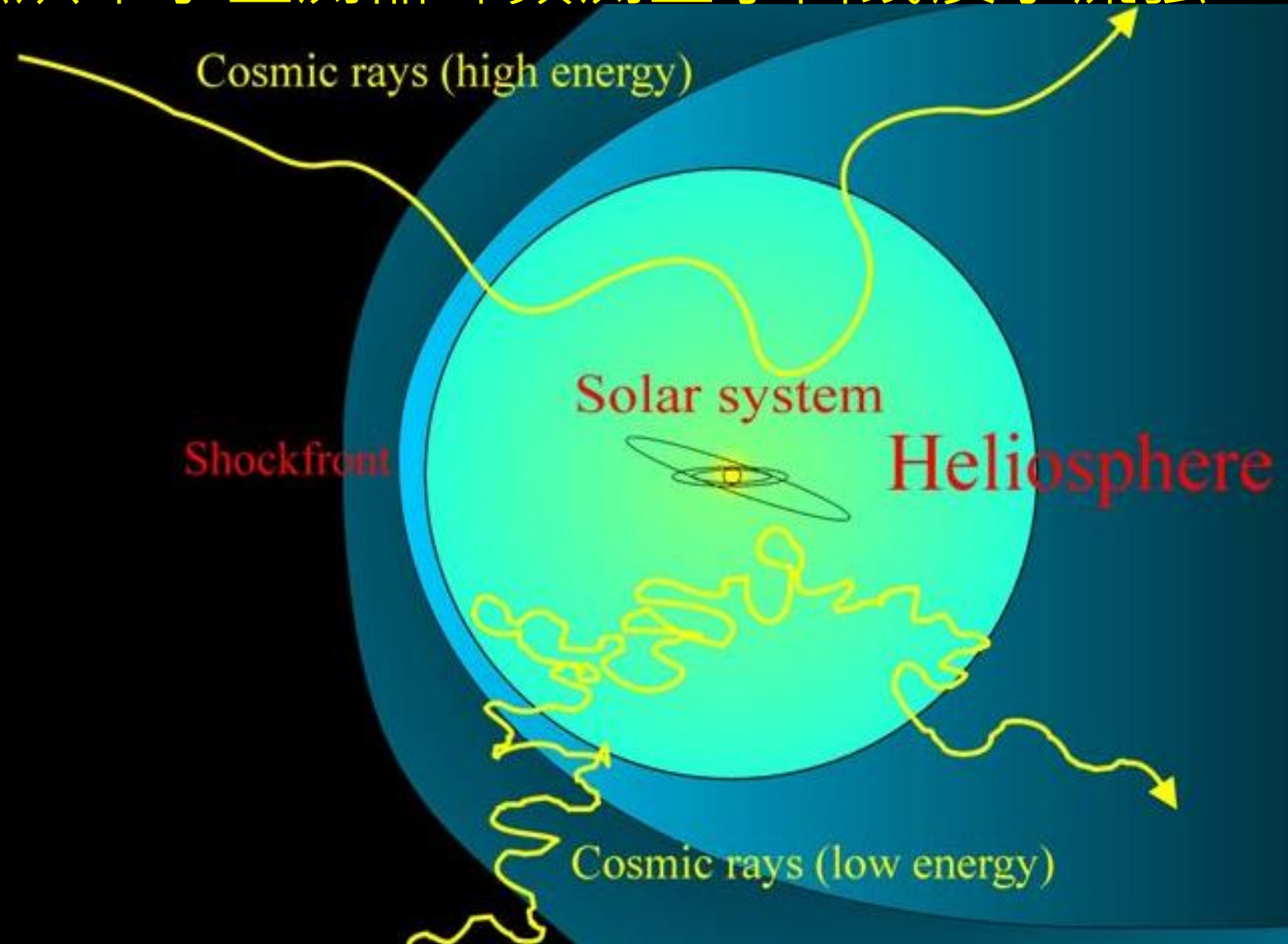


Measurements of Cosmic Proton Flux through Neutron Monitors Using Deep Networks and Imputation Techniques in the AMS-02 Era 用机器学习方法从中子监测器计数测量宇宙线质子流强

Jie Feng
Sun Yat-Sen University
冯劼
中山大学
jie.feng@cern.ch

Pengwei Zhao *et al* 2026 *ApJS* 282 5



宇宙线简介

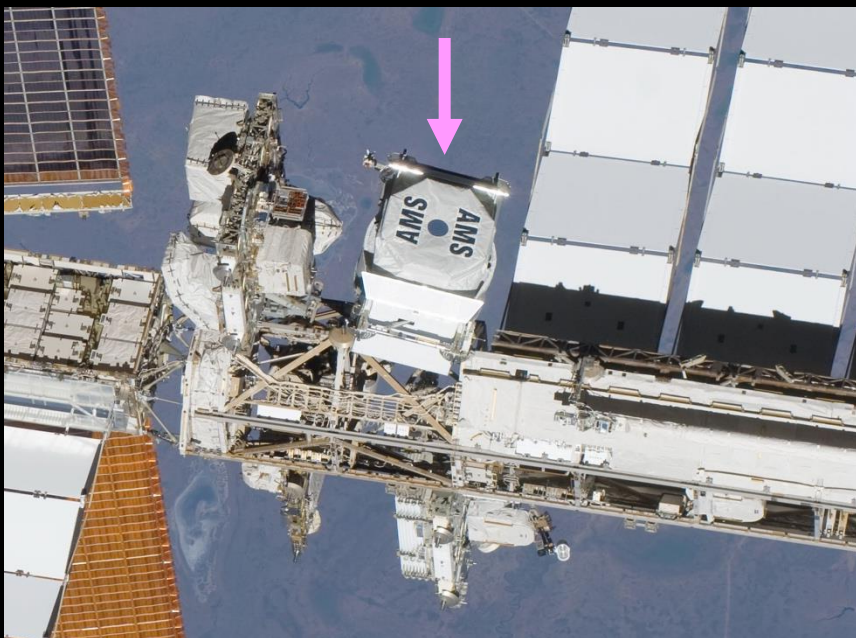
宇宙线是来自太空的高能粒子，主要包括各种原子核、电子以及少量反粒子，其中质子占主要成分。

空间探测器可以直接测量宇宙线粒子的种类和能量，例如国际空间站上的 AMS-02。

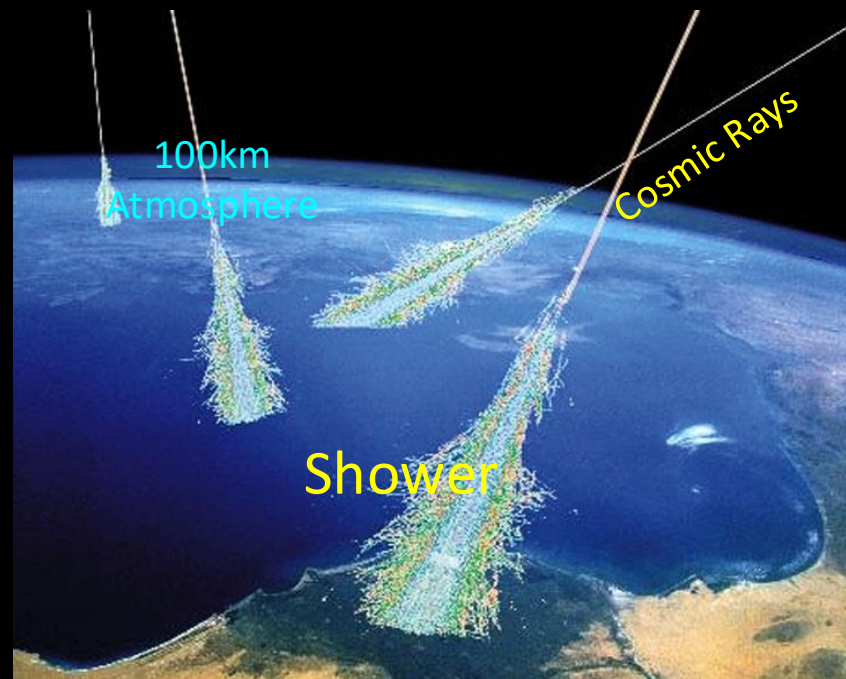
地面探测器则通过探测宇宙线进入大气后产生的次级粒子，例如中子监测器，LHAASO等。

本工作则是通过训练模型利用地面中子计数来重建空间质子通量。

Alpha Magnetic Spectrometer(AMS-02)



Our work

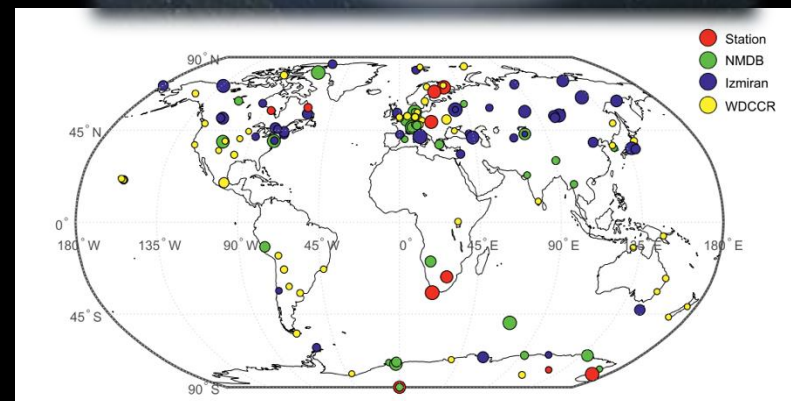
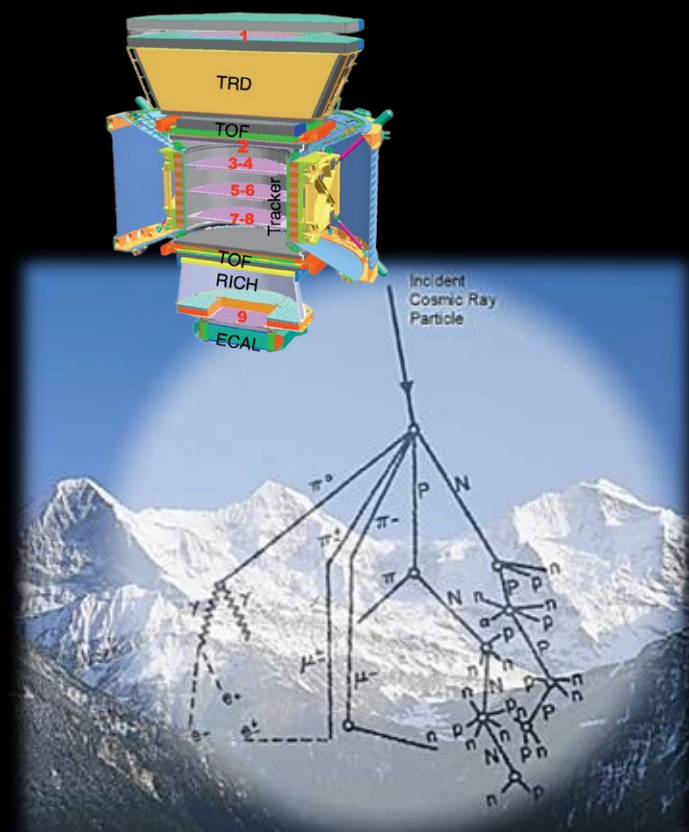


AI任务：用间接测量的中子计数重建直接测量的宇宙线流强

为减弱传统方法对理论模型的依赖，
本工作采用深度学习方法，直接建立中子监测器
计数率与 AMS 分能量质子通量之间的映射关系

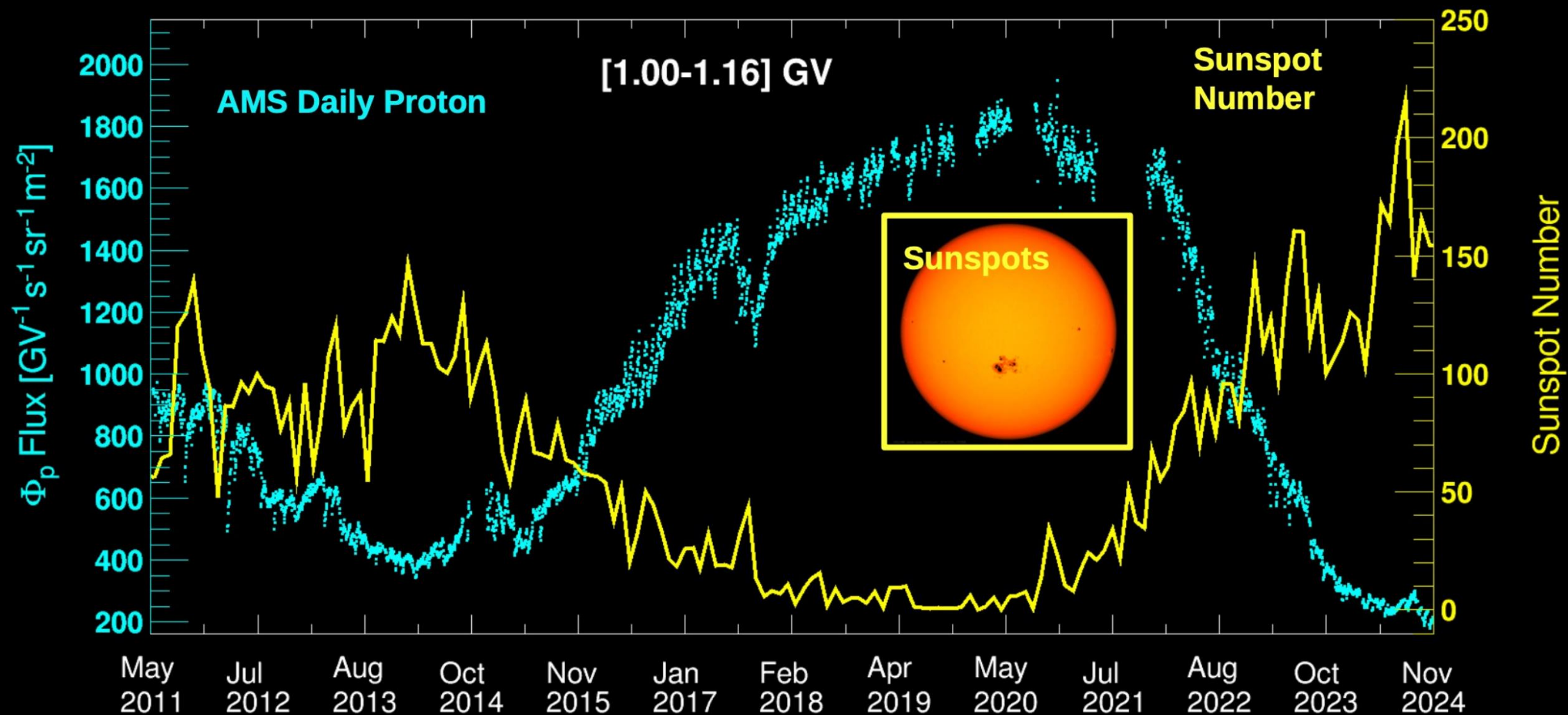
。

在 AMS 与中子监测器（NM）的重叠观测时期，
以同一天的18站 NM 计数率作为输入，
以同一天 AMS 30 个能量区间日质子通量作为监
督标签，
训练由地面观测 → 空间质子通量的重建模型。



宇宙线通量随太阳活动反向变化

太阳活动越强，质子通量越低。研究宇宙线的太阳调制机制、深空辐射，要求我们有连续的宇宙线能谱测量。



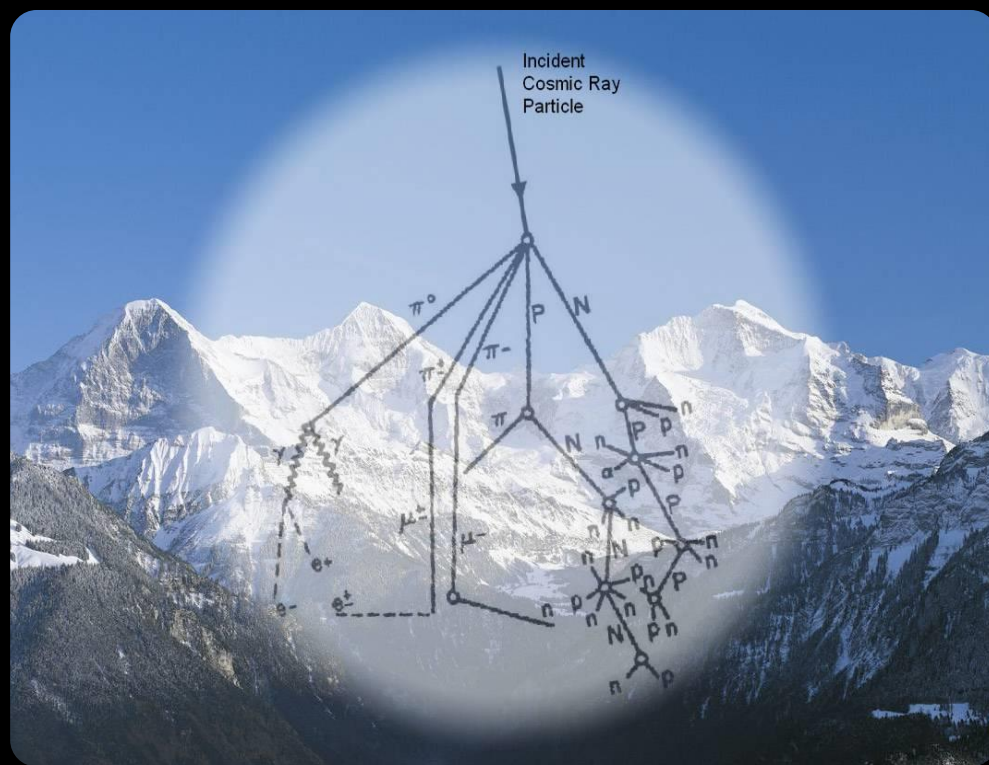
地面中子探测连续，但只得到能谱的积分响应

宇宙线进入大气层前：

地磁场筛选低能量宇宙线，只有高于地磁截止能量的粒子能够进入大气层。

进入大气层后：

宇宙线与大气相互作用产生次级粒子；地面探测器测得的是积分响应，不能直接测量能谱。

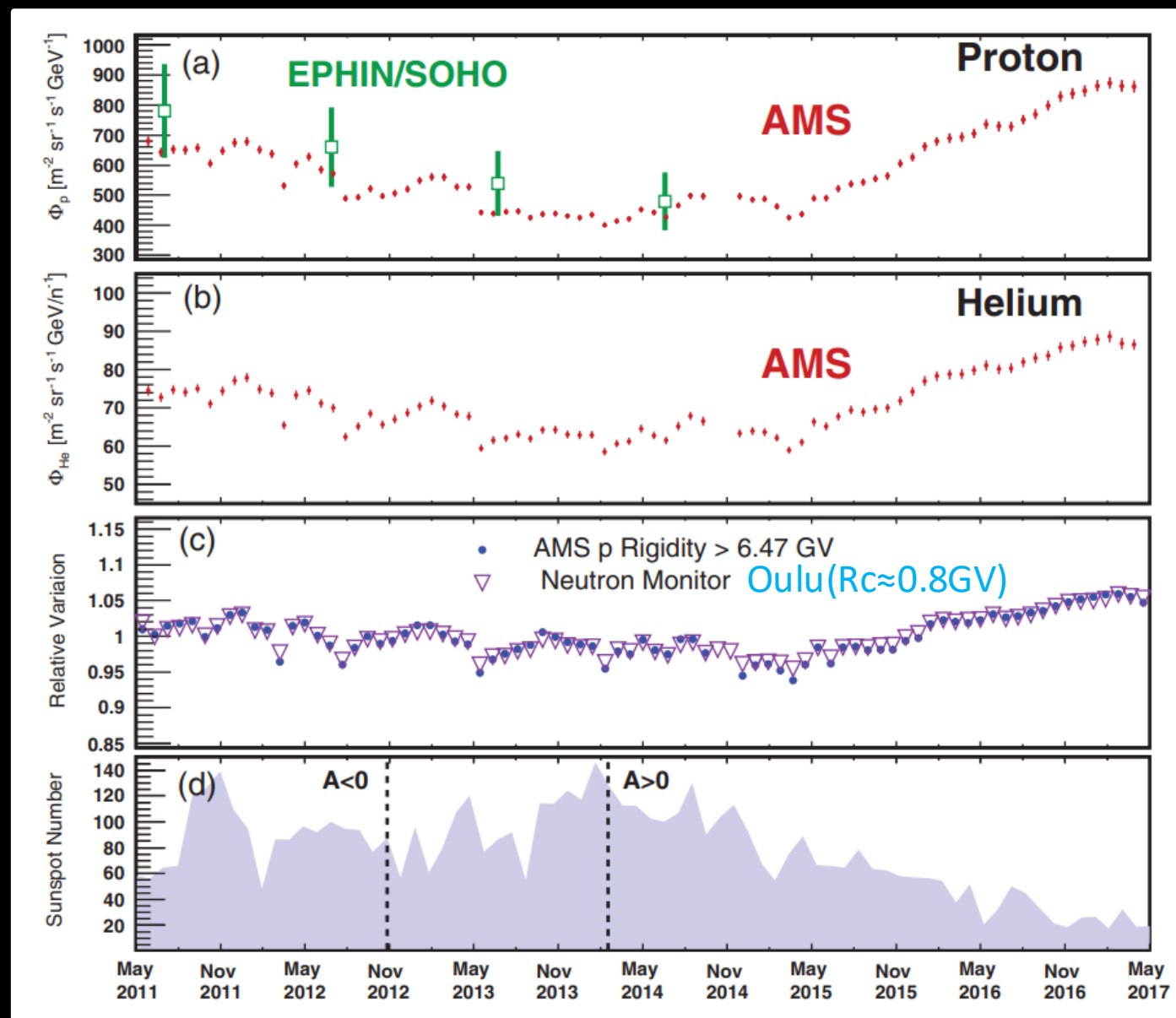


NM与AMS共同变化，但能段不同

AMS 质子通量在 $R > 6.47 \text{ GV}$ 以上积分后的相对变化与Oulu中子监测器（地磁截止能量 $R_c \approx 0.8 \text{ GV}$ ）计数率相对变化表现出一致性。

这说明地面中子监测器计数率与空间探测器观测到的质子通量密切相关。这也是建立从地面计数到空间通量映射的依据。

只是能段不是——对应。

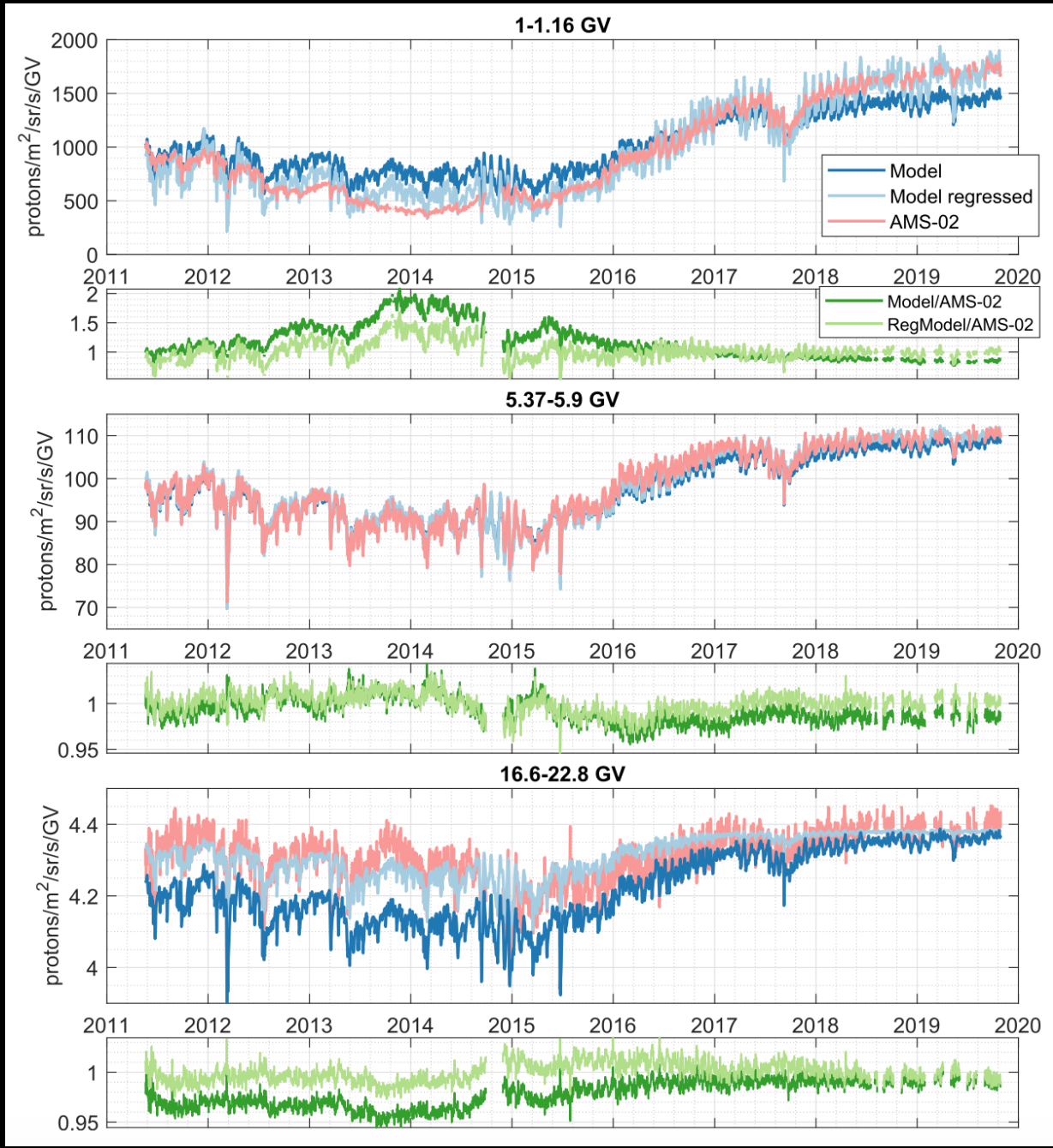


传统方法在5–15 GV较好，但依赖模型

结合产额函数和力场近似，Väisänen等（2025）利用NM计数重建宇宙线通量，并仅在约5–15 GV获得较好结果。

传统方法是间接且依赖模型的，因此不确定度较大。

Vaisanen, P., Bertucci, B., Tomassetti, N., et al. 2025, Journal of Geophysical Research (Space Physics), 130, e2025JA033805



地面中子测量也有空缺

异常值处理后，18个NM站点的日分辨率序列中仍存在少量短时缺失。

本工作比较了SAITS、Transformer、TimesNet 和 iTransformer 四种深度神经网络补全方法。

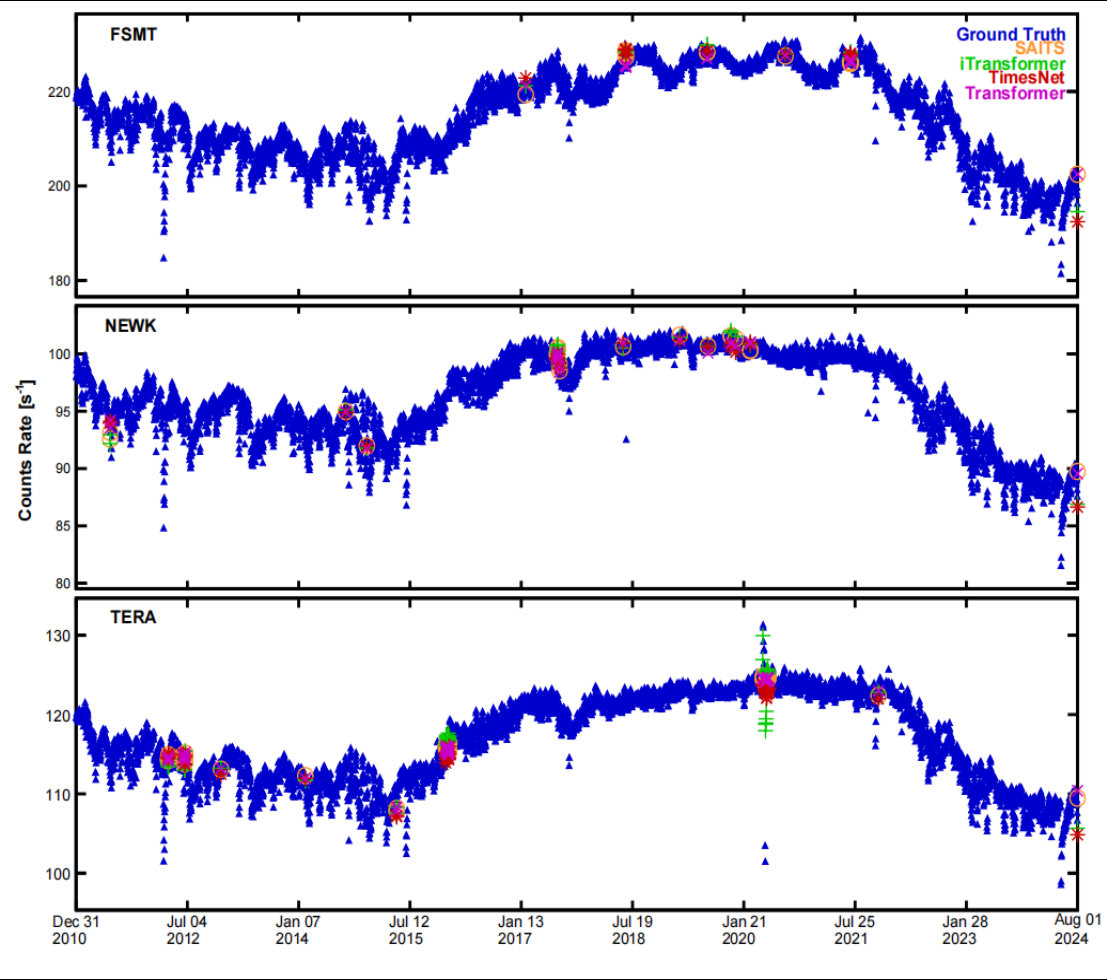
在随机遮蔽验证中，SAITS的MAE和RMSE最低，补全精度最好。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - y_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}$$

示例站点结果表明，SAITS对长期趋势、周期变化和局部扰动的保持都更稳定。

最终采用SAITS补全剩余缺失值，构建了连续的18站点日分辨率NM数据集。



方法	平均绝对误差 (MAE)	均方根误差 (RMSE)
TimesNet	0.0274	0.0369
Transformer	0.0235	0.0326
iTransformer	0.0126	0.0194
SAITS	0.0121	0.0188

中子补全仅占0.6%，输入仍以真实观测为主

最终得到18个站点、2011.01.01到2024.08.01 的连续日计数率数据集。

在全部89,316条日记录中，异常值剔除比例整体较低，所有站点都低于1%。
说明异常值检测只是去除了少量明显异常记录。

全部89,316条日记录中，仅有577条通过补全得到，即 $577/89,316 = 0.646\%$ 。
补全主要用于修复少量缺口，而不是对原始序列进行大范围重建。

因此，预处理改善了序列连续性，但没有明显改变原始数据的整体统计性质。

NM Station	Days of Raw Data	Days of Removed Outliers	Removed Outliers Percentage	Days of Missing Data	Days of Imputed Data	Imputed Data Percentage
AATB	4,859	11	0.222%	103	114	2.297%
APTY	4,961	2	0.040%	1	3	0.060%
FSMT	4,948	5	0.101%	14	19	0.383%
INVK	4,916	1	0.020%	46	47	0.947%
JUNG	4,951	5	0.101%	11	16	0.322%
JUNG1	4,948	16	0.322%	14	30	0.605%
LMKS	4,954	23	0.464%	8	31	0.625%
MXCO	4,951	30	0.605%	11	41	0.826%
NAIN	4,942	1	0.020%	20	21	0.423%
NEWK	4,942	6	0.121%	20	26	0.524%
OULU	4,961	3	0.060%	1	4	0.081%
PSNM	4,909	0	0%	53	53	1.068%
PWNK	4,939	1	0.020%	23	24	0.484%
SOPB	4,956	5	0.101%	6	11	0.222%
SOPO	4,952	3	0.060%	10	13	0.262%
TERA	4,911	13	0.262%	51	64	1.290%
THUL	4,961	1	0.020%	1	2	0.040%
YKTK	4,932	28	0.564%	30	58	1.169%

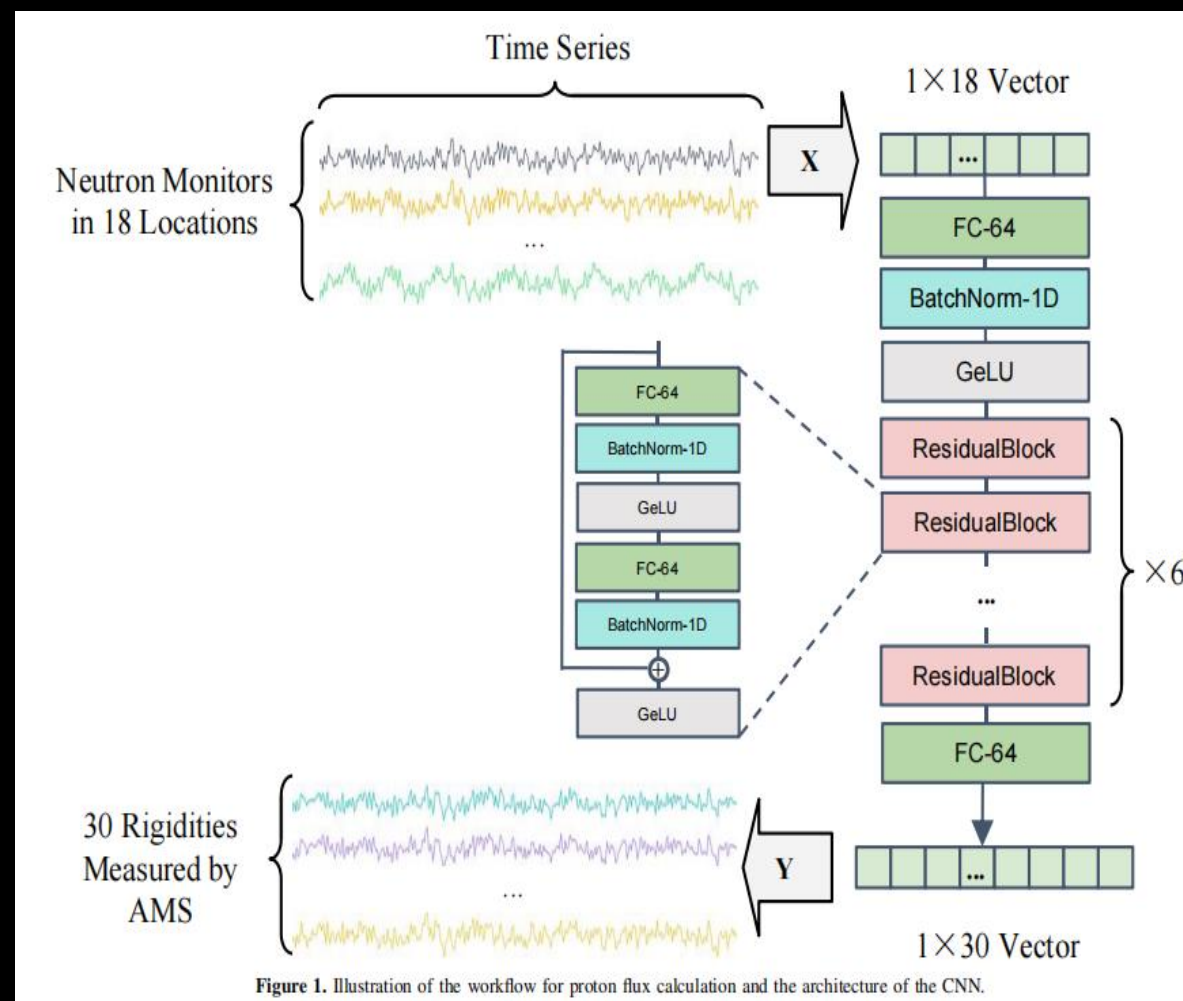
带残差块的CNN：18维日计数映射为30维日质子通量

我们采用带残差块的 CNN。对于每一组样本，输入是18个NM站点的日计数率，输出是同一天AMS在30个能量区间上的日质子通量。

18个站点的日计数率按照各站点对应的地磁截止能量顺序排列，构成一个 1×18 的输入向量。

该输入向量先经过一个全连接层，映射到64维表示空间，并通过批归一化层完成初步特征标准化。

图中残差块由 FC、BN 和 GeLU 构成；经过6个残差块后，网络再通过一个全连接层输出一个 1×30 的向量，对应30个能量区间上的AMS日质子通量。



结果展示

日尺度测试集达到 $R^2=0.9984$

定义误差：

测试集上模型计算值与真实观测值的比较。

$$\text{Relative Difference} = \text{Flux_predict} / \text{Flux_measure} - 1$$

图中的颜色表示测试集中样本点在二维直方图中一个区间中的天数。

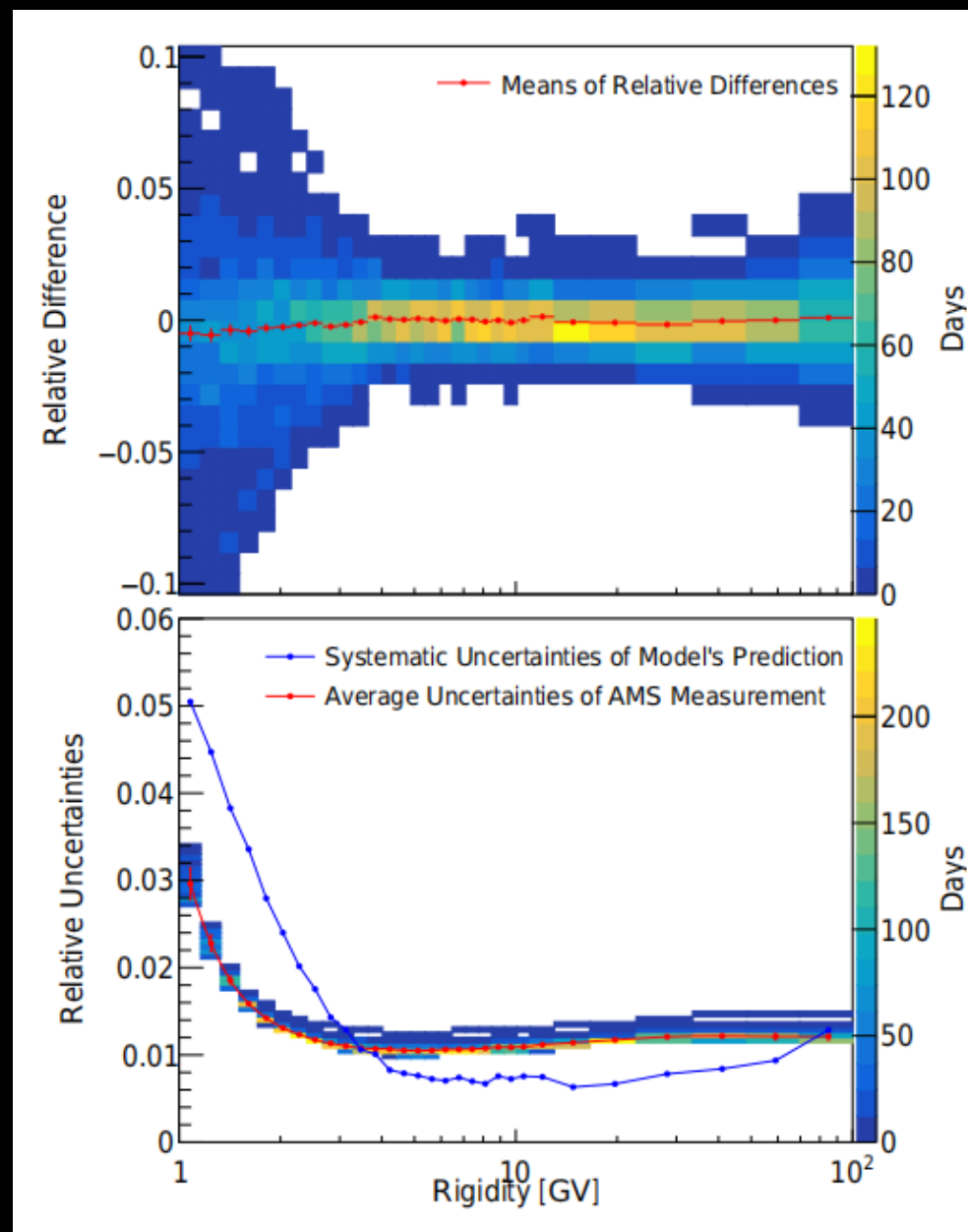
测试集总体指标：

$R^2 = 0.9984$ ，说明模型结果与 AMS 的变化趋势几乎一致；

$\text{MAE} = 4.950$ ， $\text{RMSE} = 10.151$ ，说明模型预测值与 AMS 测量值之间的平均偏差较小；

$\text{MPE} = -0.104\%$ ：说明模型整体上系统性偏离较小；

$\chi^2/\text{dof} = 1.371$ ：总体与测量不确定度相容。



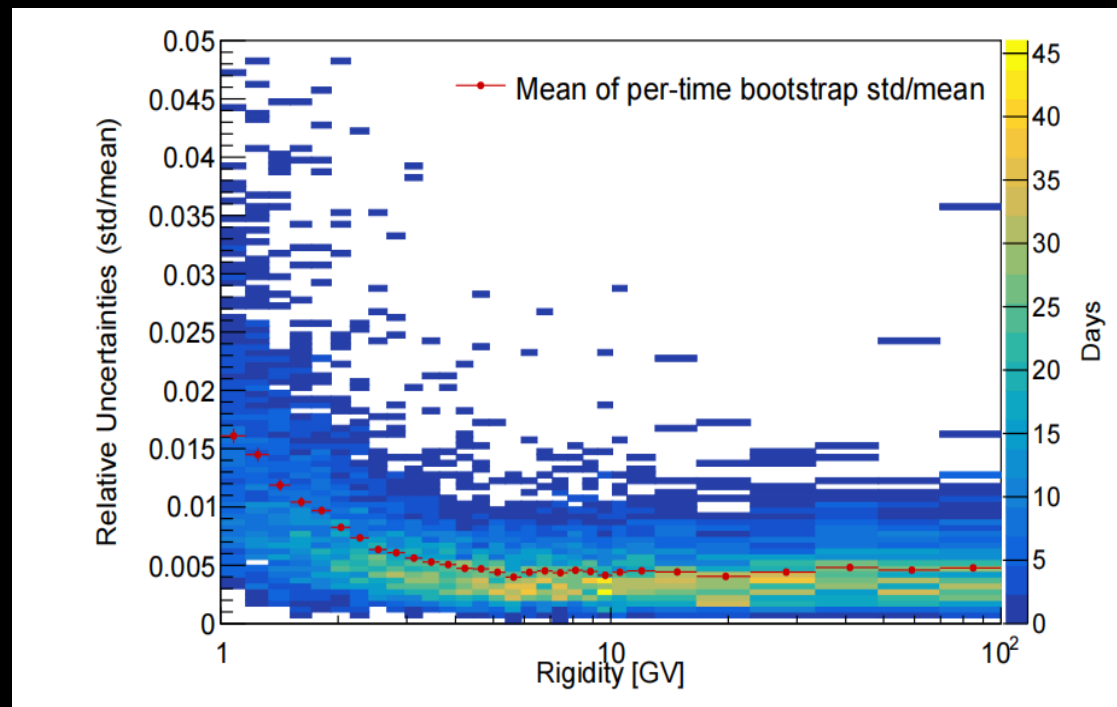
五个独立副本给出相近的能量依赖不确定度

测试模型稳定性：相同测试集、不同随机种子

固定同一测试集，使用5个不同随机种子训练独立副本。
随机种子控制模型初始权重和训练批次顺序。

训练出5个独立副本，结果如右图所示。

副本间离散度表明，模型在中高能量区较为稳定。



后2019 BR级检验显示低能量偏差增大

将 NM 按 Bartels rotation 聚合，并将输出合并到 AMS 月度能量分箱；比较覆盖 2019 年 11 月至 2022 年 6 月。残差 = (预测值 - AMS 测量值) / AMS 测量误差。

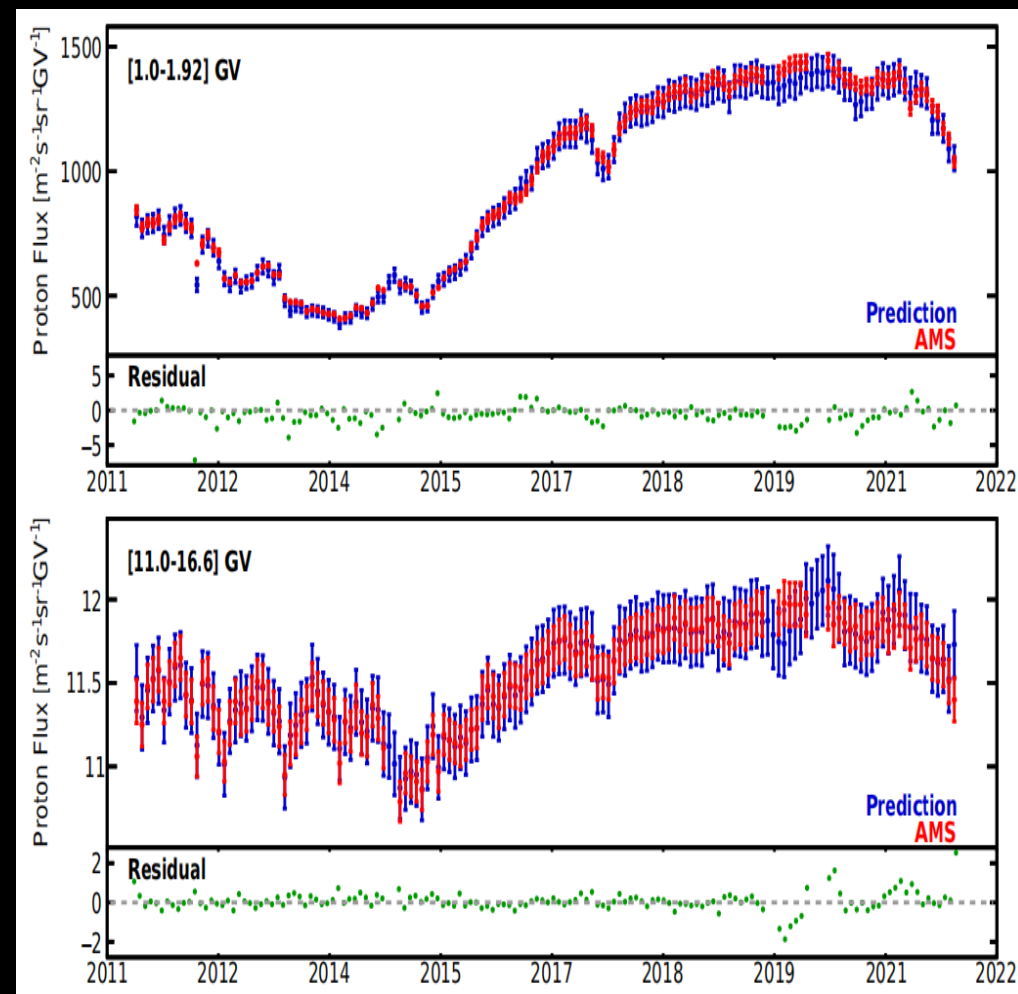
残差定义为: $Residual = (\Phi_{NM} - \Phi_{AMS}) / \sigma_{AMS}$;

2019年之前残差整体较小；

2019年之后有所增大。

说明模型在后期预测性能下降。

因此本工作最终选择了更保守的系统误差估计。



AMS, Phys. Rev. Lett. 134, 051002 (2025)

总不确定度取三类估计的最大值

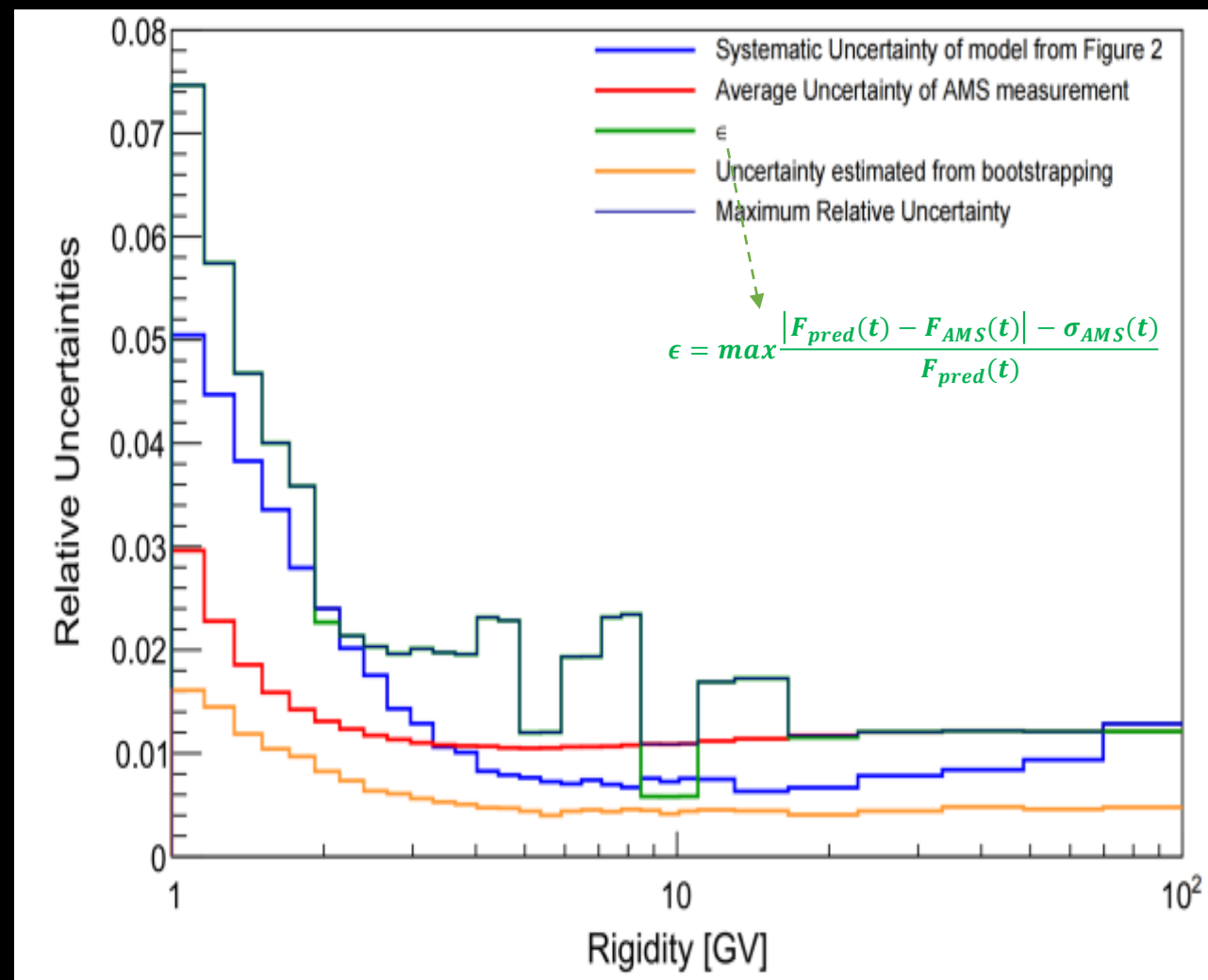
在每个能量区间上，最终误差取三类估计中的最大值。

三类来源为：测试集模型系统学、AMS 平均测量误差、后 2019 年 BR 检验误差。

这样处理的原因是：模型在后期部分时段偏差增大，仅使用单一验证结果会低估真实误差。

bootstrap 给出的独立参照整体更小，仅作为对比参考。

因此，深蓝色曲线表示的是本工作最终采用的保守总不确定性。



连续日通量补上AMS空缺，并重现已知的能量依赖周期

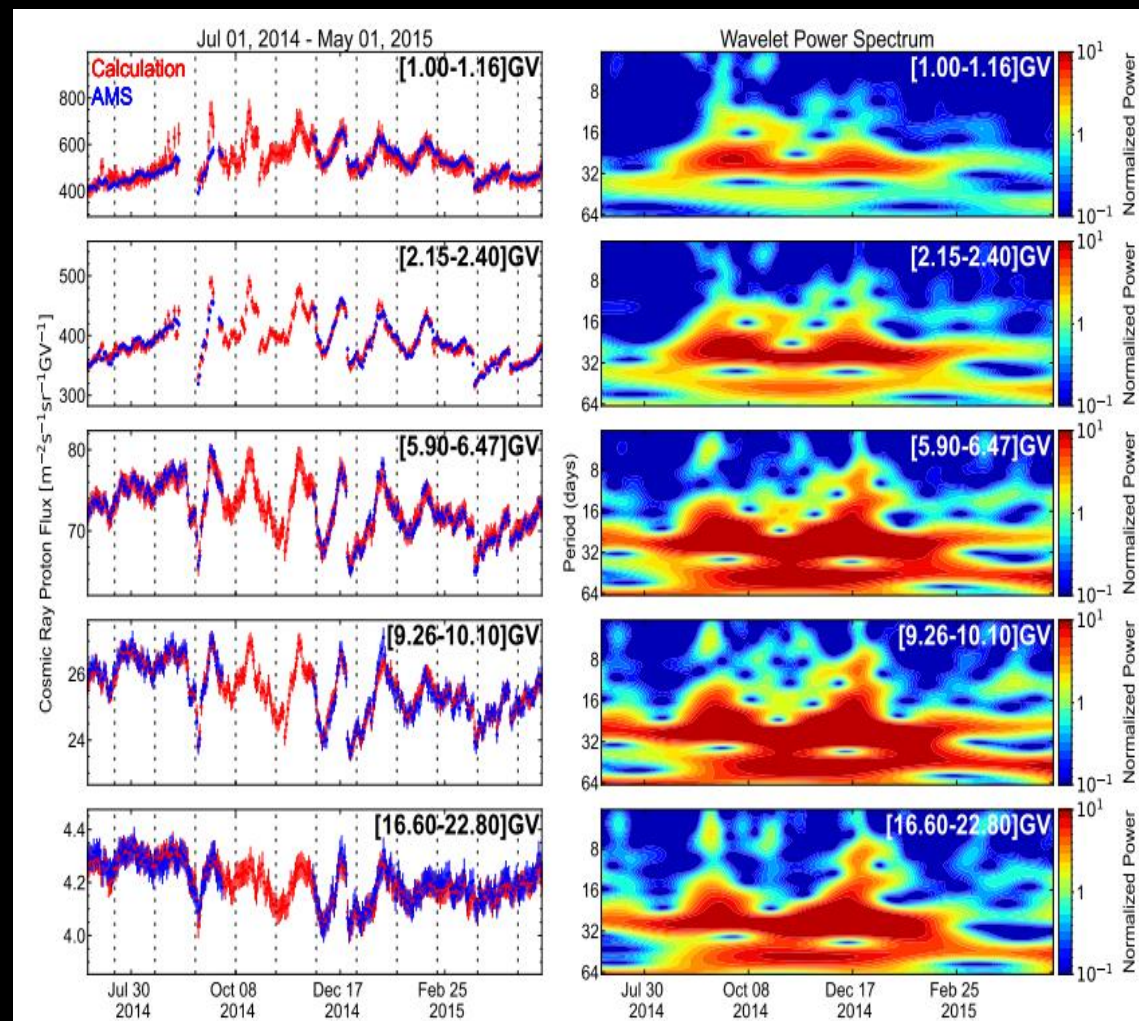
左图给出了2014年7月1日至2015年5月1日期间五个不同能量区间（由低到高）的日质子通量时间序列。

根据地面NM计数率计算得到的质子通量结果以红色表示，AMS测量结果以蓝色表示。

模型结果补上了AMS质子通量观测的空缺时段，尤其是太阳磁场反转期间。

为了与AMS已发表结果保持一致，当SEP事件发生时，相关日期3GV以下的质子通量被删除。

小波结果显示：低能量以约27天周期为主，高能量中约13.5天和9天周期更明显；磁场反转期未发现额外异常周期。



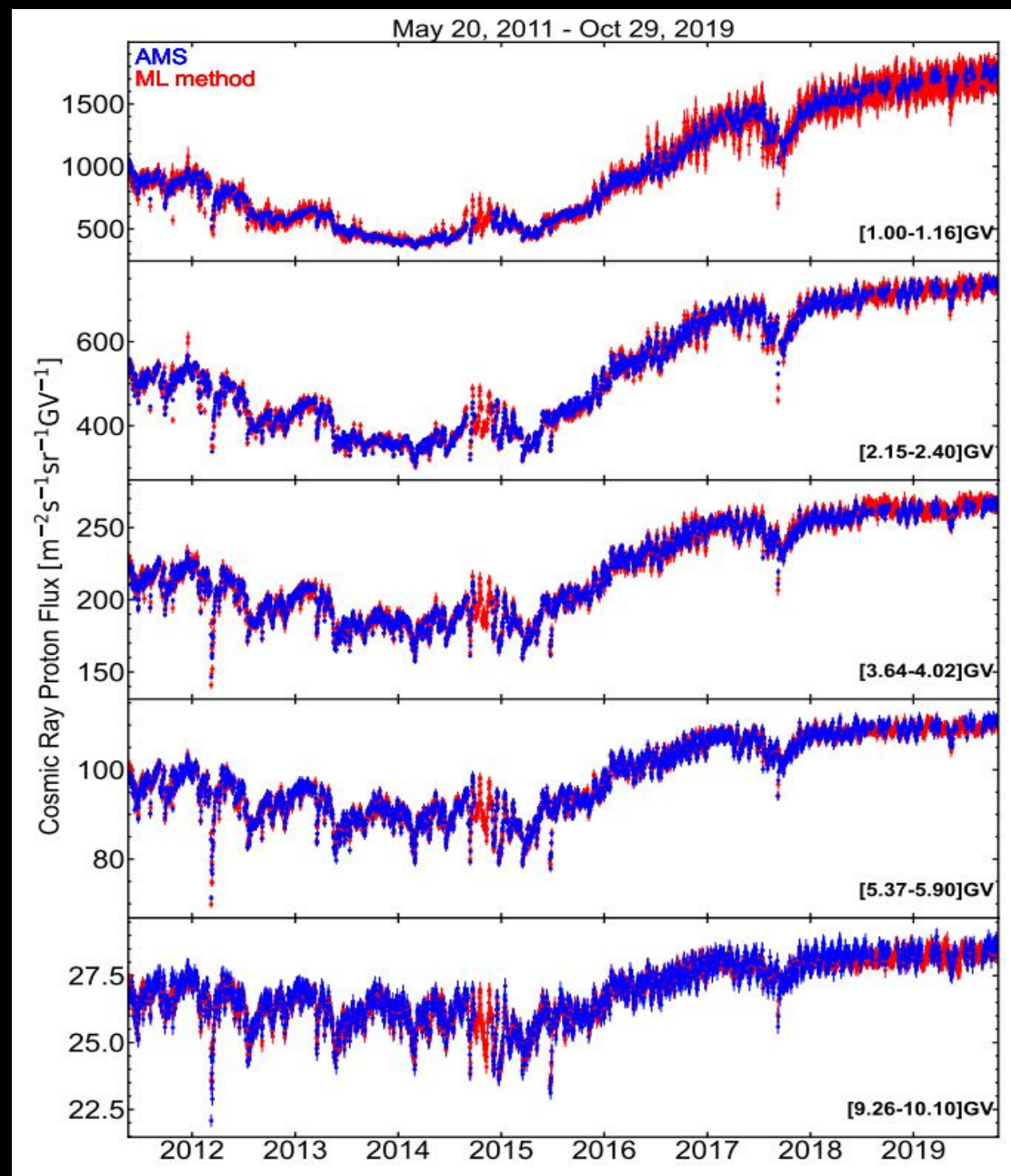
AMS, Phys. Rev. Lett. 127, 271102 (2021)

日尺度：2011–2024年1–100 GV、30段能量

利用中子监测器与 AMS 重叠时段的观测数据，建立了日分辨率质子通量重建模型。

传统上由太阳调制参数间接计算，而我们利用深度神经网络直接学习地面计数率与空间质子通量之间的对应关系。

最终得到2011–2024年、1–100 GV、30个能量区间的连续日质子通量结果，可用于能量依赖的长期太阳调制、太阳与日球层参数的相关性与滞后、以及太阳磁场反转等特殊时期的研究。



从日分辨率到小时分辨率

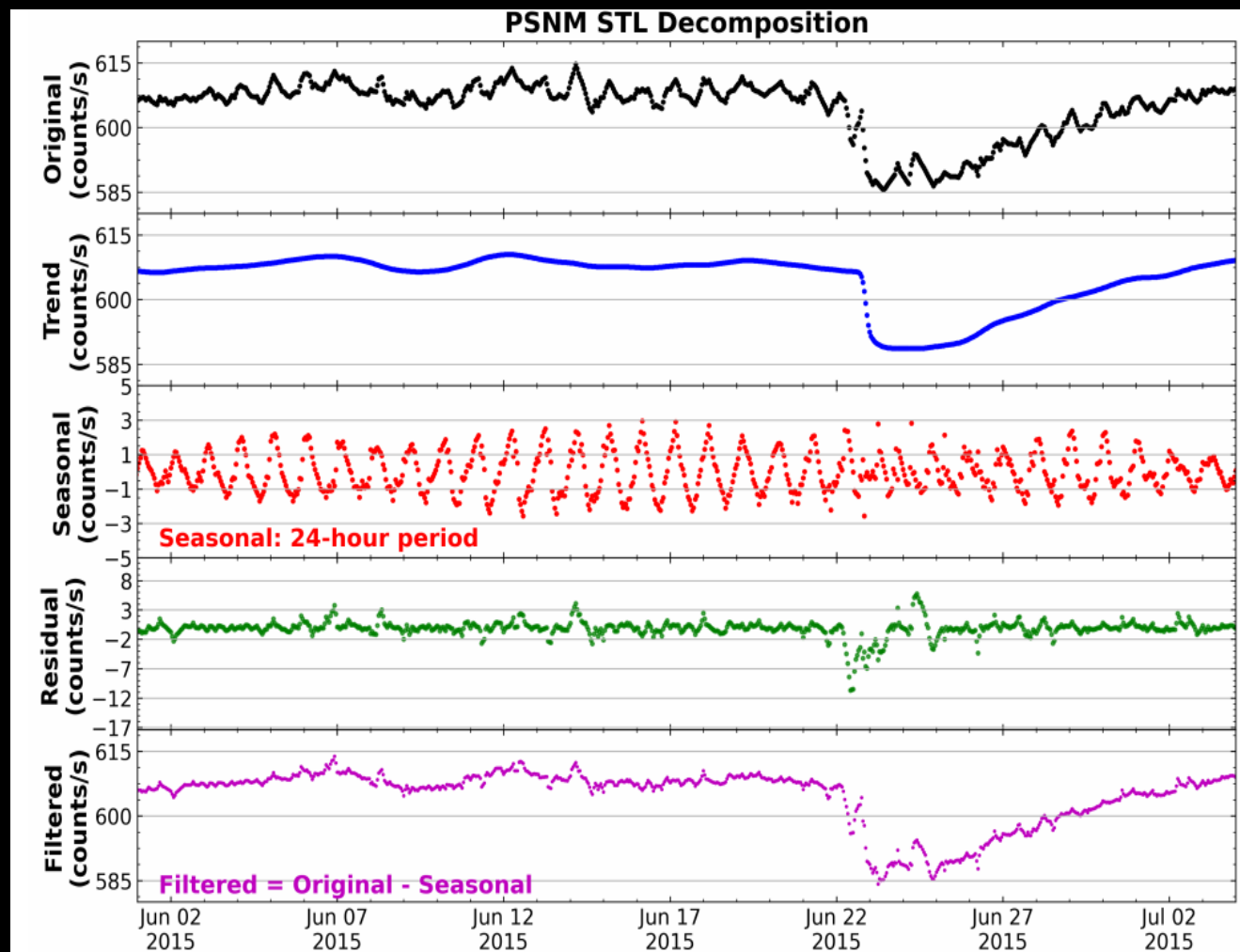
- 由于AMS测量日尺度宇宙线，而没有测量小时分辨率的宇宙线。地面中子探测器可以测量小时分辨率的计数，用于观察瞬时太阳活动影响。
- 日尺度质子能谱测量 → 小时测量
- 在进入小时尺度建模前，首先需要分离中子监测器中的地球自转日周期成分。

小时重建前，先用STL去除地面24小时周期

小时分辨率重建前，需要先处理地面中子监测器小时计数率中明显存在的24小时日周期成分。

若直接输入原始小时NM数据，24小时周期可能被带入输出结果。

我们采用 STL (Seasonal-Trend decomposition using LOESS) 提取并去除24小时季节项，再用处理后的序列建模。



STL基本消除NM中的24小时周期

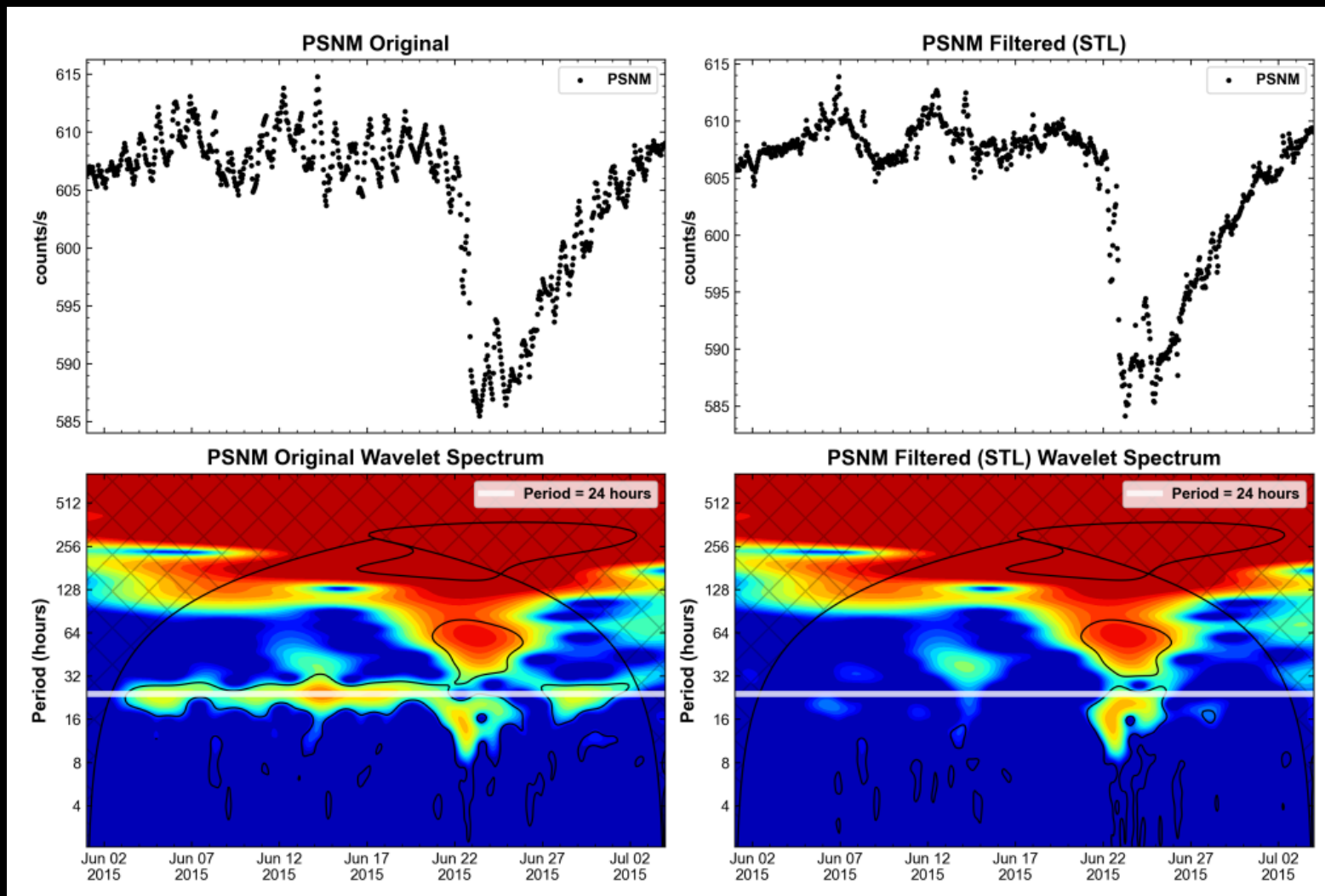
STL处理前:

STL处理后:

STL处理后:

24小时周期成分基本消失；
该图仅检查预处理效果。

它不构成小时质子通量准确性的
直接验证。

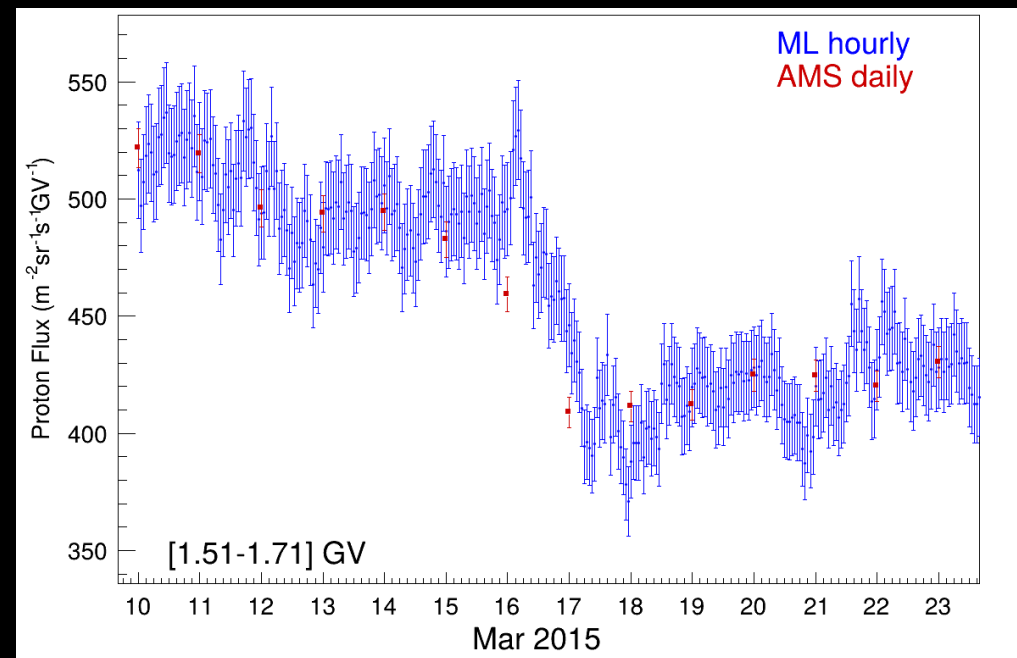


小时展示了福布什下降，但尚无AMS直接测量验证

2015年3月福布什下降期间的重建质子通量。

发现2015年3月16日和17日发生的两次福布什下降均与日冕物质抛射（ICME）有关。

相较于 AMS 每日测量，小时重建可展示更快的短时结构；目前 AMS 没有发表小时质子通量可直接验证。



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

总结：构建连续高时间分辨率宇宙线质子通量

1. AMS-02 质子通量观测时间覆盖有限、后期数据缺失，且时间分辨率不足。
2. 利用全球中子监测器长期连续观测和深度学习方法，重建了 2011–2024 年、1–100 GV、30 个能量区间的日尺度质子通量。
3. 进一步将重建扩展到小时尺度，可研究短时间尺度的宇宙线变化。
4. 中子监测器有一些长时间的问题，包括：全球变暖、地磁场减弱等。目前的CNN模型不能捕获这些长时间效应，后续利用Transformer类模型处理长时间效应。
5. 该结果可用于太阳调制宇宙线研究，特别是太阳活动、Forbush下降及短时宇宙线变化的分析。
6. 连续、高时间分辨率的质子通量也可用于近地空间辐射环境研究、空间辐射风险评估及航天任务分析。

谢谢