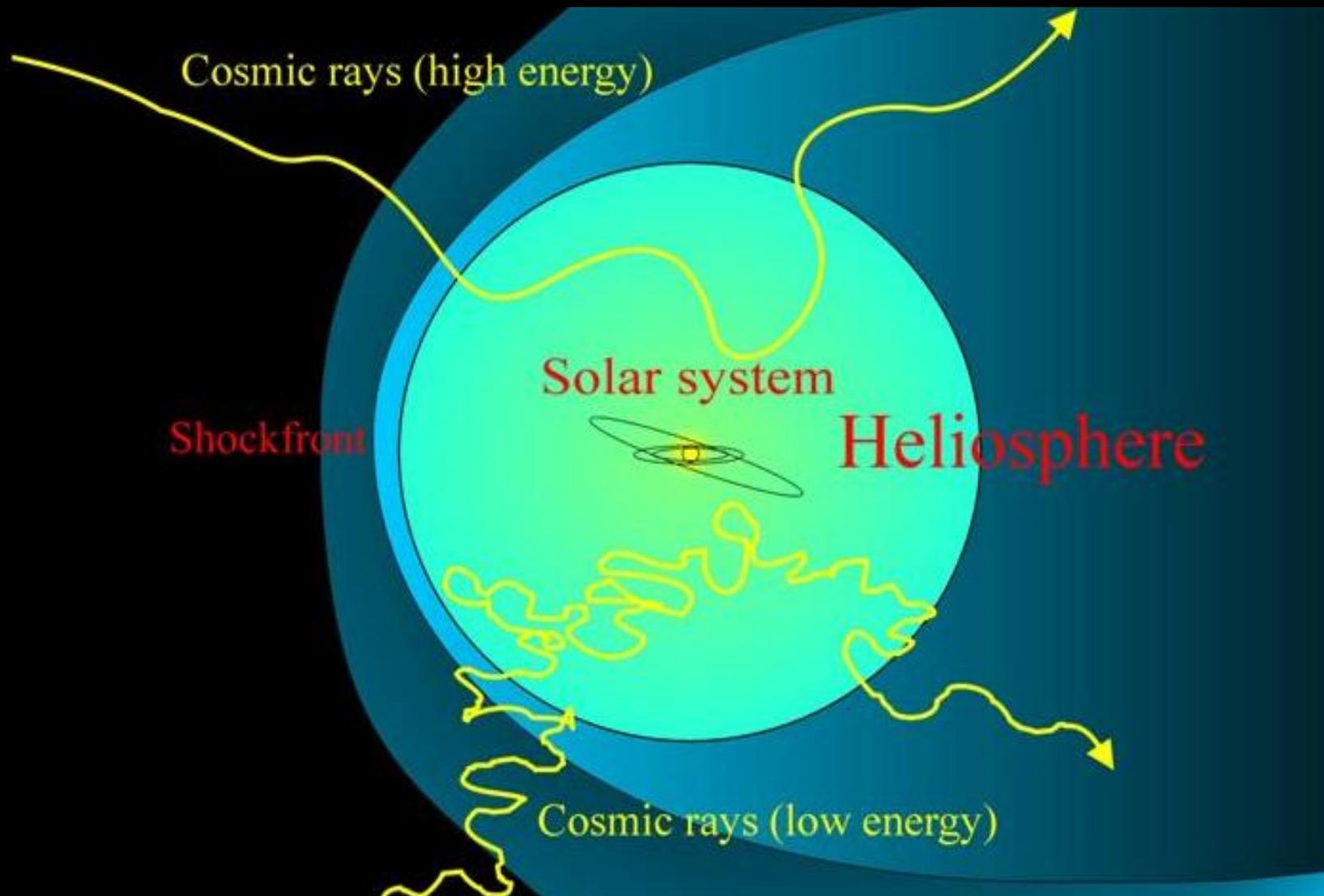
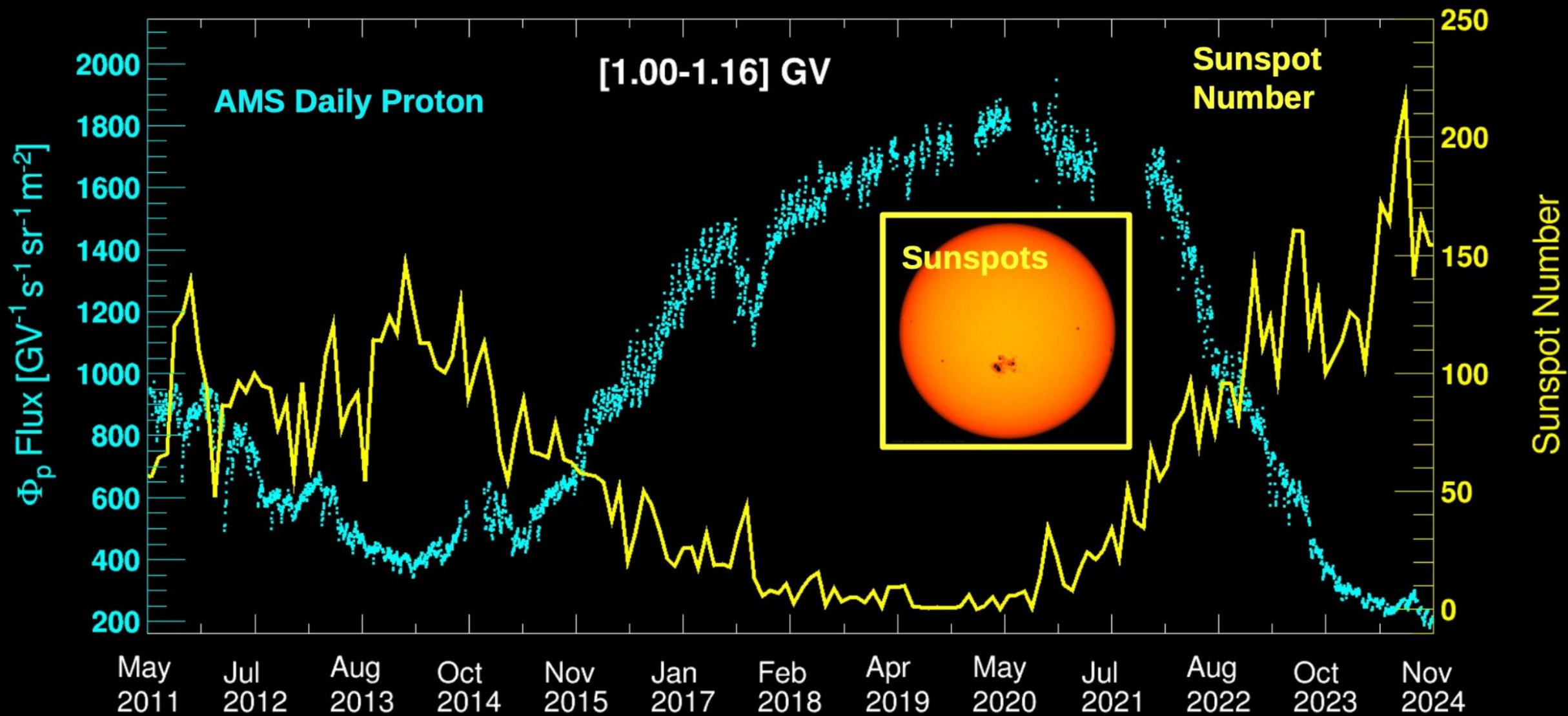


# 太阳磁极影响宇宙线能谱的延时效应 及用地面中子探测器测量宇宙线能谱



# 1.1 宇宙线的太阳调制

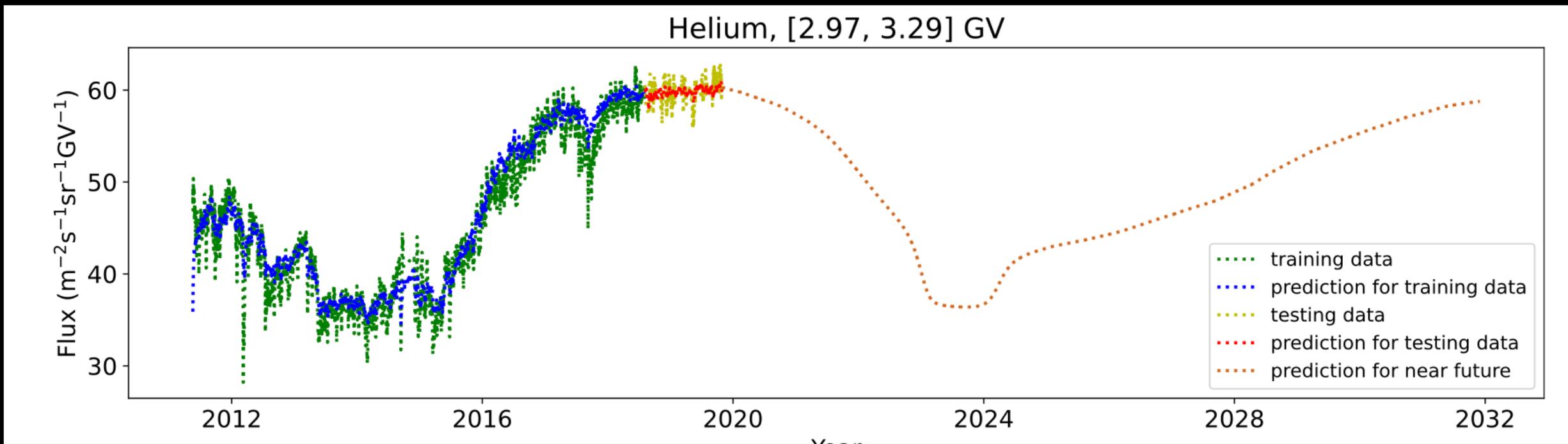
宇宙线流强与太阳活动强度成反比：



## 1.2 太阳活动参数预测宇宙线

原则上，可以用太阳活动参数预测宇宙线。实际上，预测效果不理想，主要由于以下问题：

- 太阳活动参数（共5个）不够多。 ---> 寻找新的参数
- AMS直接测量宇宙线能谱不连续，影响模型。 ---> 通过间接测量方法计算宇宙线能谱

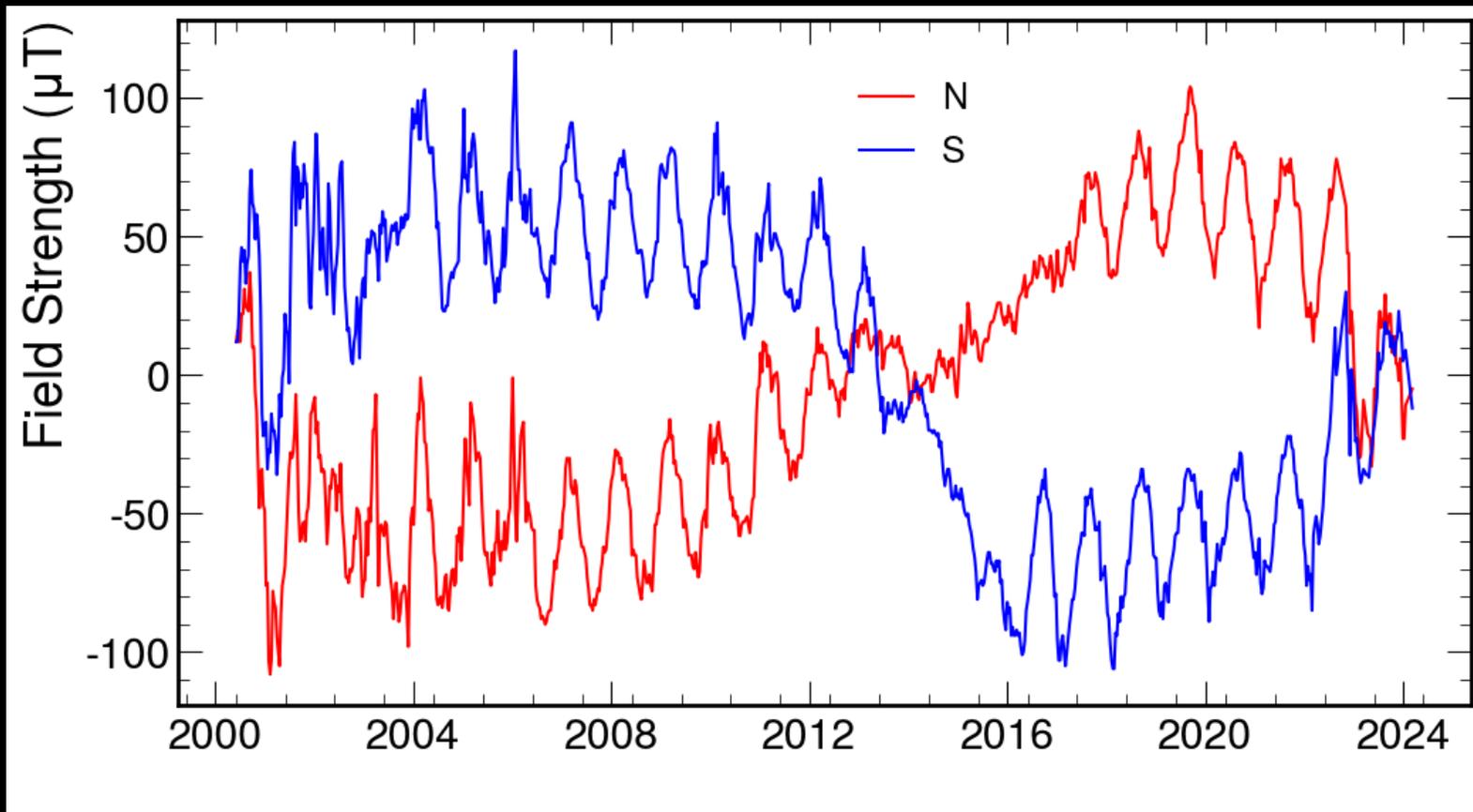


Y.-L.Du, X.-J. Song and X. Luo, *Astrophysical Journal Letters*, 978:L36 (7pp), 2025 January 10

## 2.1 新的太阳活动参数-太阳两极磁场强度

Wilcox Solar Observatory (WSO天文台) 记录了太阳两极的磁场强度从2000年到2024年的变化。

我们看到的长周期是22年太阳周期，也就是2个太阳调制周期。我们看到的上下震动，是年周期变化，是地球轨道的效应。

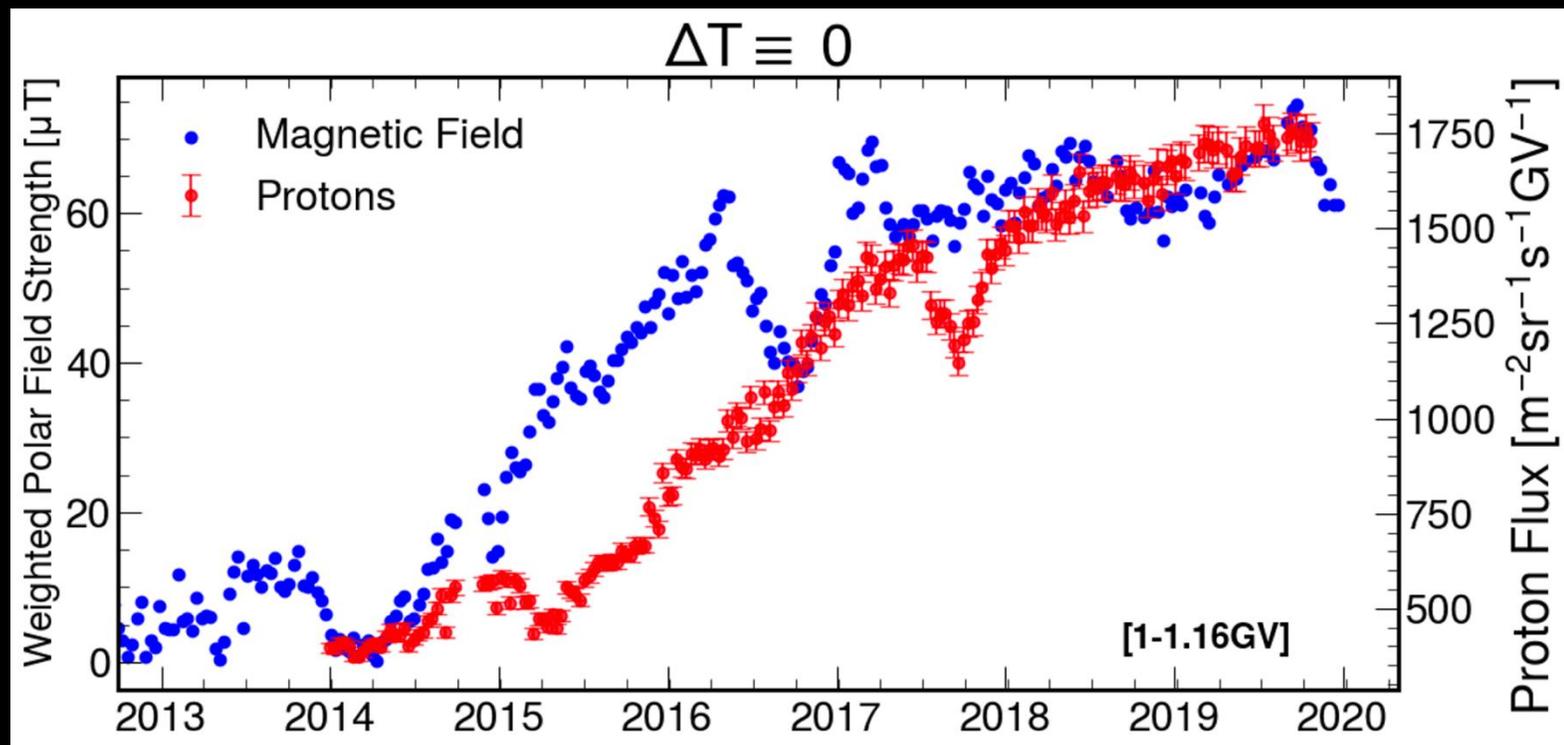


GONG et al, PHYSICAL REVIEW D 111, 083050 (2025)

## 2.2 太阳两极磁场强度与宇宙线质子流强的关联

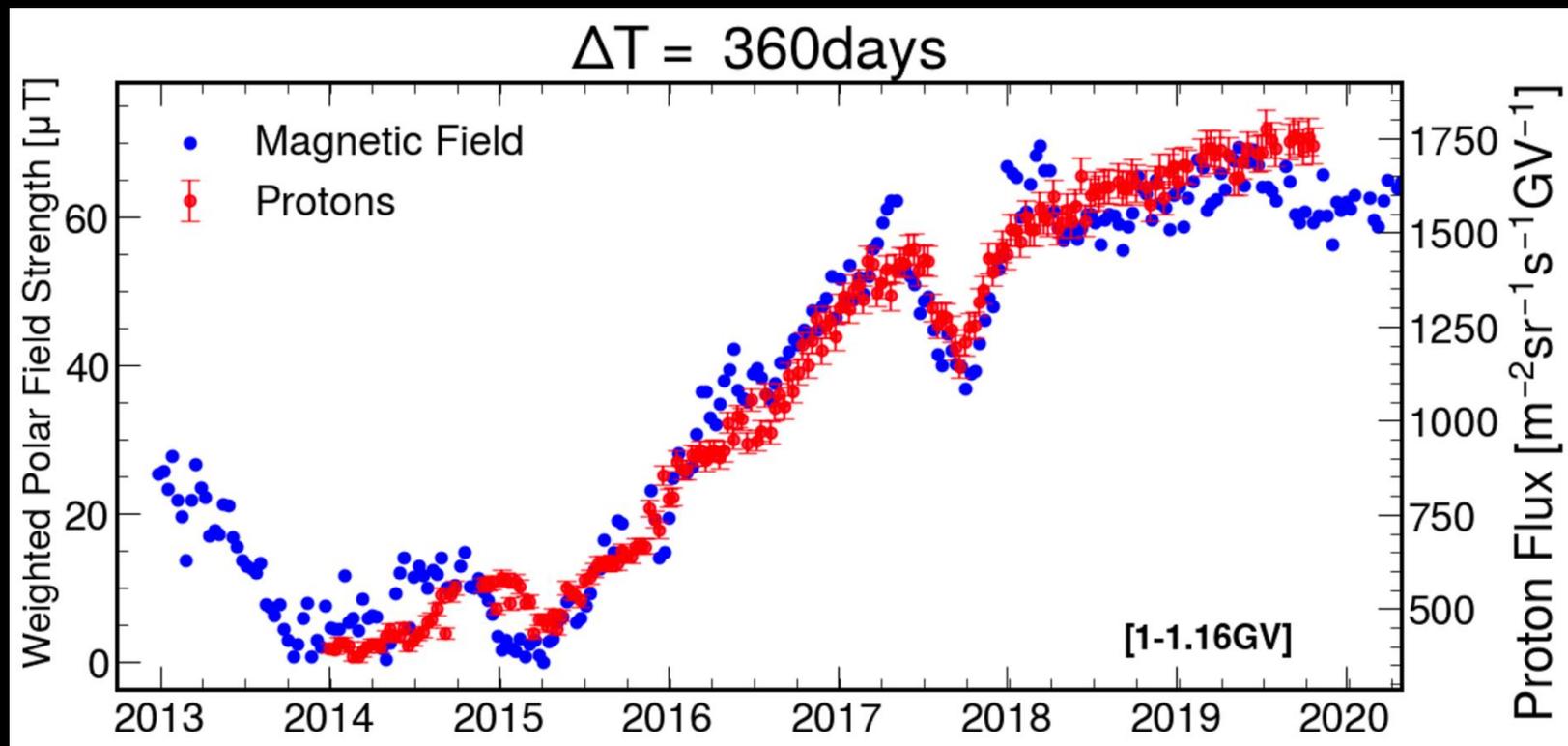
太阳磁场在日冕层对宇宙线的调制应该是两极磁场的平均效应。因此，加权平均这两个磁极的强度可以得到平均效应，如图蓝色点所示。

与红色的AMS测量质子数据点相比，两者有关联。但有一定延时。



## 2.2 太阳两极磁场强度与宇宙线质子流强的关联

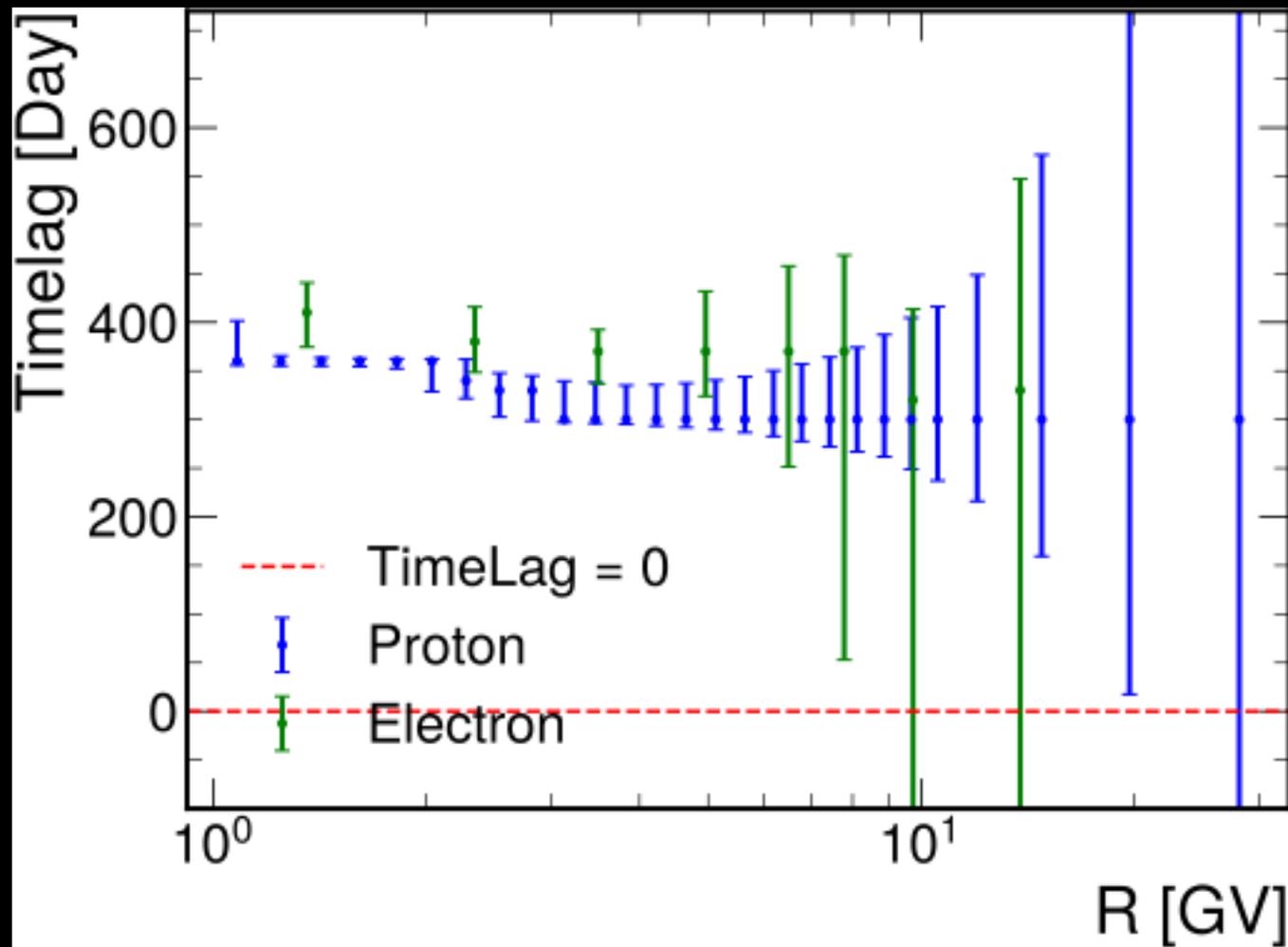
如果，把蓝色的磁场强度往后平移360天，发现与红色的AMS测量质子流强有相关性。



## 2.3 太阳两极磁场强度与宇宙线质子流强的关联-能量依赖

进一步分析25个太阳周期内，延时随能量变化：

- 1) 电子（绿）的延时比质子（蓝）延时大，由于这是太阳极性 $A>0$ 的时期，观察到了电荷漂移效应。
- 2) 质子和电子与太阳两级磁场关联的延时都是能量依赖的。



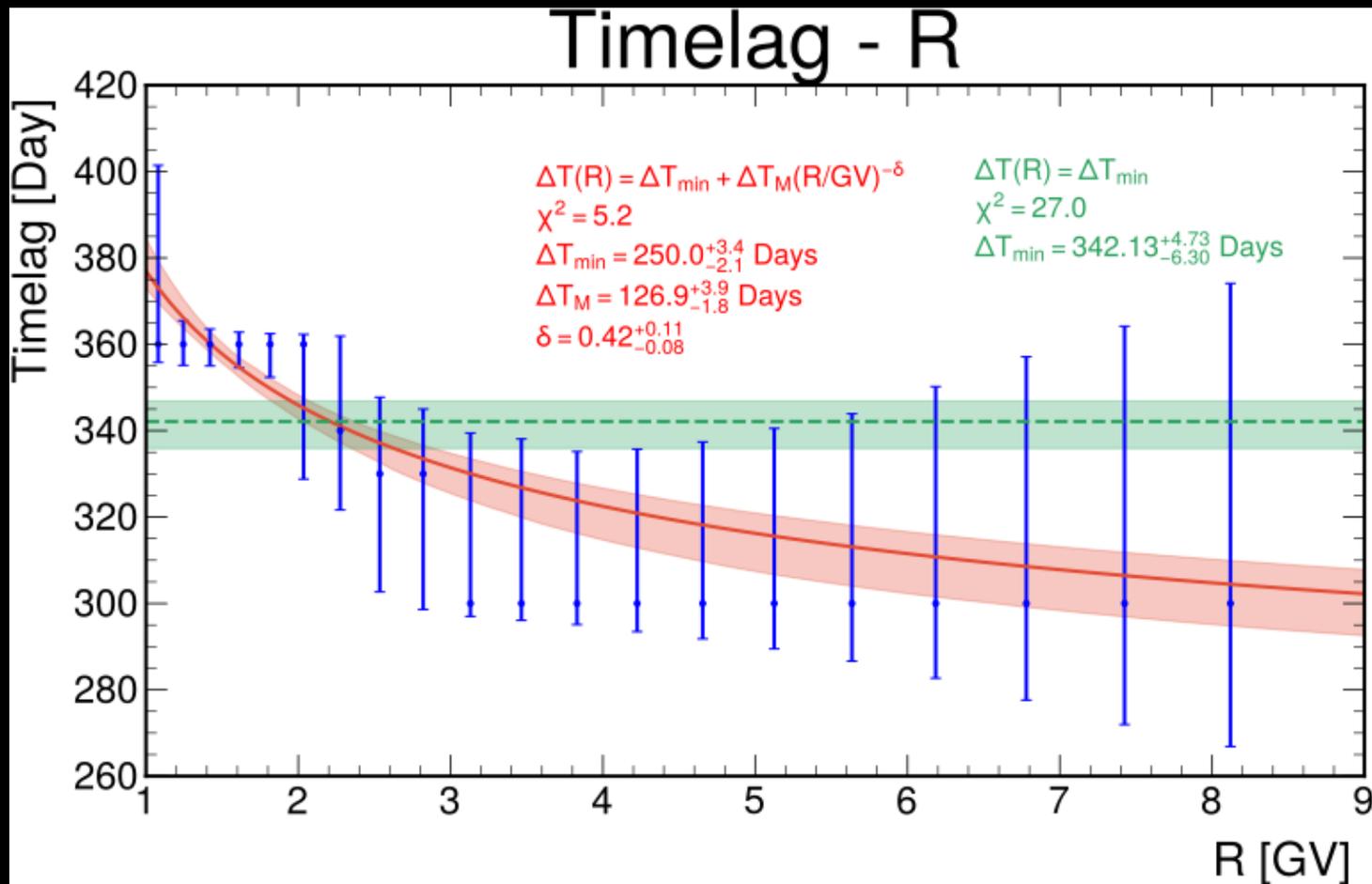
## 2.3 太阳两极磁场强度与宇宙线质子流强的关联-定量分析能量依赖

定量分析延时的能量依赖关系：

- 1) 质子与太阳两级磁场关联的延时有能量依赖关系，用红色线拟合。
- 2) 与无能量依赖的函数相比， $\delta$  非零的证据大于 $5\sigma$ 。

TABLE I. Comparison of model parameters.

Parameters	$R$ dependent	$R$ independent
$\Delta T_{\min}$ [Day]	$250.0^{+3.4}_{-2.1}$	$342.13^{+4.73}_{-6.30}$
$\Delta T_M$ [Day]	$126.9^{+3.9}_{-1.8}$	Null
$\delta$	$0.42^{+0.11}_{-0.08}$	Null
$\chi^2$	5.7	27.0

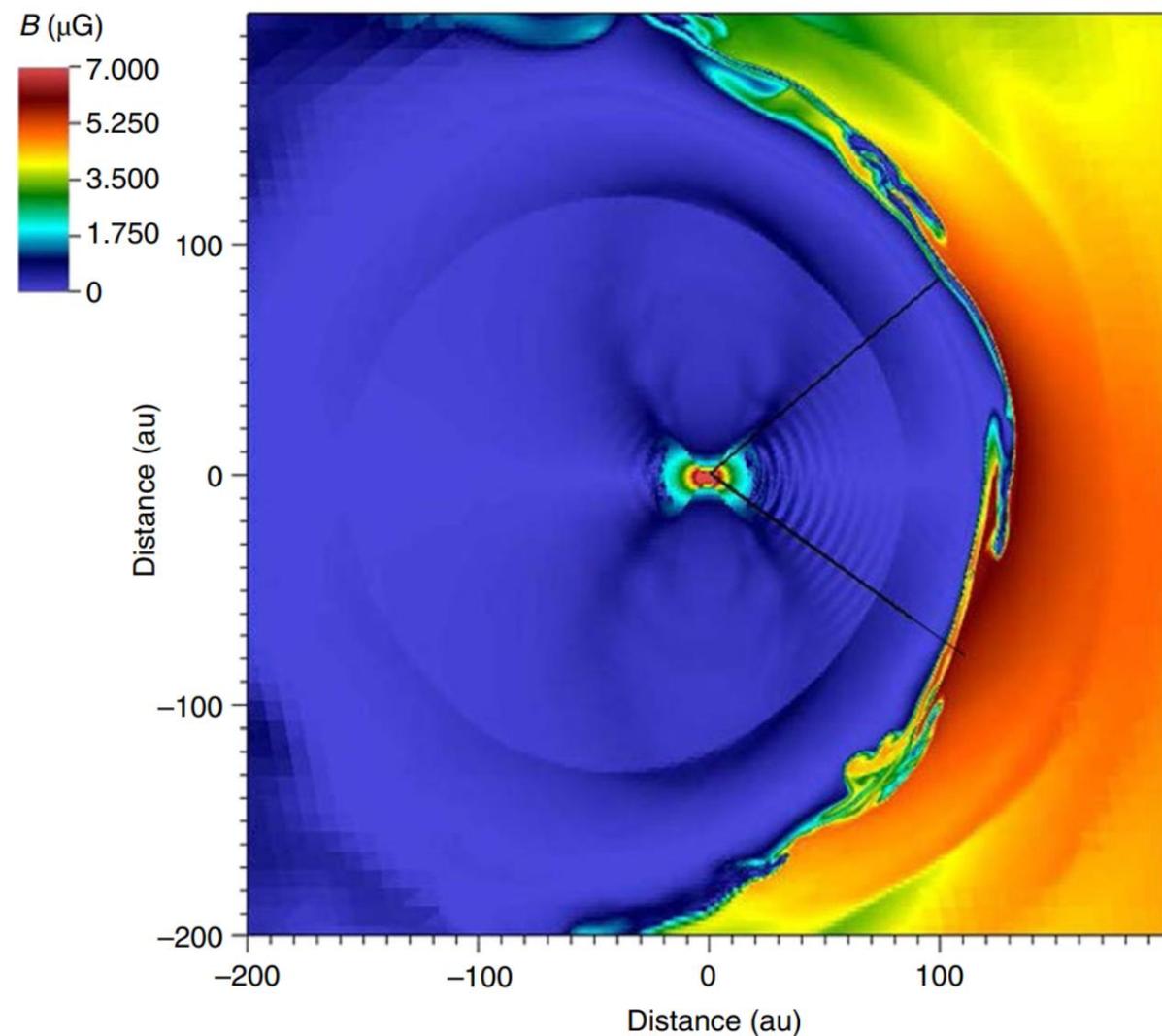


## 2.4 太阳两极磁场强度与带正电宇宙线流强的延时关联的解释。

观察到的延时效应与日球顶层边界 (heliopause barrier) 有关：

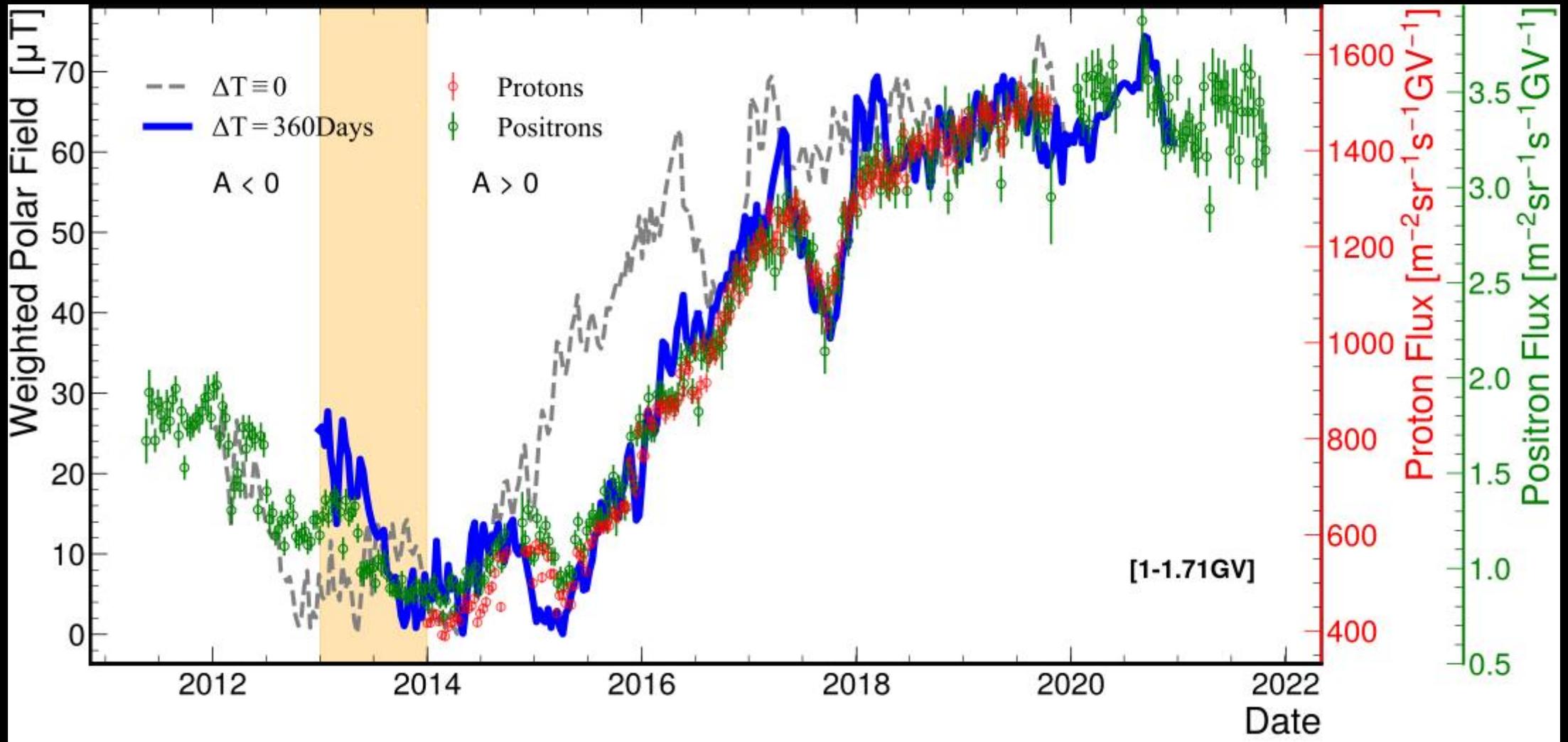
太阳风携带者太阳两级磁场的变化信息，以  $V \sim 600$  km/s 的速度传到了  $L \sim 120$  AU 的日球顶 (heliopause)。用时  $\Delta T \sim L/V \sim 350$  days，与宇宙线观察相符。

能量依赖关系可能由于宇宙线在进入日冕层时遇到的湍流造成的。



L. F. Burlaga and et al. Magnetic field and particle measurements made by voyager 2 at and near the heliopause. Nature Astronomy, 3(11):1007–1012, Nov 2019.

## 2.5 太阳两极磁场强度与带正电宇宙线流强有关联，其延时有能量依赖效应。



GONG et al, PHYSICAL REVIEW D 111, 083050 (2025)

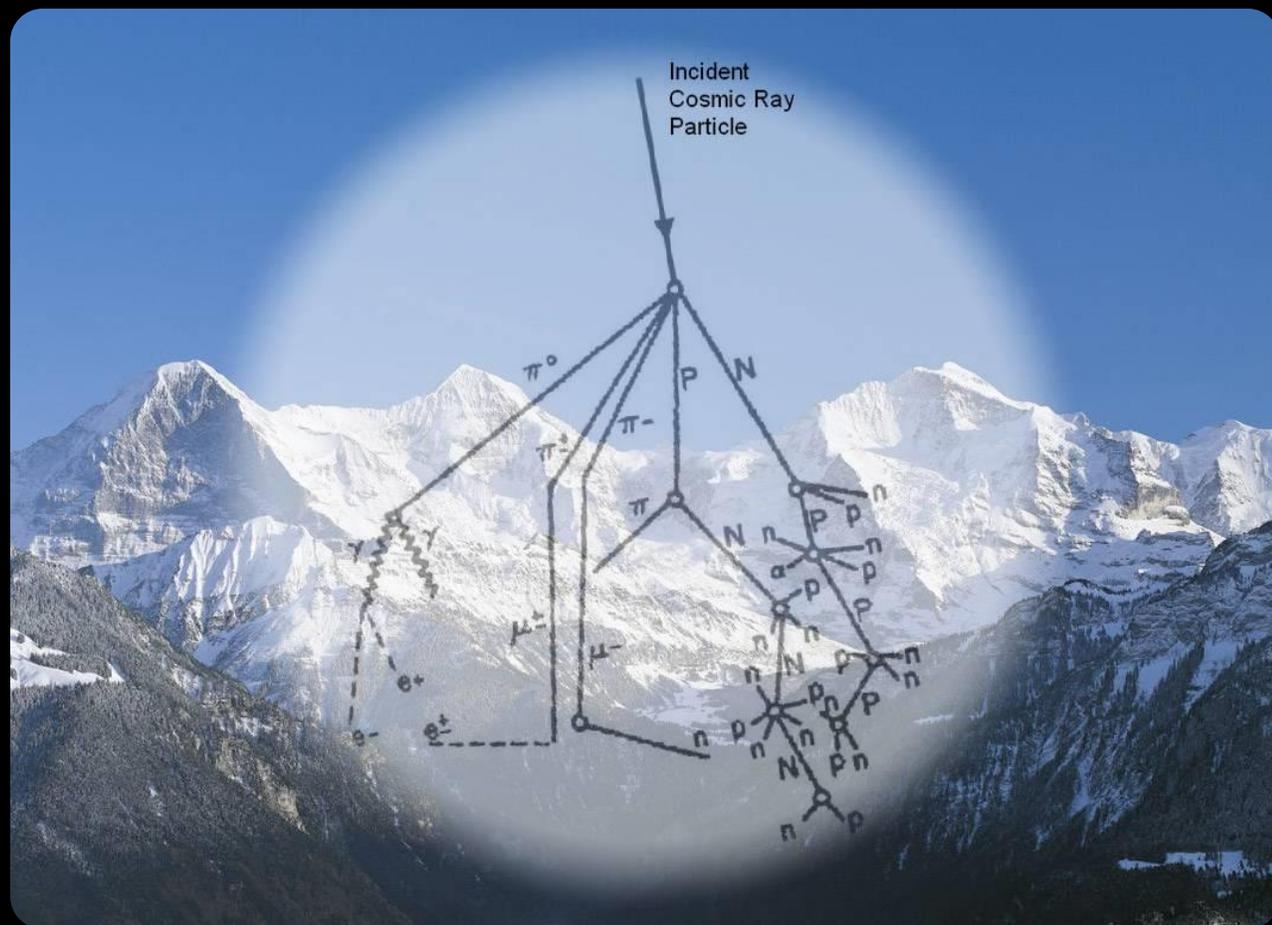
### 3 通过间接测量方法计算宇宙线能谱

进入大气层前：

地磁场屏蔽低能宇宙线，只有大于地磁截止刚度的宇宙线才能进入大气层。

进入大气层后：

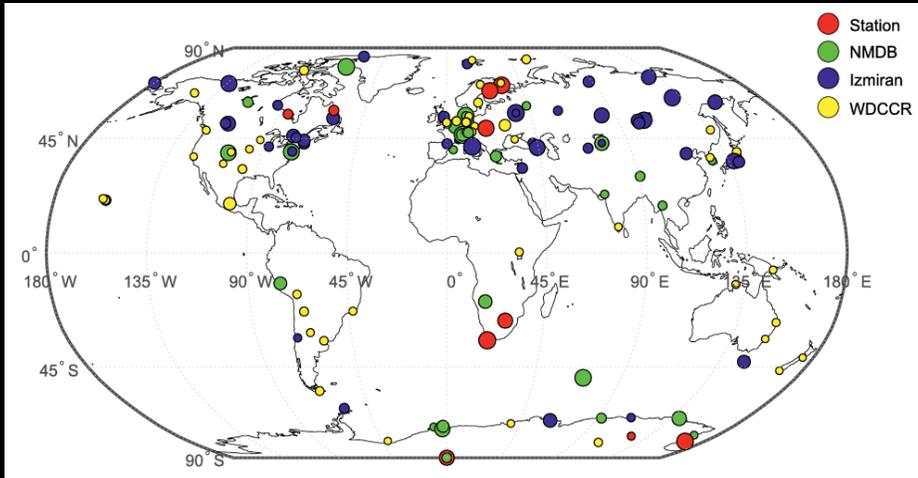
宇宙线会与大气层中的原子分子碰撞产生许多次级粒子，地面上的探测器就是通过探测这些次级粒子来观测宇宙线。Neutron Monitors, Global Muon Network等实验正在探测。



# 3.1 地面探测器 Neutron Monitors

全球大约有 50 多个活跃的中子探测器，全时间在测量。

宇宙线能量对应地磁截止刚度



**Table 1**

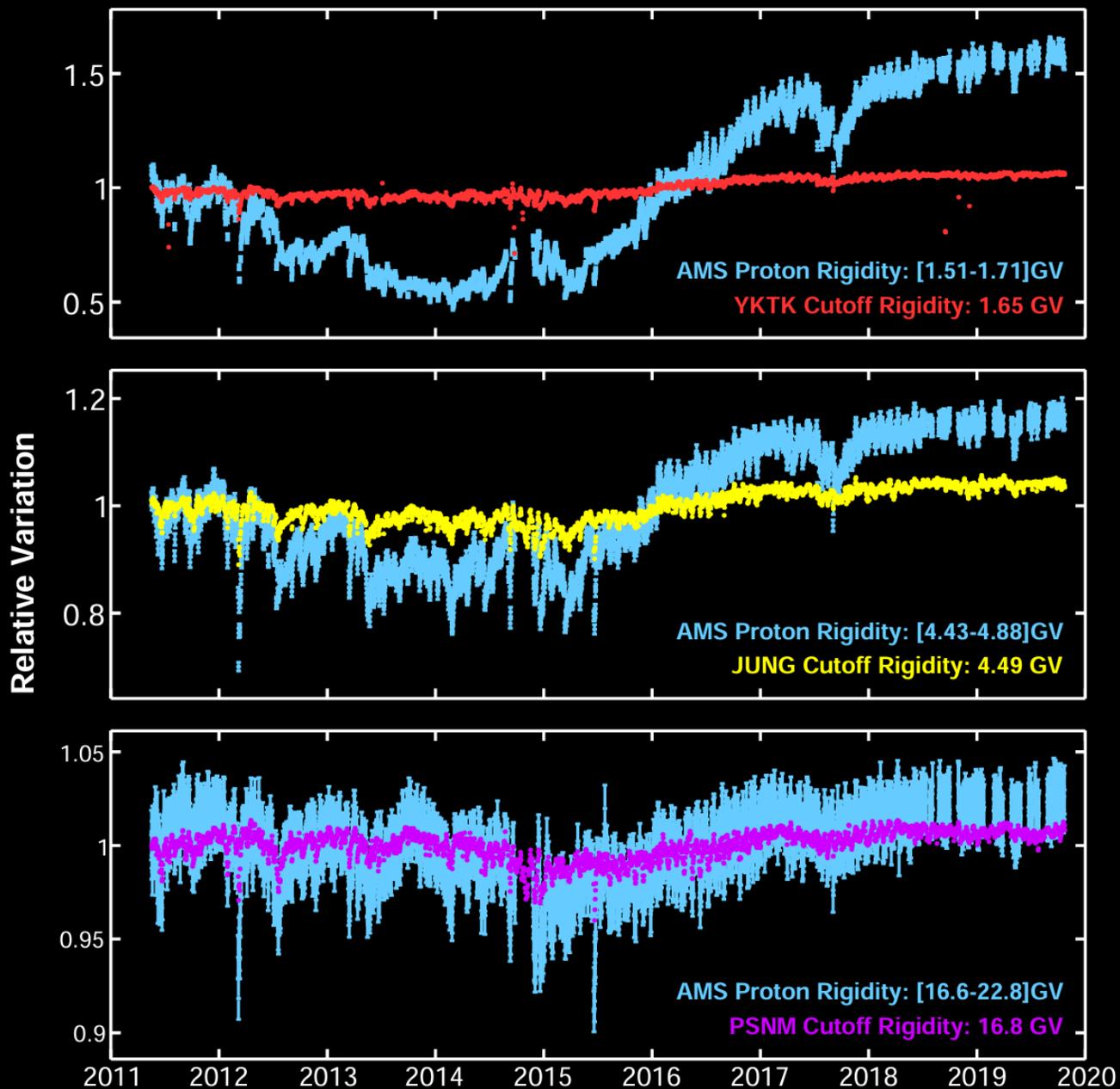
*Summary of Data Repositories and Number of Recommended Data Sources.*

Data repository (click for hyperlink)	Available stations	No of recommended sources	No of secondary sources
<a href="#">NMDB (1h)</a>	53	29	10
<a href="#">NMDB (revori)</a>	51	3	2
<a href="#">WDCCR</a>	138	59	24
<a href="#">IZMIRAN</a>	81	50	18
<a href="#">Polar Geophys. Inst.</a>	1	1	
<a href="#">Bartol Inst.</a>	8	5	3
<a href="#">Jungfraujoch NM</a>	2	0	2
<a href="#">Lomnický Štit NM</a>	1	1	
<a href="#">Mexico NM</a>	1	0	1
<a href="#">Oulu NM</a>	3	3	
<a href="#">South African stations</a>	5	2	2
<a href="#">Yakutsk + Tixie Bay</a>	2	0	0

*Notes.* Data repository name is a hyperlink to the respective website in the pdf version of this article.

## 3.2 填补AMS测量数据

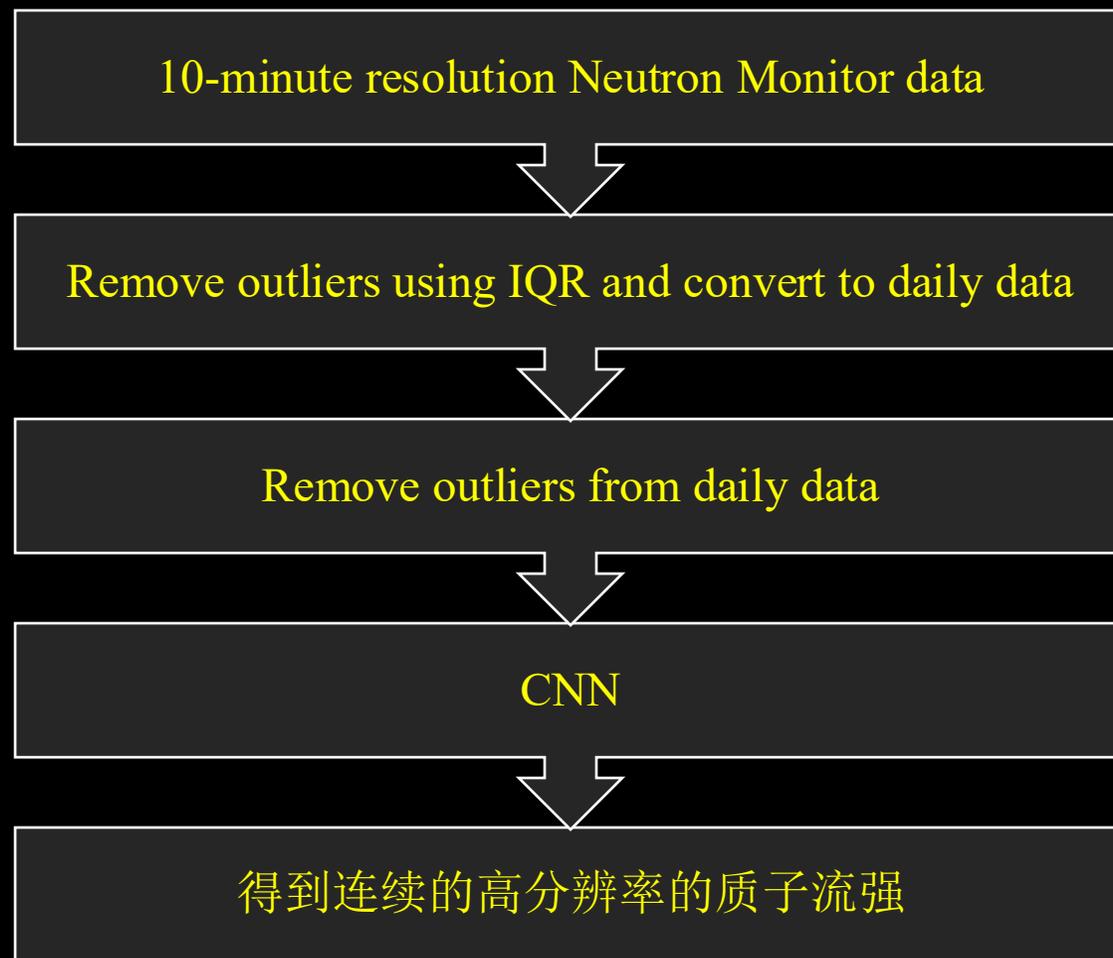
- 由于运行原因，AMS探测器测量的数据不连续，不利于太阳调制模型建模。
- GeV能区的宇宙线，约85%是质子。剩余的大部分是氦核等带正电核子，它们随时间变化的能谱与质子一致。随时间变化的地面中子计数应该与宇宙线质子一致。
- 中子探测器根据其所在位置的分布得到积分谱，但其接受度随能量变化，一般用所在地区的cutoff的Yield Functions描述。
- 右图可以看到，中子探测器的数据与对应能量的宇宙线数据对不上。需要新的方法把中子探测器数据与AMS测量结果对应起来



### 3.3 研究目的

- a) 填补AMS实验随时间变化数据空白
- b) 获取更高时间分辨率数据
- c) 探索物理现象

### 研究方法

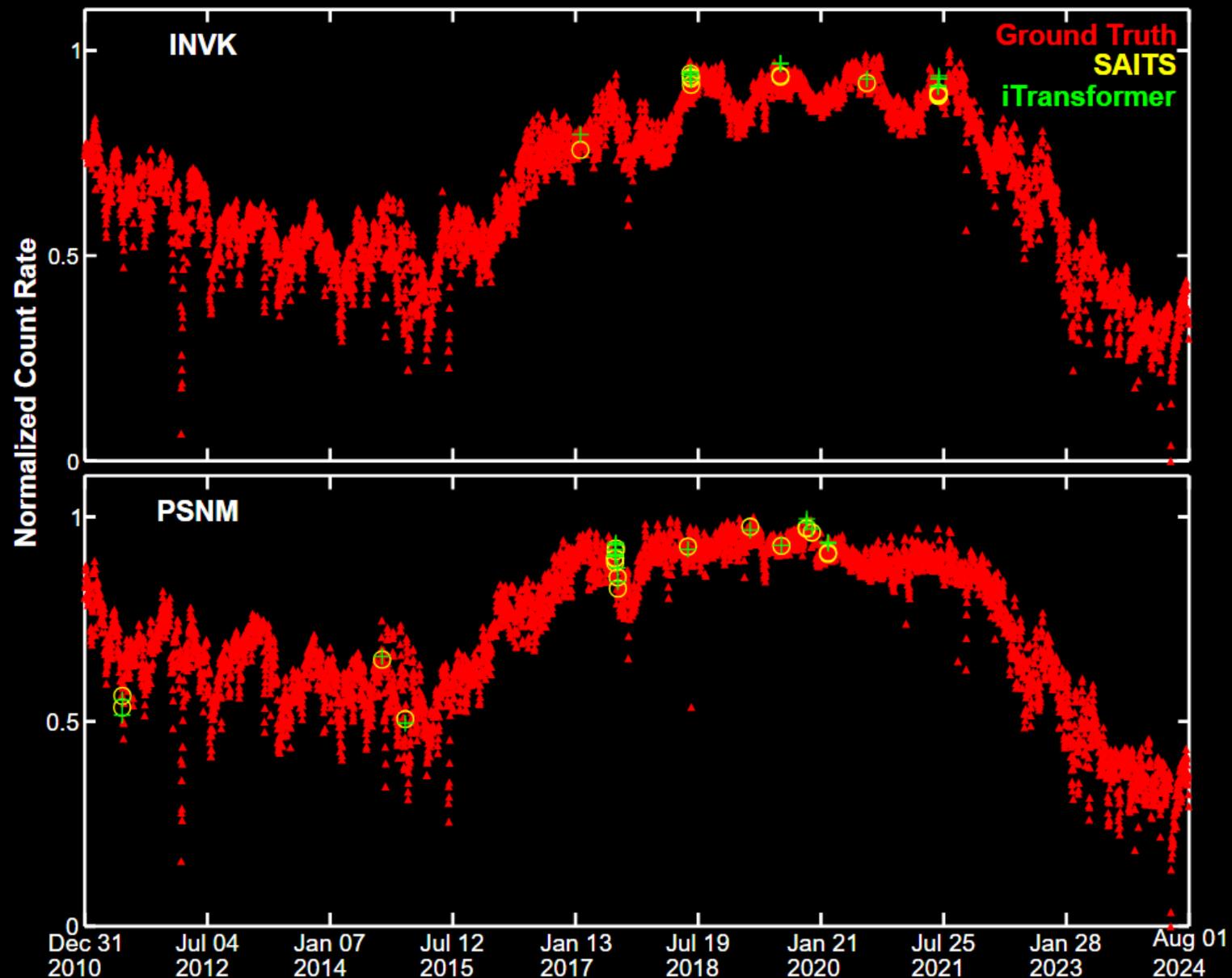


## 3.4 数据预处理:

地面中子观测站数据存在缺失，我们使用多个时间序列缺失值填补方法（SAITS<sup>[1]</sup>和iTransformer<sup>[2]</sup>），选出更好的补全模型。

为了测试预处理准确度，我们人为挖空一些数据点，然后对数据进行预测，看预测效果。

最后得到的预测值跟真实值相符，说明填补地面数据的方法可行。



[1]. Du, W., Cote, D., & Liu, Y. (2023). SAITS: Self-Attention-based Imputation for Time Series. Expert systems with applications.

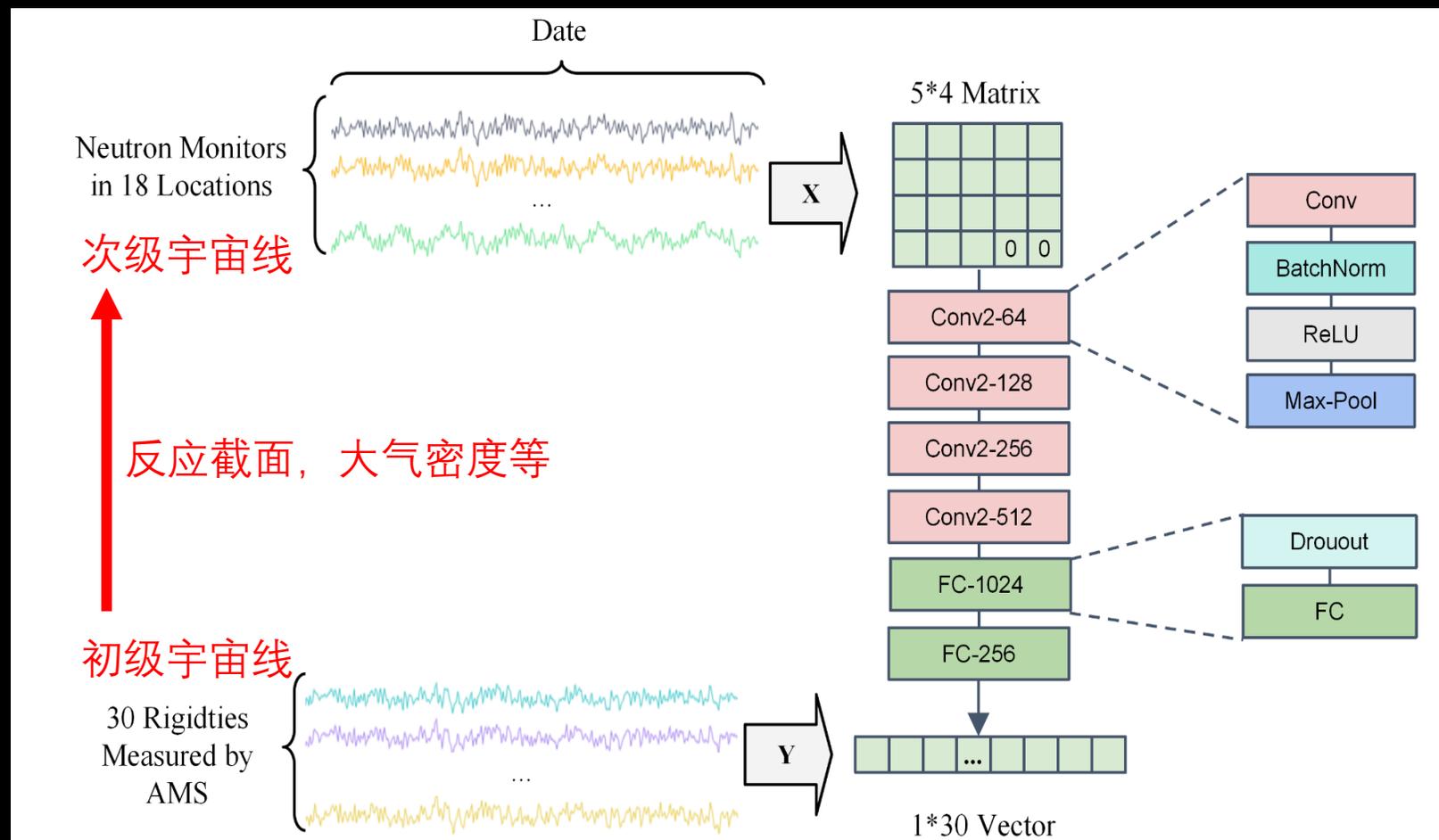
[2]. Liu, Y., Hu, T., Zhang, H., Wu, H., Wang, S., Ma, L., & Long, M. (2024). iTransformer: Inverted Transformers Are Effective for Time Series Forecasting. ICLR 2024.

# 3.5 Convolutional Neural Network (CNN)

输入：1x18的中子探测器  
每日数据

经过4层卷积层+2层全连接层

输出：1x30的AMS每日质子流强



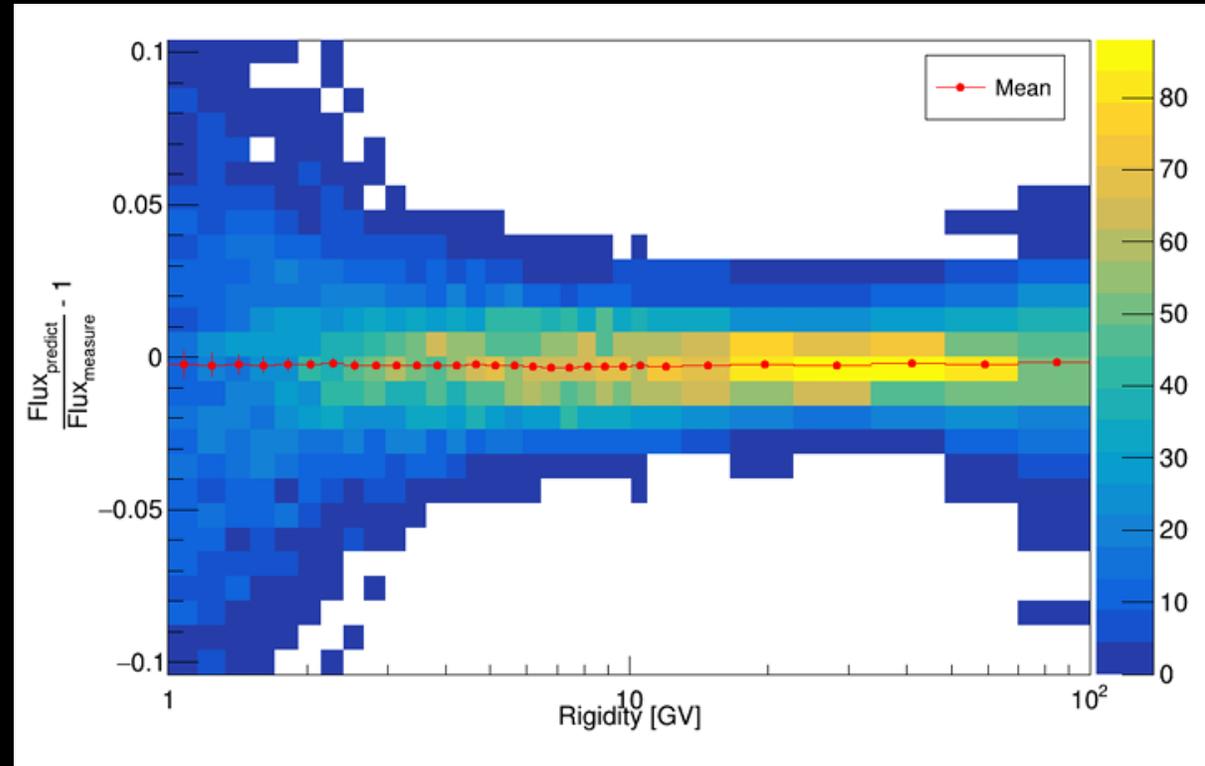
## 3.6 宇宙线质子日变化数据测量

$\frac{Flux_{predicted}}{Flux_{measured}} - 1$  分布展示了模型预测值和AMS测量值的偏离。

红色点是每个能量的均值。

右图可见

- 质子流强预测值与 AMS 测量数据非常吻合。

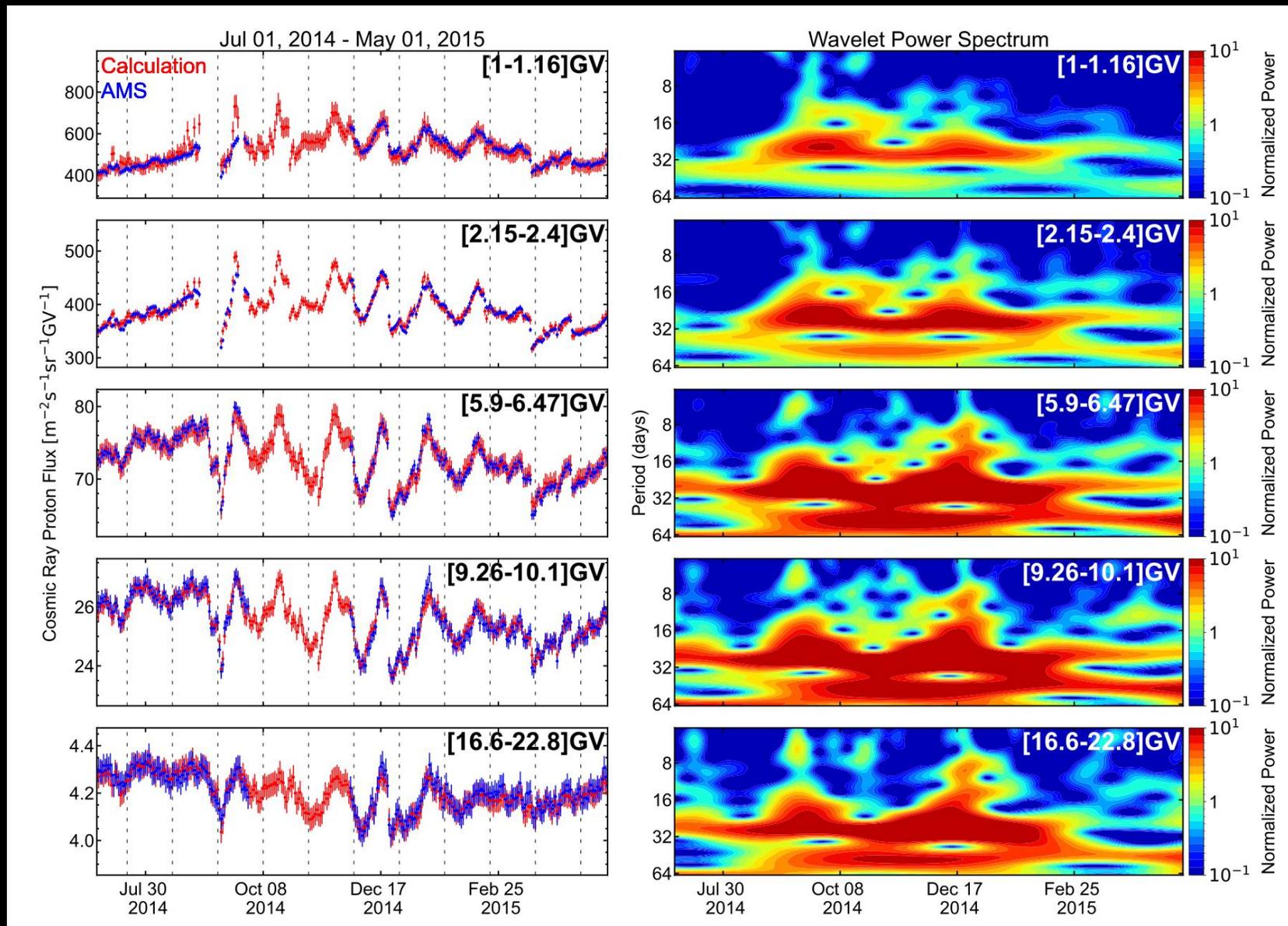


### 3.7 宇宙线质子日变化数据测量结果

2014年到2015年初，宇宙线质子能谱的测量结果。从这个工作与AMS测量结果的对比可看出，机器学习模型可以重建出AMS测量结果。

加上AMS没测量的结果部分，我们清晰地看到这段太阳磁极翻转时期的能谱有27天周期性。

右图的小波分析结果，定量地描述了周期性随时间变化。



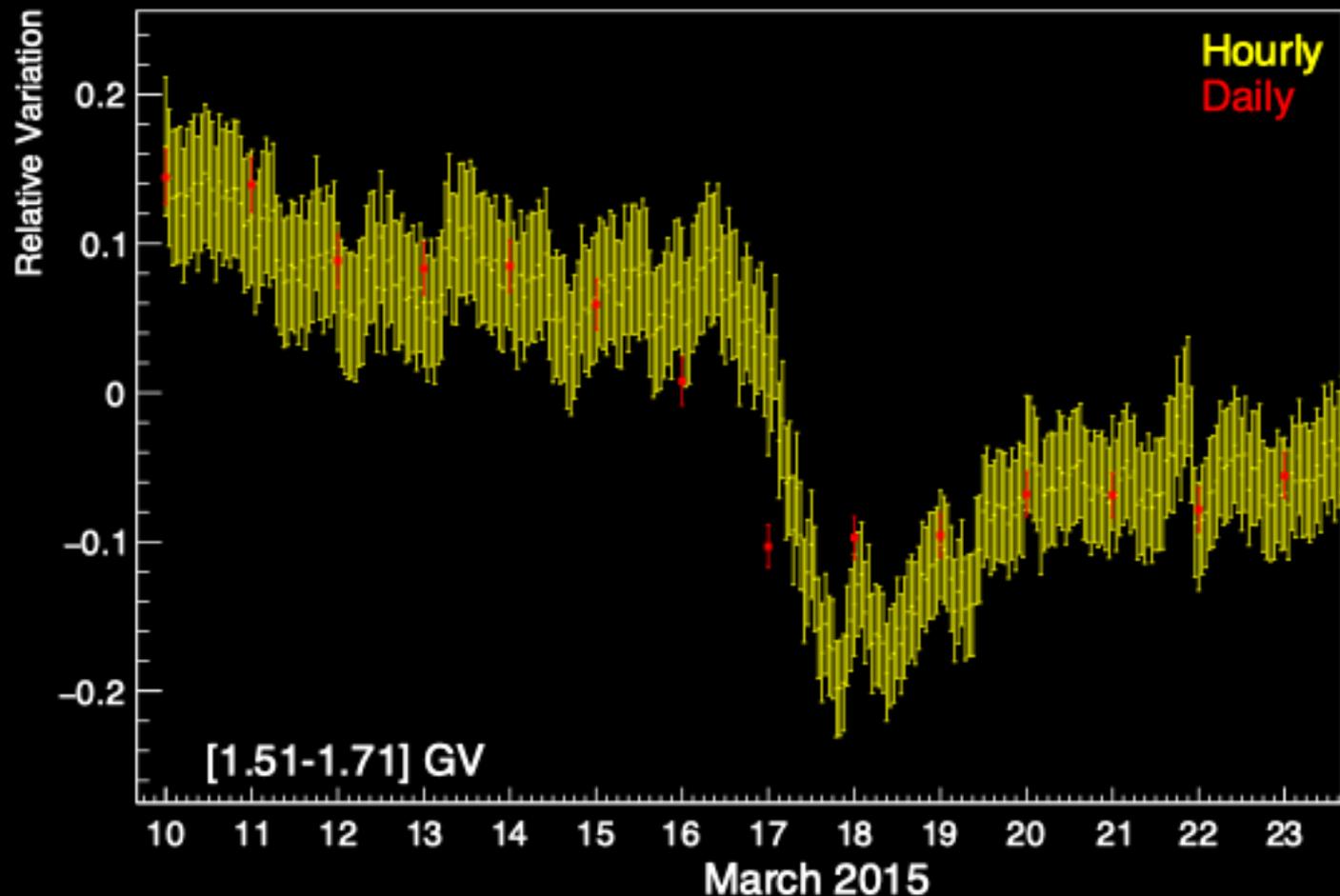
## 3.8 宇宙线质子每小时变化数据测量结果

AMS、DAMPE等直接测量实验，由于轨道限制，在低能段并不能全时间测量。每90分钟才能测一遍完整的能谱。而地面的Neutron monitor则可以全时间测量。

2015年3月17日的Forbush Decrease，宇宙线质子能谱的每小时变化测量结果。机器学习模型有希望重建出整个变化。

日变化的AMS宇宙线质子流强只给我们展示了1个下降峰。

每小时变化的数据，让我们看到15年3月17日的两个下降峰，更好地研究整个Forbush Decrease 过程。



# 结论

- 我们发现太阳两极磁场变化与宇宙线强度有关联，这个关联是能量依赖的。  
(PHYSICAL REVIEW D 111, 083050 (2025), [arXiv:2409.17646](#) )
- 机器学习模型可以根据地面中子的数据准确计算空间中的GeV以上质子流强。地面中子数据计算得到的质子流强随时间更连续，给我们展示了2014年下半年以及2018-2019年的宇宙线质子数据，补全了AMS探测器的缺失。为我们研究宇宙线受太阳调制的机制，提供数据。（ [arXiv:2412.18872v2](#) ）
- 这两个工作作为研究太阳活动预测宇宙线强度的基础。

# Backup slides