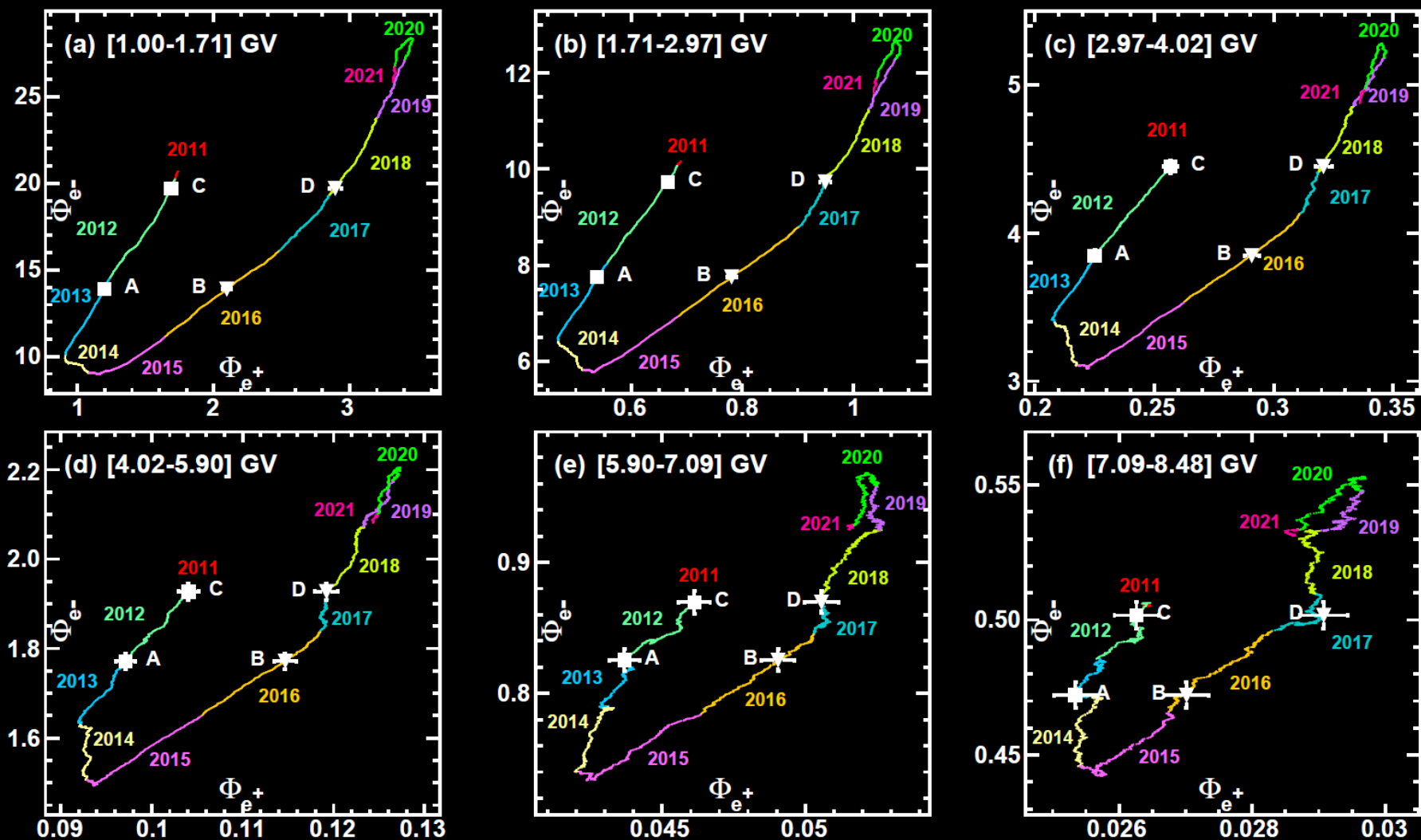


正电子、电子、质子流强短期时间结构

相反电荷符号的正电子、电子，有着不同结构
相同电荷符号的正电子、质子，有着相似结构

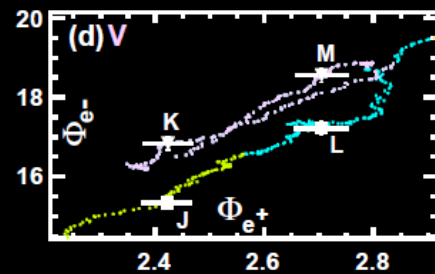
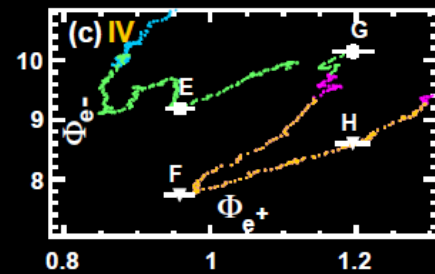
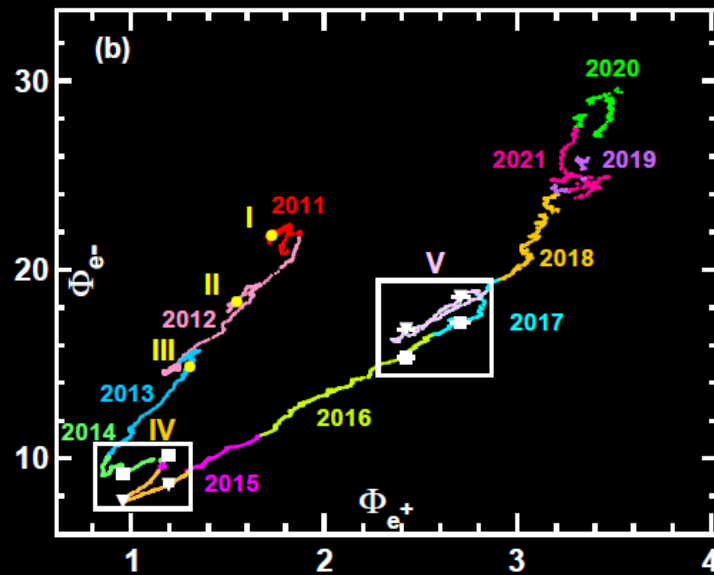
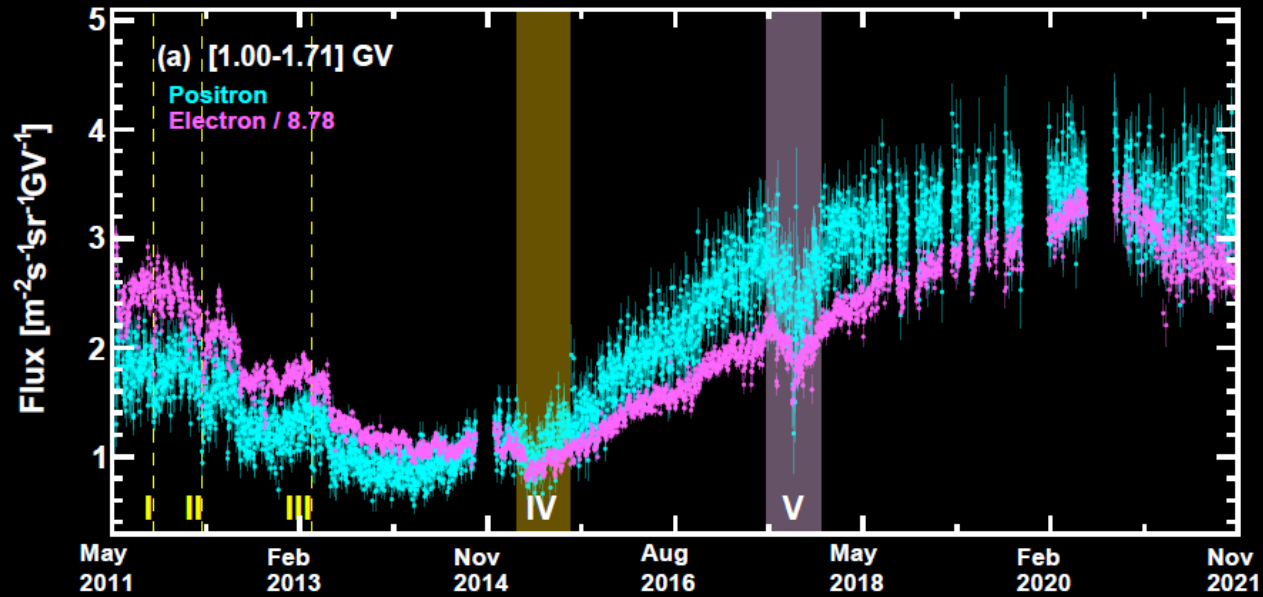


正电子、电子流强的时滞结构



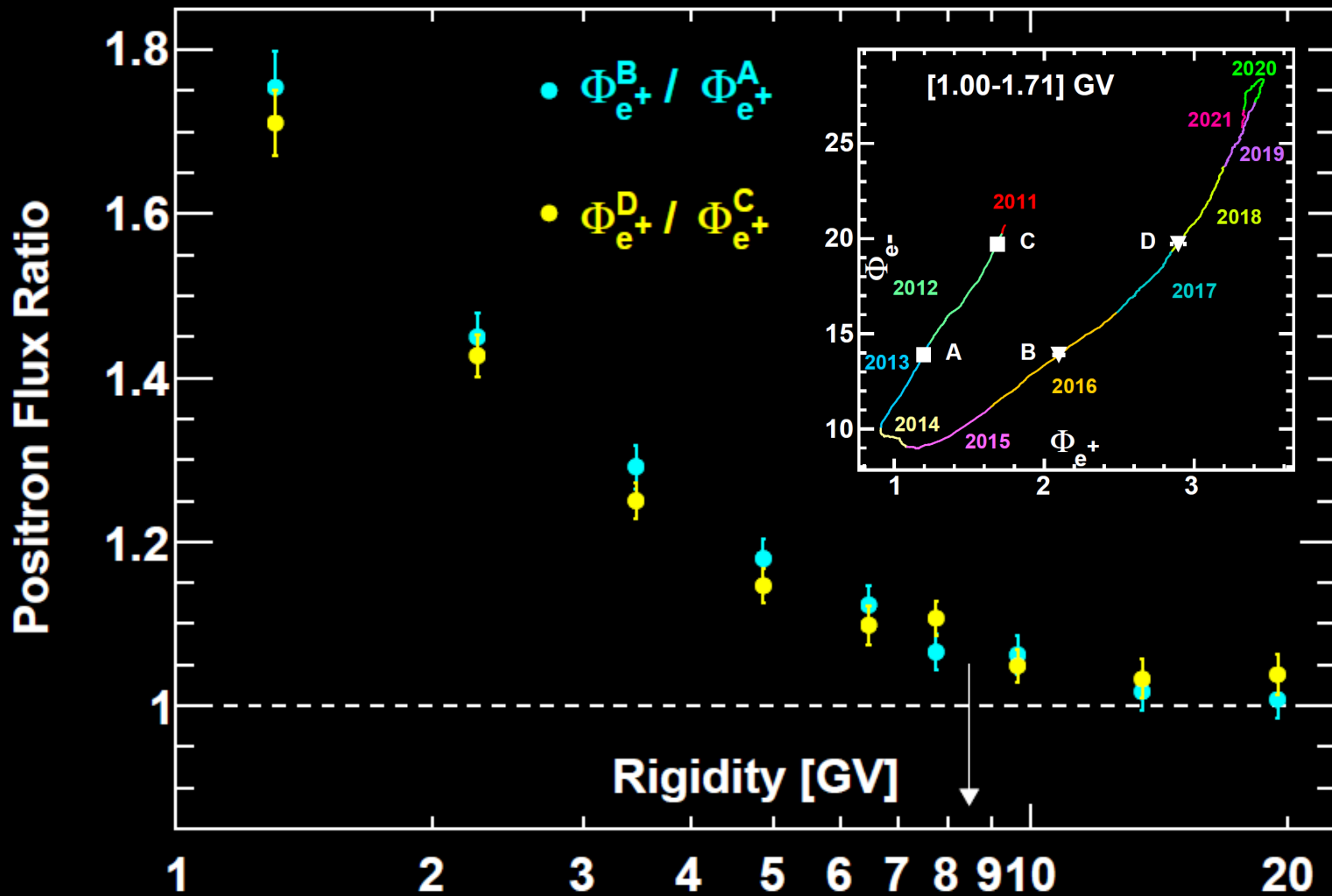
正电子-电子流强的时滞结构

正电子-电子流强有着显著的时滞结构，且时滞区间与流强短期显著变化的阶段相关



正电子、电子流强的时滞结构

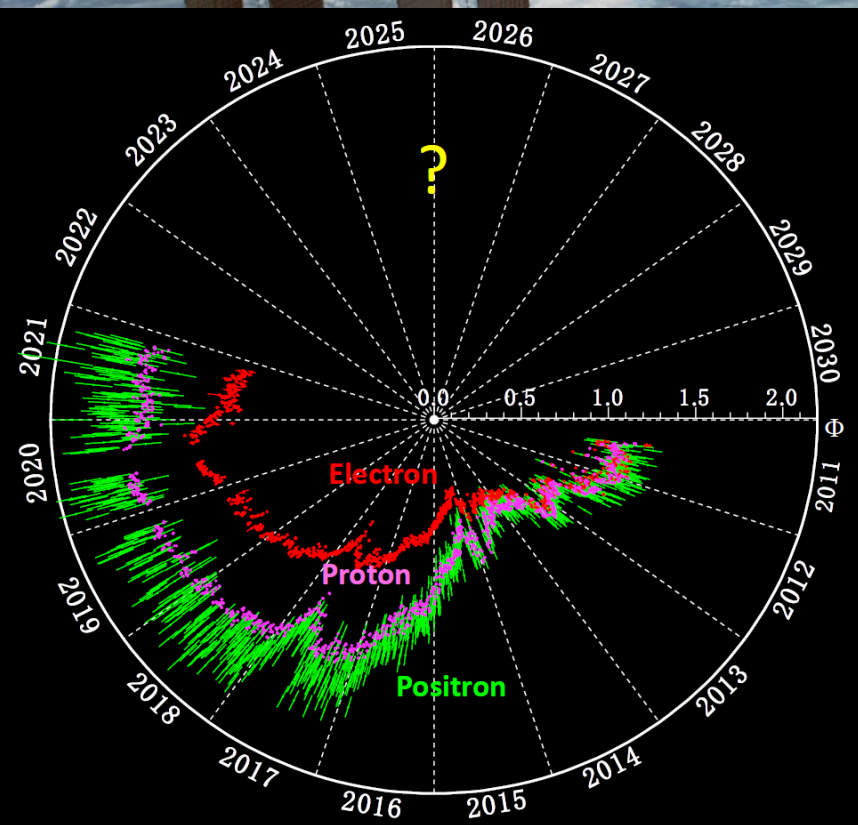
在8.5 GV以下，可以在 5σ 显著度以上观测到两种带电粒子流强的时滞结构



AMS宇宙线低能电子流强时间结构小结

- AMS合作组发表关于宇宙线电子时间结构结果的PRL文章 PRL130, 161001 (2023); 本篇文章被选为Editors' Suggestion, Featured in Physics, 并入选APS Physics Viewpoint
- 结果发现长期来看, 不同电荷符号的电子与质子的长期时间结构显著不同, 电子、质子流强短期时间结构存在显著差异; 小波(Wavelet)分析可得到不同年份阶段, 电子与质子27天的周期调制性强弱对比不同; 在8.5 GV以下, 可以在 6σ 显著度以上观测到两种带电粒子流强的时滞结构
- 不同电荷符号的电子、正电子流强也有着截然不同的时间结构; 电子-正电子流强有着显著的时滞结构, 且时滞区间与流强短期显著变化的阶段相关

AMS-02将在国际空间站上持续运行至**2030年**，届时将覆盖两个完整的太阳周期，为太阳调制，太阳系内宇宙线传播以及近地轨道载人航天环境提供**独特、精确、关键**的信息



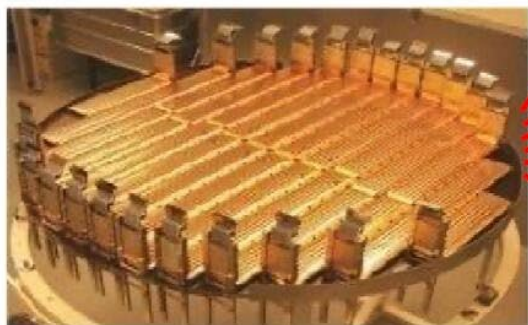
Backup

AMS-02: 唯一的太空TeV精密磁谱仪

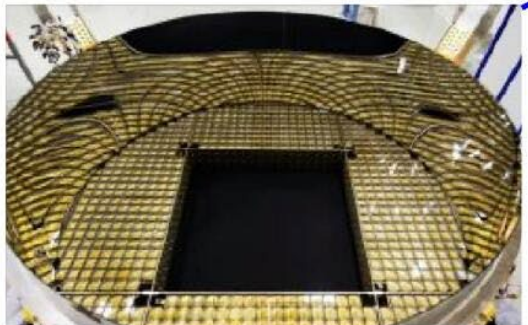
穿越辐射探测器(TRD)
识别 e^+, e^-



硅径迹室(Silicon Tracker)
Z, P



环向成像切伦科夫探测器
(RICH) Z, E



电磁量能器(ECAL) E of e^+, e^-



上层飞行时间探测器(Upper TOF) Z, E



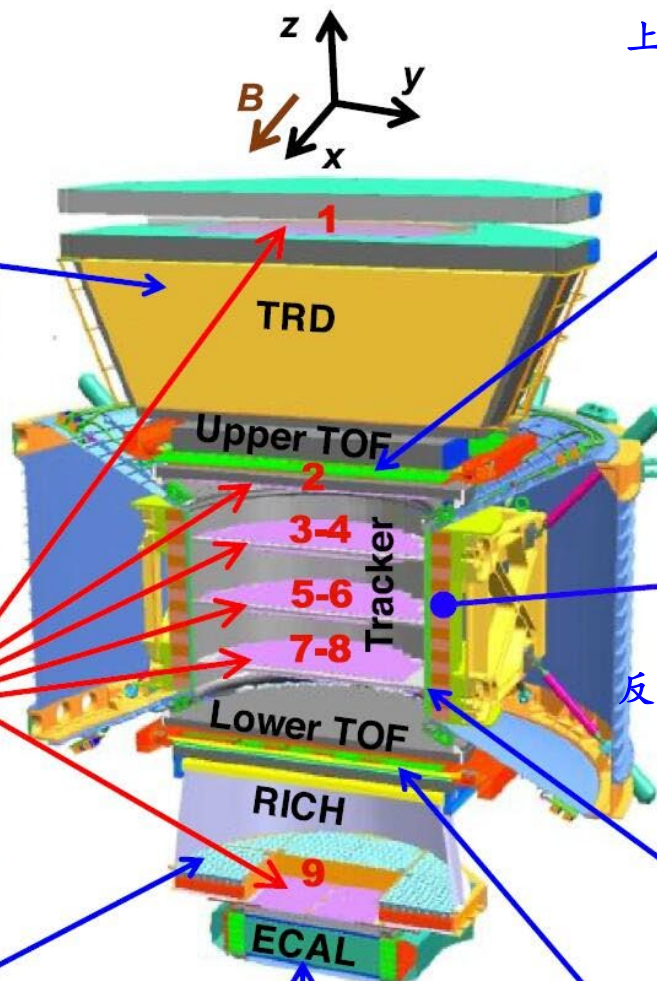
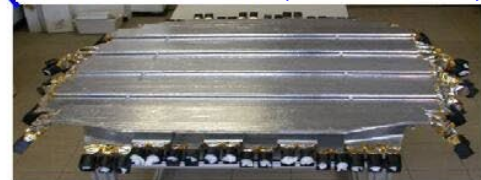
永磁体(Magnet) $\pm Z, P$



反符合计数器(ACC) 排除侧面入射粒子

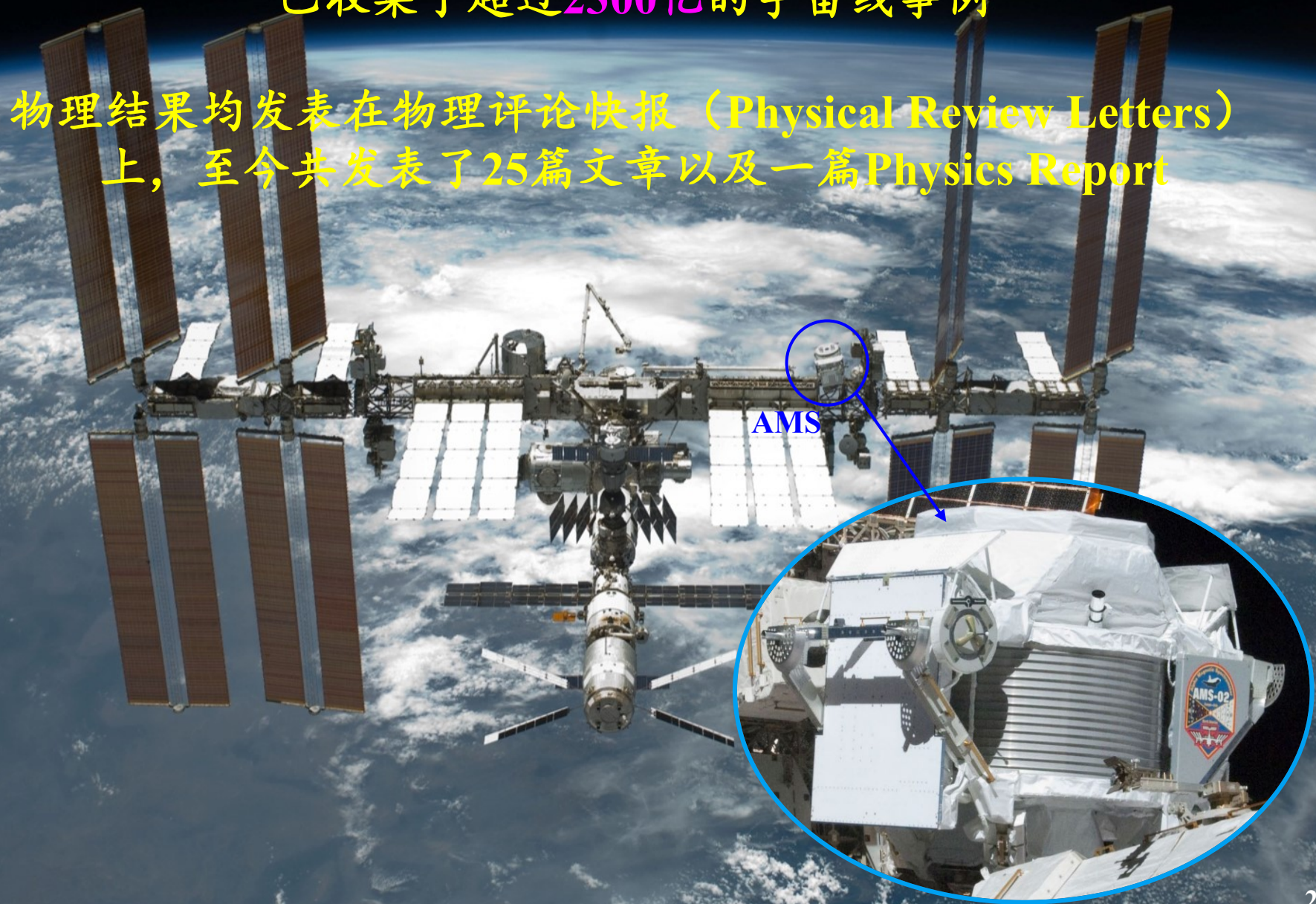


下层飞行时间探测器(Lower TOF) Z, E

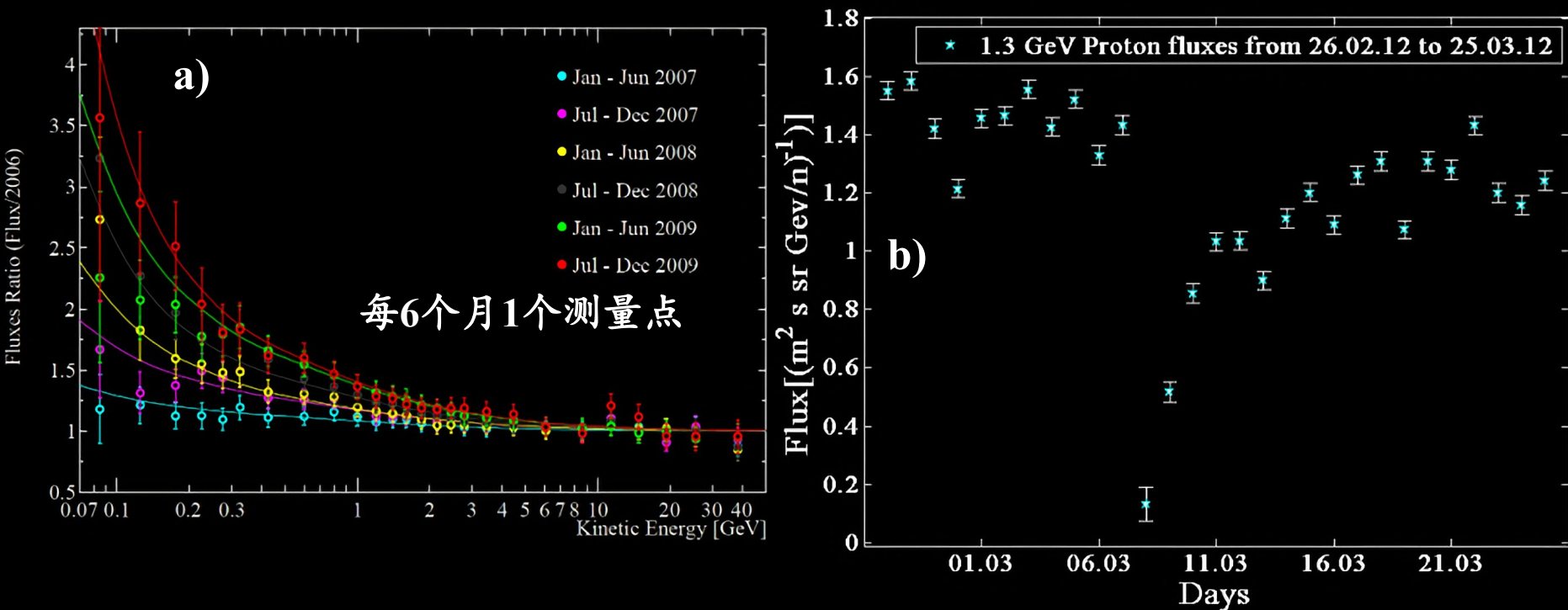


AMS-02于2011年5月安装在国际空间站，运行至今将近13年
已收集了超过2300亿的宇宙线事例

物理结果均发表在物理评论快报（Physical Review Letters）
上，至今共发表了25篇文章以及一篇Physics Report



PAMELA实验的相关结果



a) PAMELA测量的电子能谱随时间的变化(2007-2009)

b) PAMELA观测到2012年的一次质子流强短期结构

更多关于太阳调制性质的细节需要对带电宇宙线进行长时间的观测才能给出，且更高精度的实验测量将对太阳短期剧烈活动的观测更加有力。

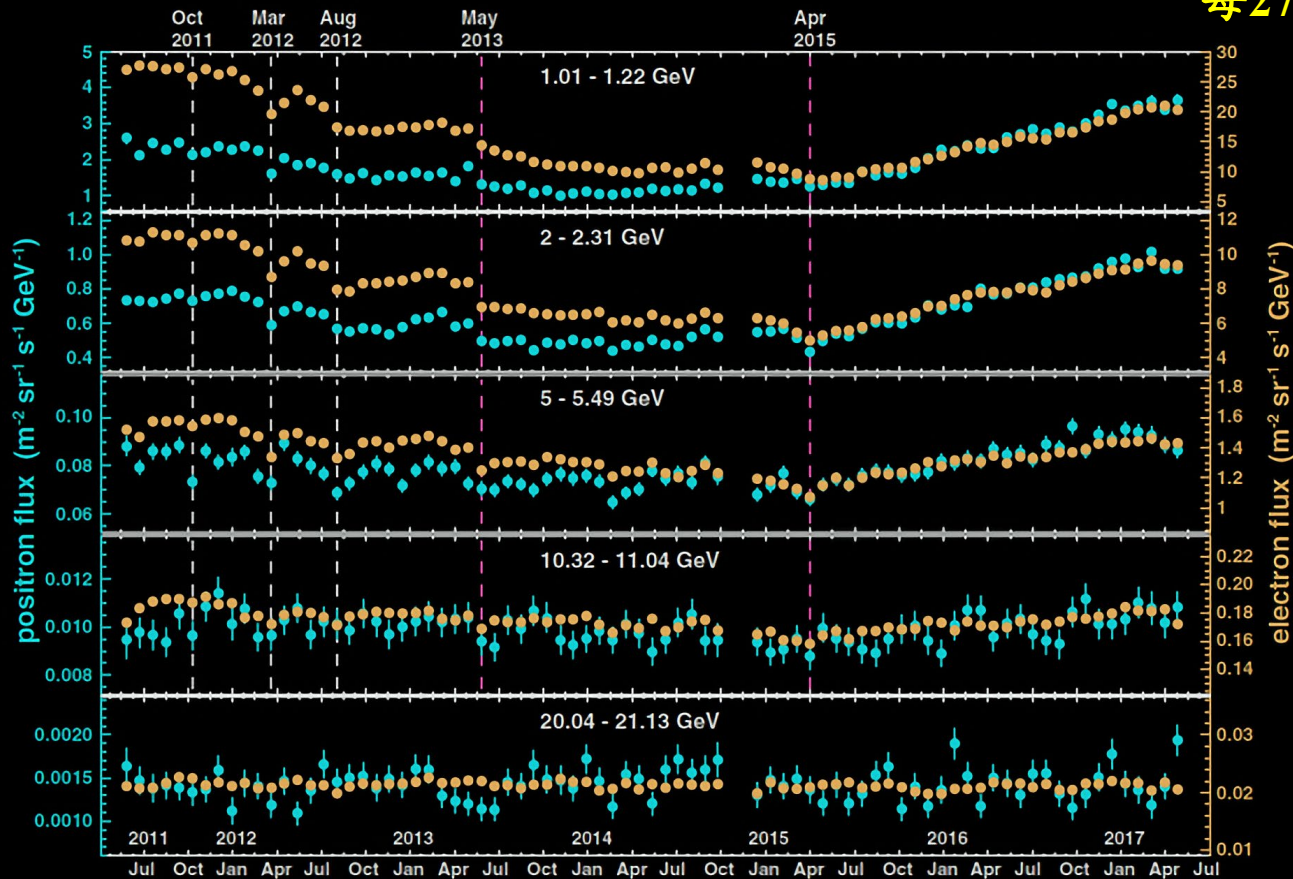
AMS合作组于2018年发表的宇宙线电子/正电子流强的时间结构测量的结果

PHYSICAL REVIEW LETTERS 121, 051102 (2018)

Editors' Suggestion

Observation of Complex Time Structures in the Cosmic-Ray Electron and Positron Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station

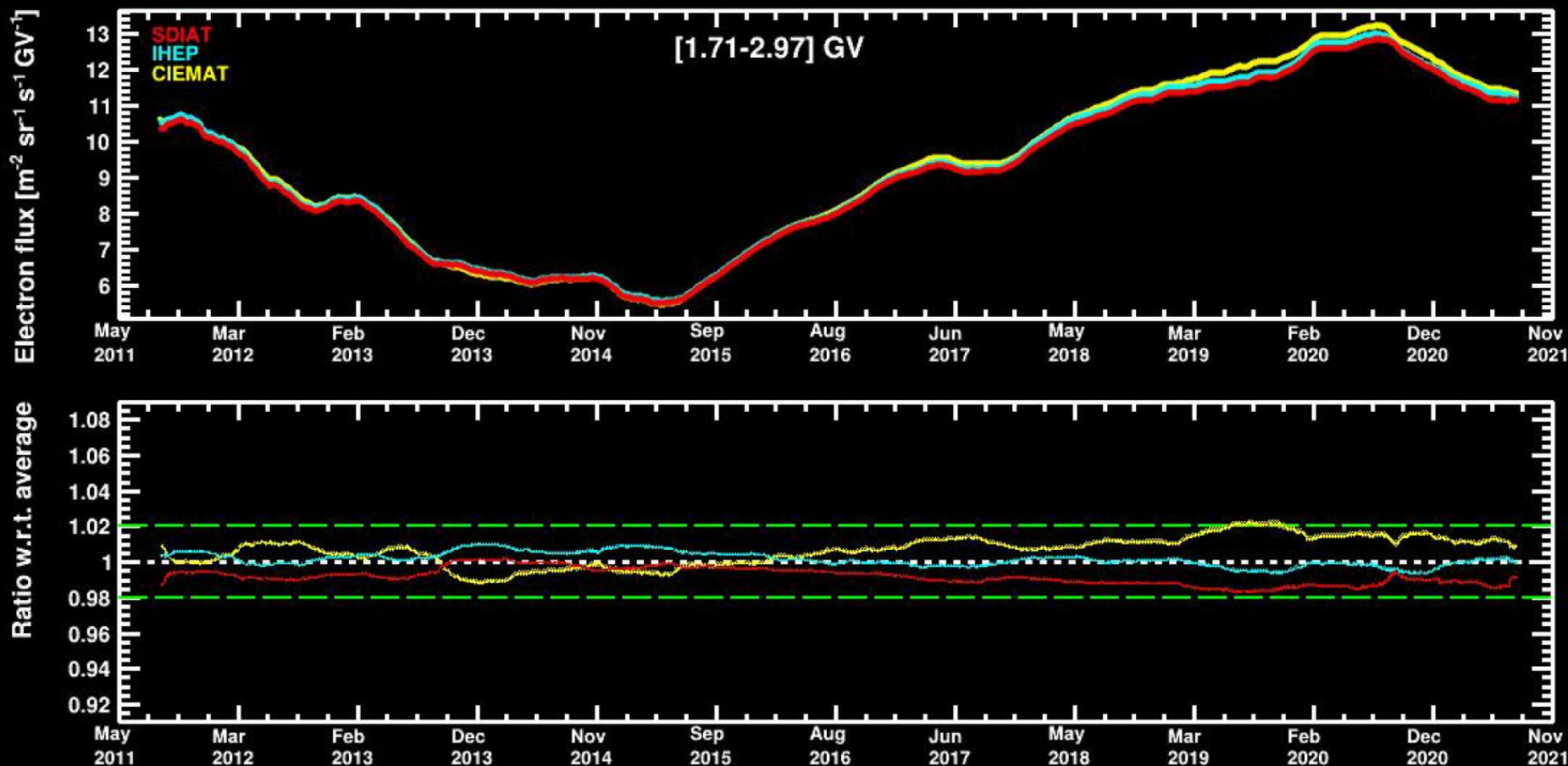
每27天一个测量点



该结果公布了从2011年5月至2017年5月共79个太阳周期(Bartels rotation)内1-50 GeV电子与正电子流强随时间的变化。该结果首次展现了宇宙线不同电荷符号的轻子在太阳调制影响下的不同时间结构。

但想要观测短期的太阳调制，需要更精细时间的能谱测量结果。

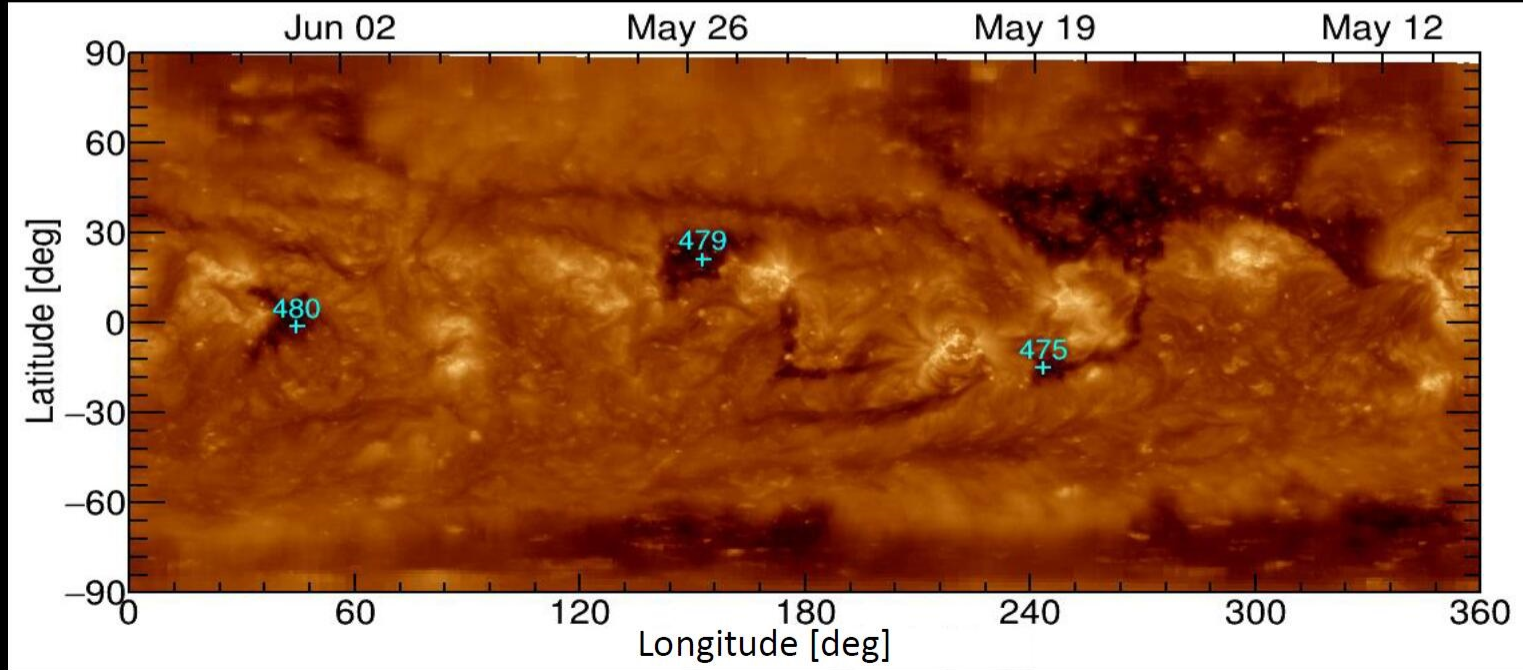
电子流强测量结果作为合作组发表文章的独立分析结果



Cosmic Ray Periodicities and the Rotation of the Sun

Coronal Holes are sources of high speed solar wind affecting Earth. The rotation of the Sun causes multiple periods in the flux:

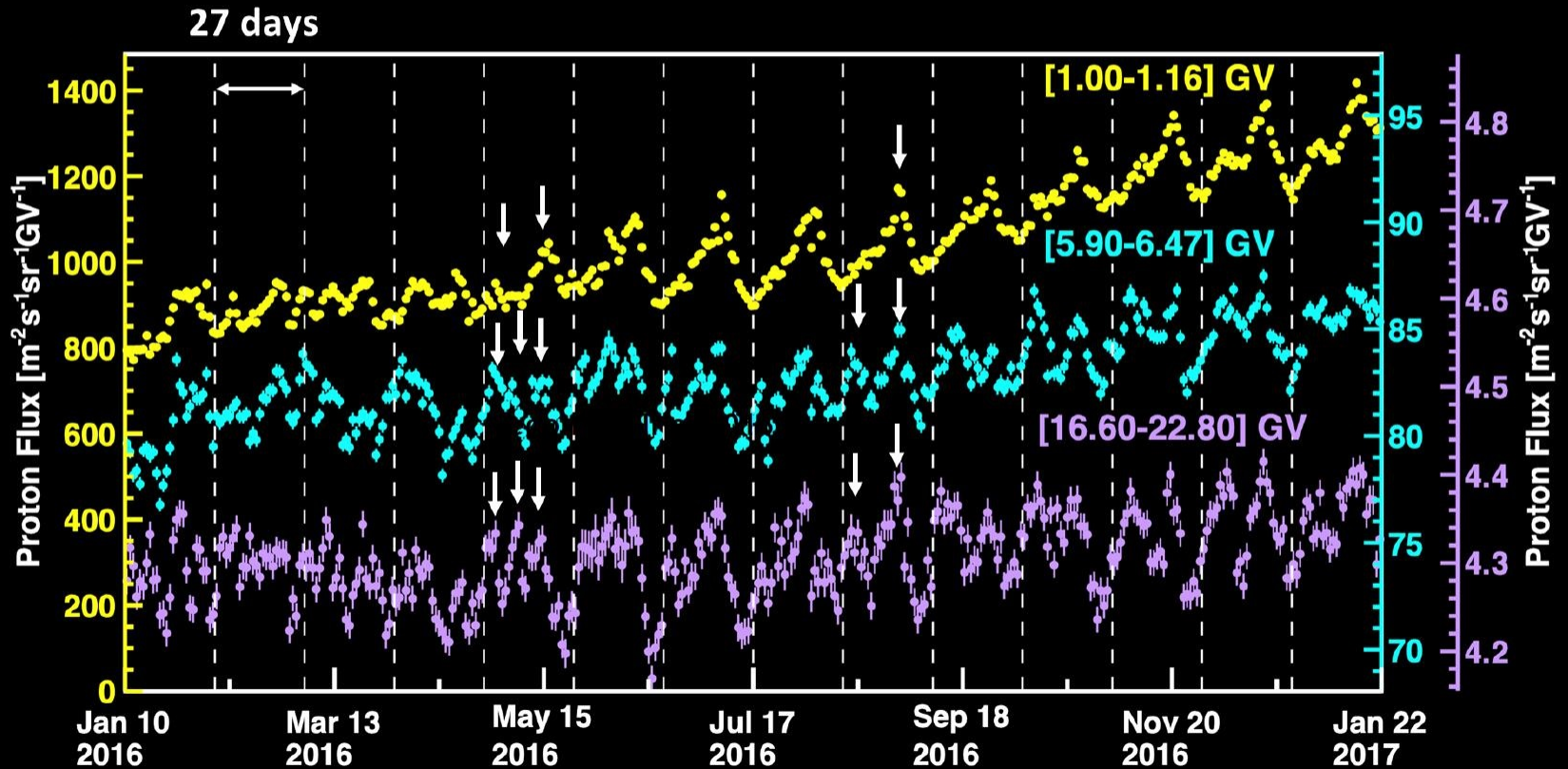
- 0 coronal hole: —→ No apparent periods
- 1 coronal hole —→ 27-day period (a Bartels rotation)
- 2 coronal holes separated by 180° —→ 13.5-day period
- 3 coronal holes separated by 120° —→ 9-day period



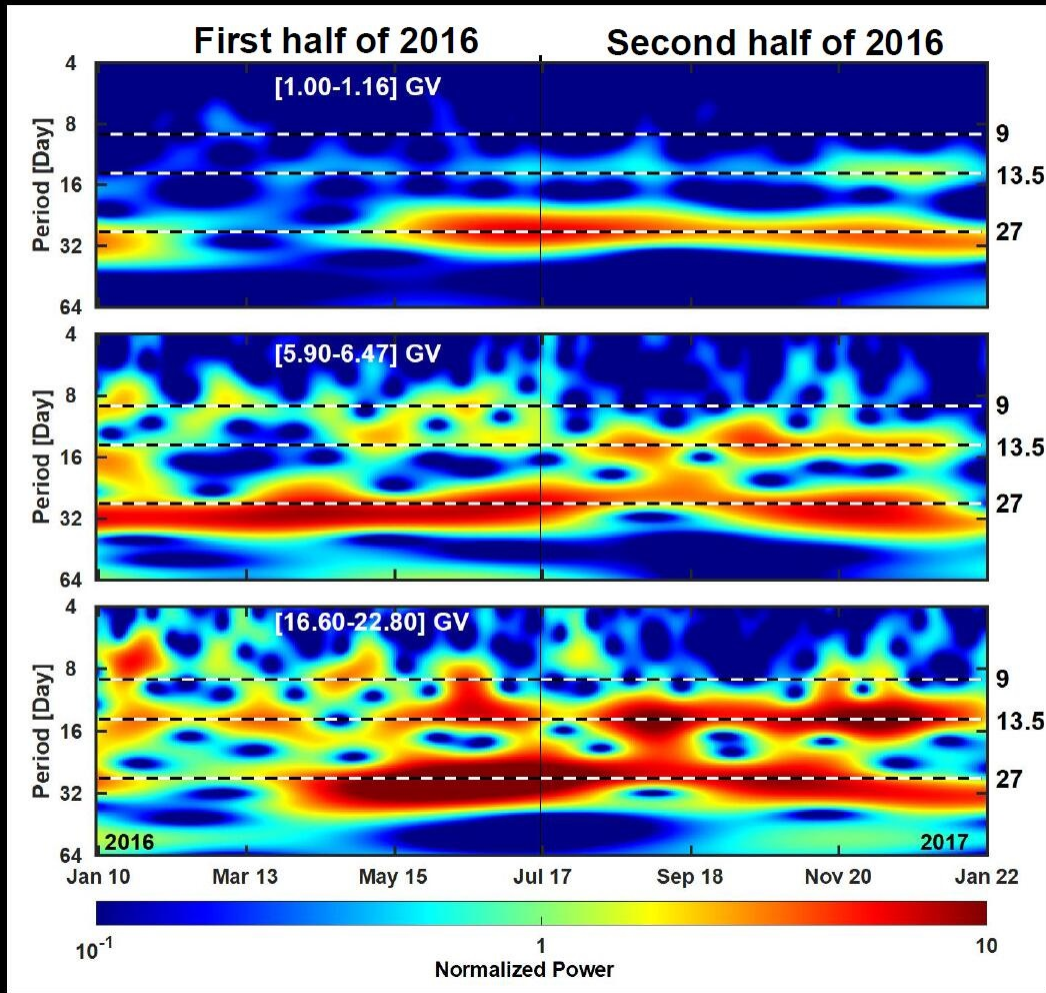
(May 10, 2016-Jun 06, 2016) Image taken by Solar Dynamics Observatory (SDO), NASA

Recurrent Proton Flux Variation in 2016

Double-peak and triple-peak structures are visible in different Bartels rotations



Wavelet Analysis of Proton Fluxes in 2016



To study the recurrent time variations in the daily proton fluxes, a **wavelet time-frequency** technique was used.

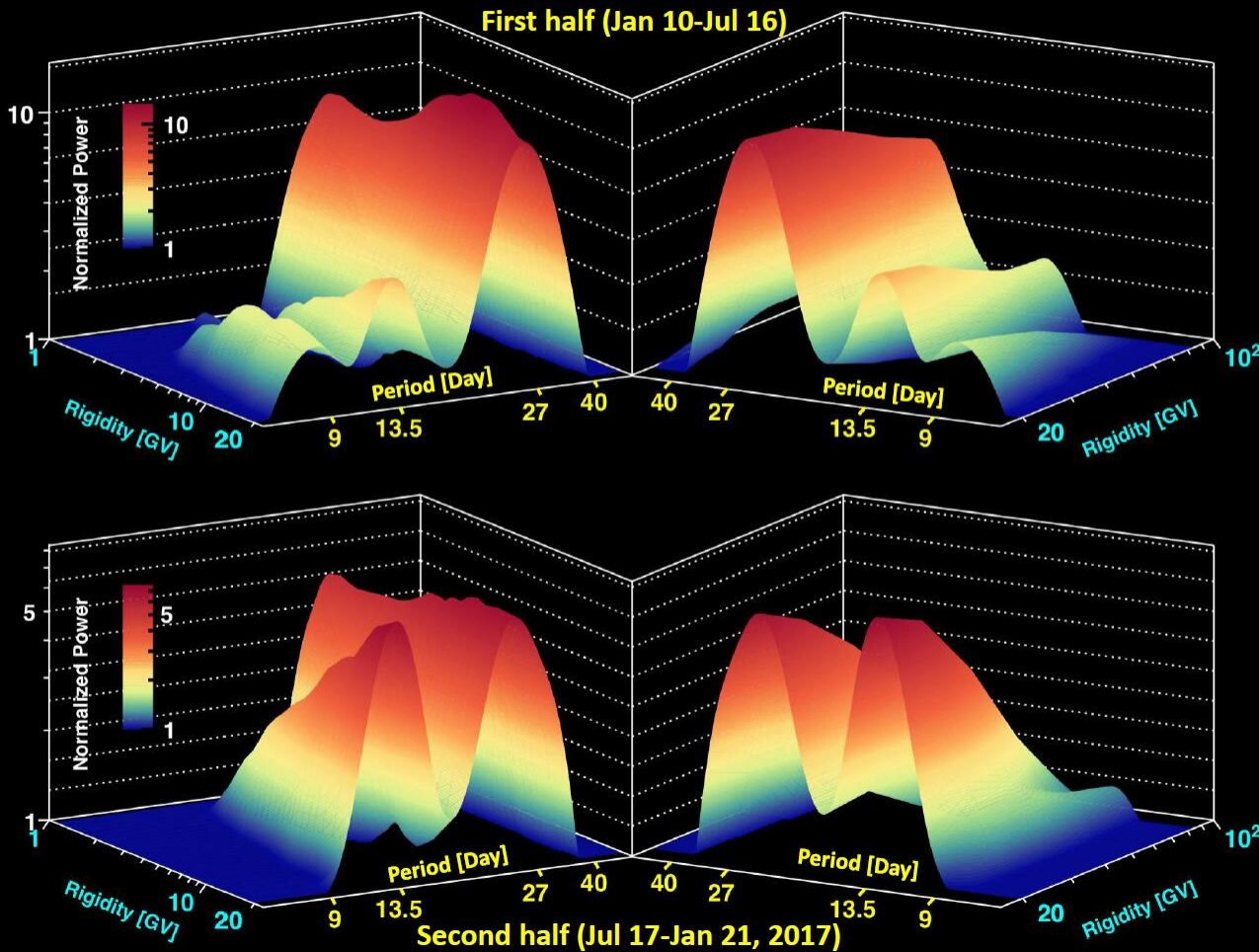
To show the strength of the periodicity, **the normalized power** is defined by the power divided by **the variance** of the time series.

Periods of 9, 13.5, and 27 days are observed in 2016.

The strength of all three periodicities changes with time and rigidity.

In particular, shorter periods of 9 and 13.5 days, when present, are more visible at 6 GV and 20 GV compared to 1 GV.

Periodicities of Daily Proton Fluxes in 2016

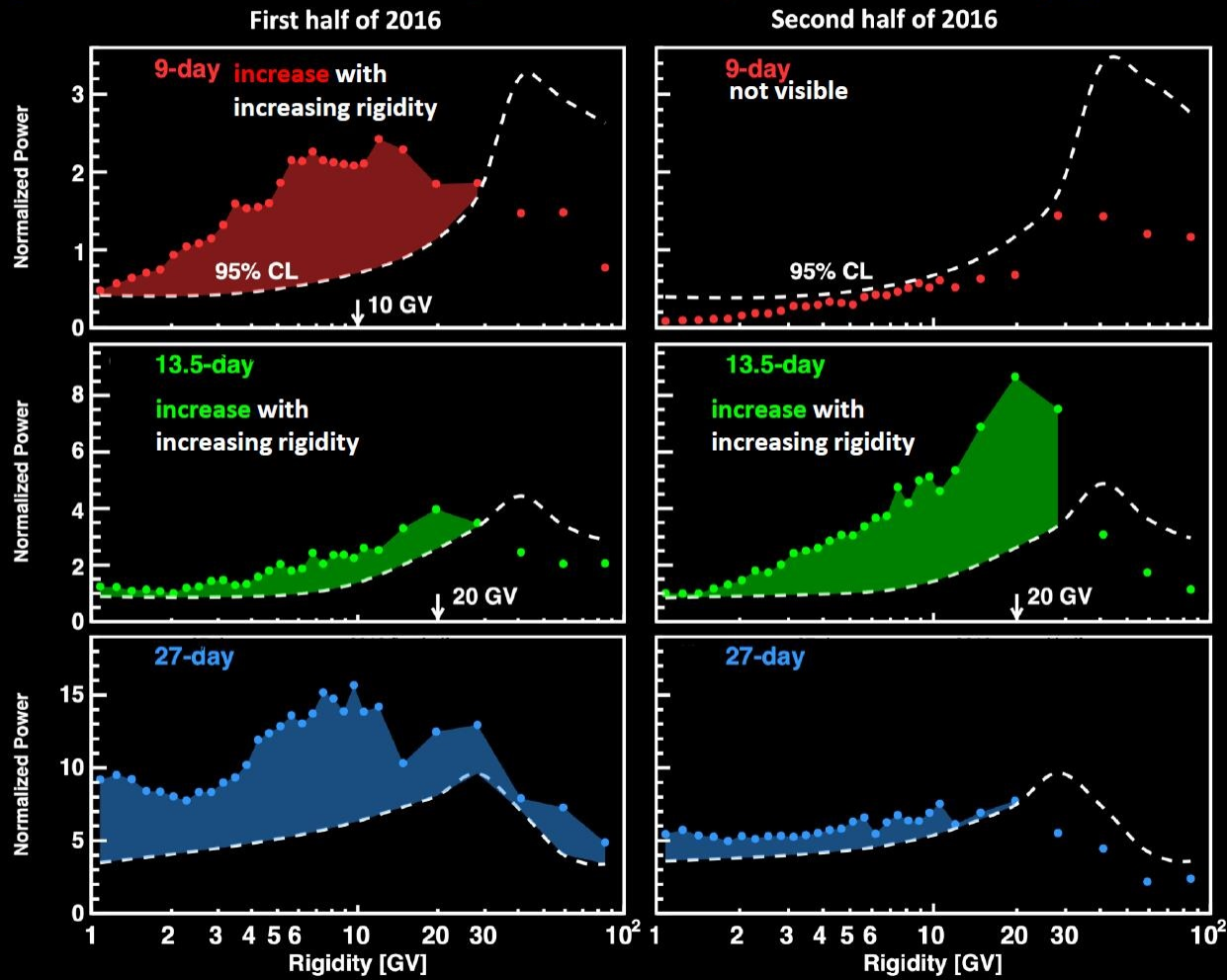


Unexpectedly, the strength of **9-day and 13.5-day periodicities** increases with increasing rigidity up to **~10 GV** and **~20 GV**, respectively. Then the strength decreases with increasing rigidity up to **100 GV**.

Thus, the AMS results do not support the general conclusion that the strength of the periodicities always decreases with increasing rigidity

Phys. Rev. Lett. 127, 271102 (2021)

Rigidity Dependence of 9-day, 13.5-day, and 27-day periods of protons



Shaded areas are the rigidity intervals where the periodicity is prominent