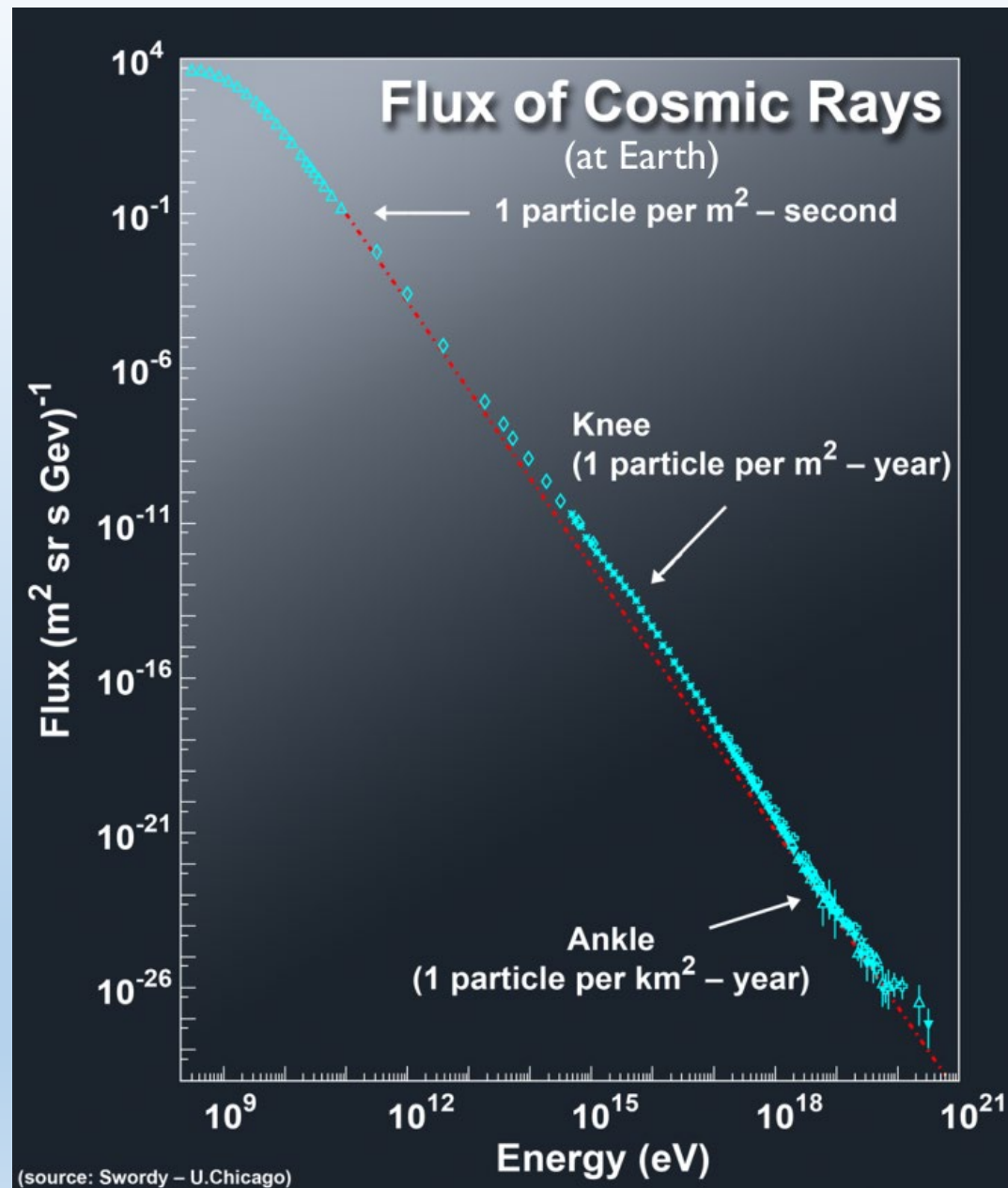


# 利用AMS02宇宙线周期性能谱 对太阳调制模型进行研究

吴娟

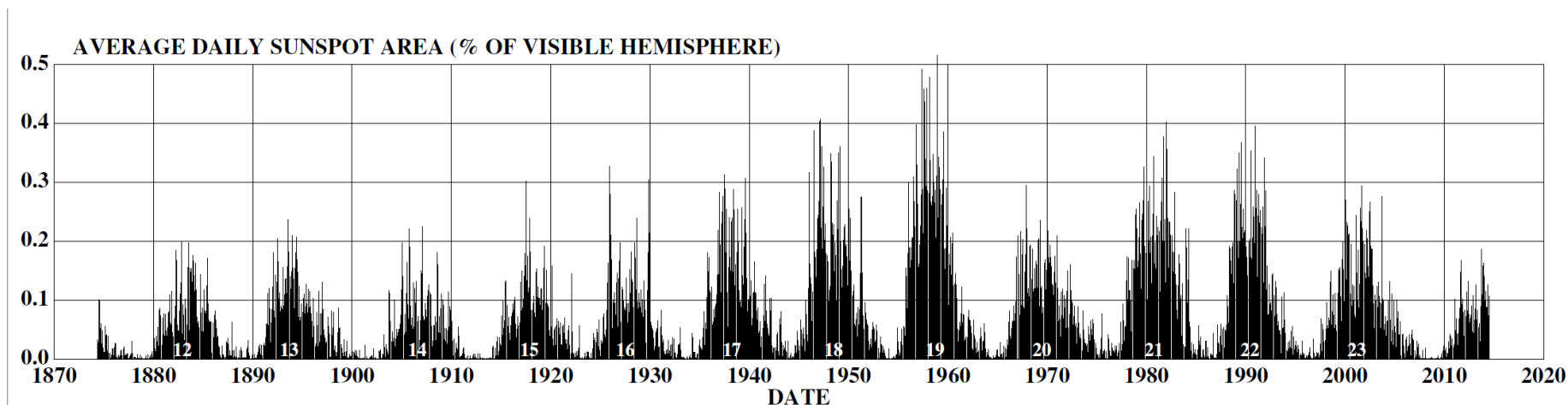
中国地质大学（武汉）

第十四届全国粒子物理学术会议（2024）



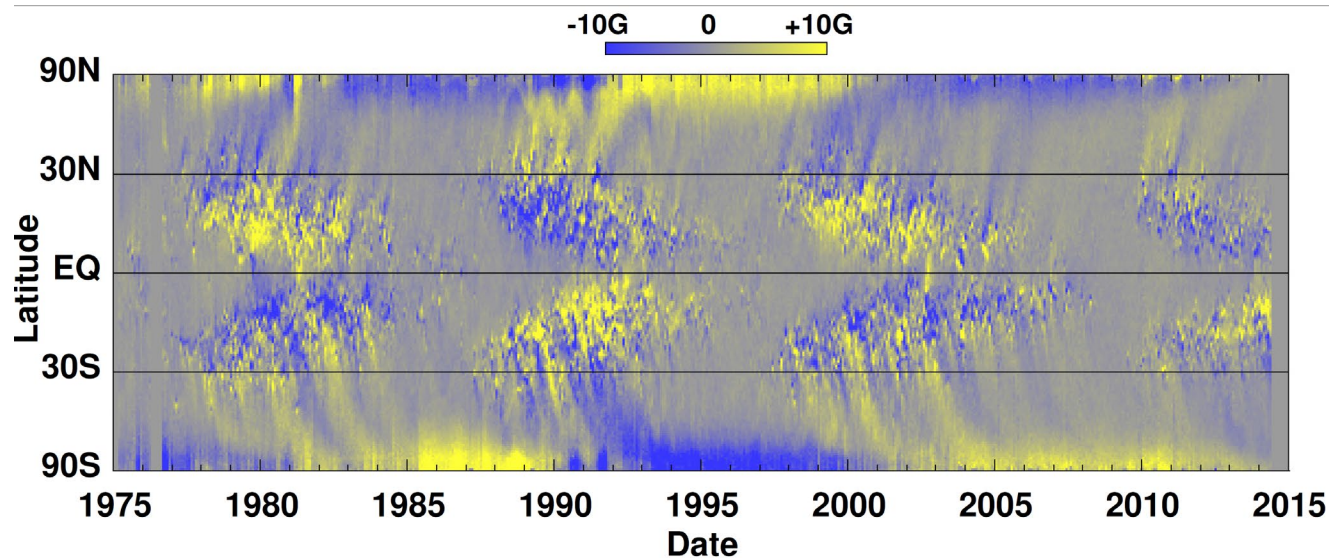
# 太阳活动的周期性变化

太阳黑子随时间的变化呈现**11年**的活动周期



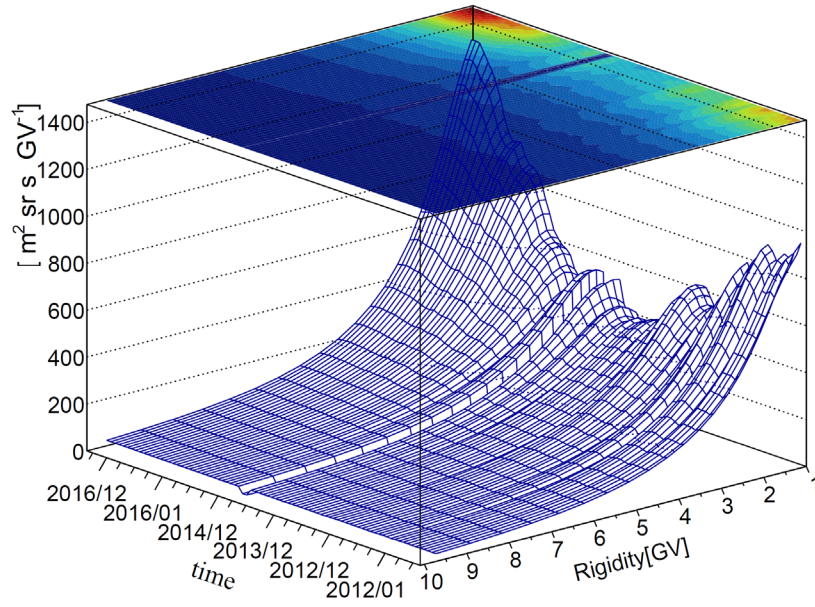
太阳磁场纬度分布随时间的变化呈现**22年**的周期

- 在相邻的**11年**周期之间南北极磁场极性发生了反转

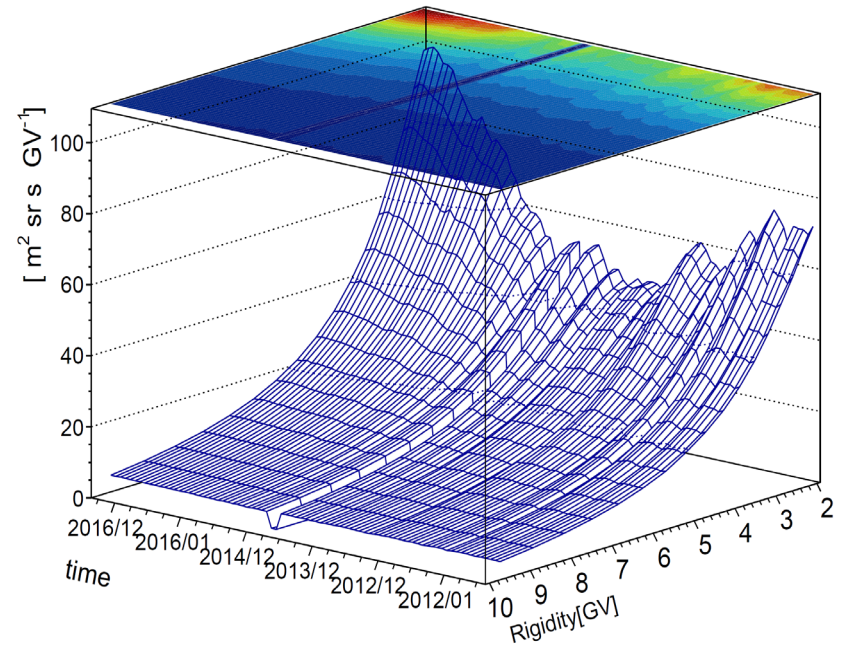


# 太阳调制介绍

AMS02 proton data



AMS02 Helium data



**Parker方程**

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

太阳风对流

漂移

扩散

绝热损失

本地宇宙线源

# 太阳调制的研究现状

求解方法 (1) 数值法: 模型描述更准确合理, 但对计算资源要求高

(2) 解析法: 基于一定的近似和简化, 但计算简单, 易于使用

最常使用的解析模型是力场近似 (**force-field approximation**, 简称**FFA**)

$$J_{TOA}(T) = \frac{T(T + 2m)}{(T + Ze\phi)(T + Ze\phi + 2m)} J_{LIS}(T + Ze\phi)$$

$\phi$ 为调制参数, 与粒子种类无关且不随粒子的能量变化

- 有研究 (如Corti2019) 显示, **FFA**模型在太阳活动较强时期无法拟合实验观测数据;
- 部分研究认为**FFA**调制参数 $\phi$ 具有能量依赖性 (如Corti2016, Cholis2016, Shen2021), 但这些研究往往依赖对宇宙线**LIS**能谱 ( $J_{LIS}$ ) 的假定。

→ 本工作将利用一种不依赖 $J_{LIS}$ 的方法来研究 $\phi$ 的能量依赖性

# 研究方法

利用 $t_1$ 时刻的地球处测得的能谱反向调制得到星际空间能谱，再利用反向调制的这一能谱调制后得到 $t_2$ 时刻的地球处能谱（Corti2019, arXiv:1910.00027）

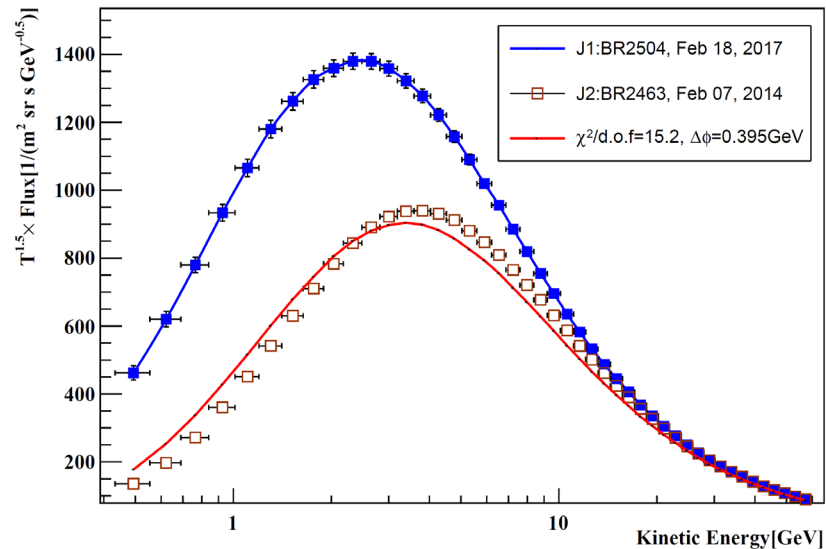
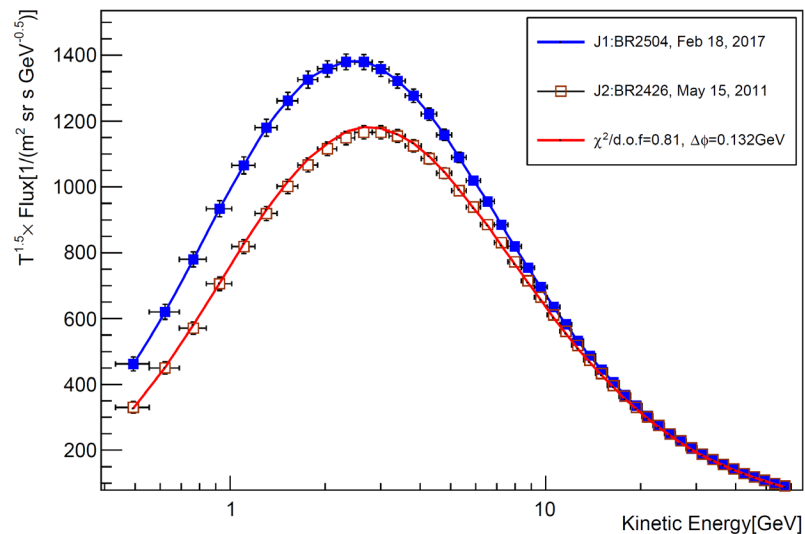
$$\begin{aligned} J_{TOA}(T, t_2) &= \frac{T(T+2m)}{(T+Ze\phi(t_2))(T+Ze\phi(t_2)+2m)} J_{TOA}(T-Ze\phi(t_1), t_1) \\ &= \frac{T(T+2m)}{(T+Ze\Delta\phi)(T+Ze\Delta\phi+2m)} J_{TOA}(T+Ze\Delta\phi, t_1). \end{aligned}$$

其中  $\Delta\phi = \phi(t_2) - \phi(t_1)$

选择太阳活动较小时期为基准时刻 $t_1$ ，利用 $t_1$ 时刻的能谱观测数据即可计算任意 $t_2$ 时刻的能谱，与实验数据比较计算 $\Delta\phi$ 的最佳值。



# 研究结果



选择流强最大的BR2504为基准时刻 $t_1$ ，计算的 $t_2$ 为BR2426时和观测结果较为一致； $t_2$ 为BR2463时与观测结果吻合不好。



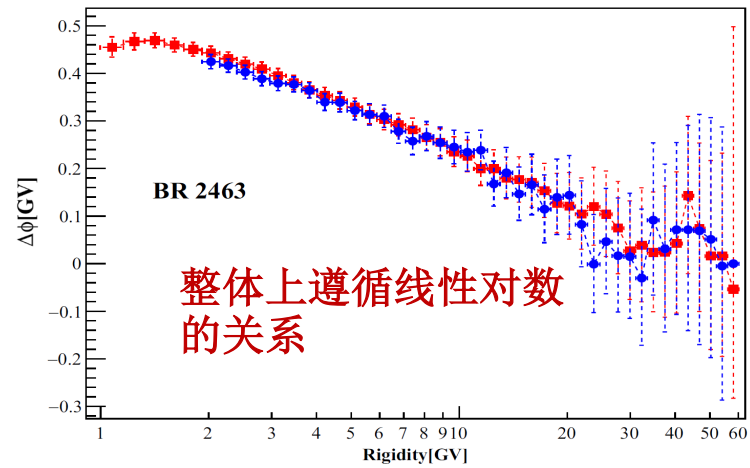
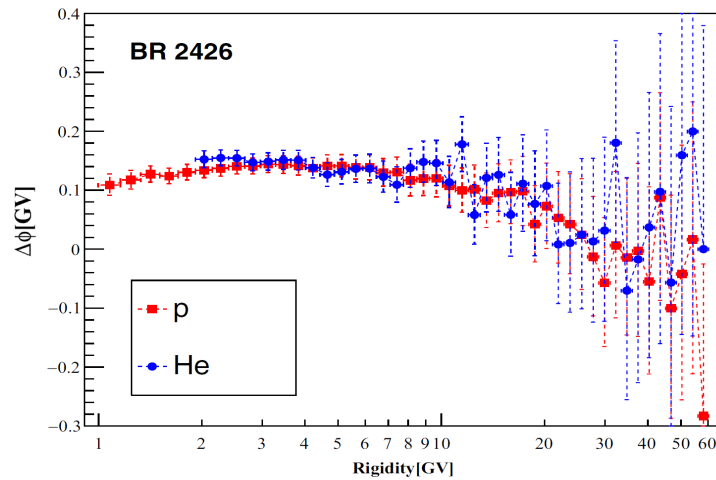
进一步说明：

在太阳活动较小时期，可以用统一的 $\phi$ 参数来描述调制效应；  
在太阳活动较强时期，不同能量处 $\phi$ 参数可能不一致。

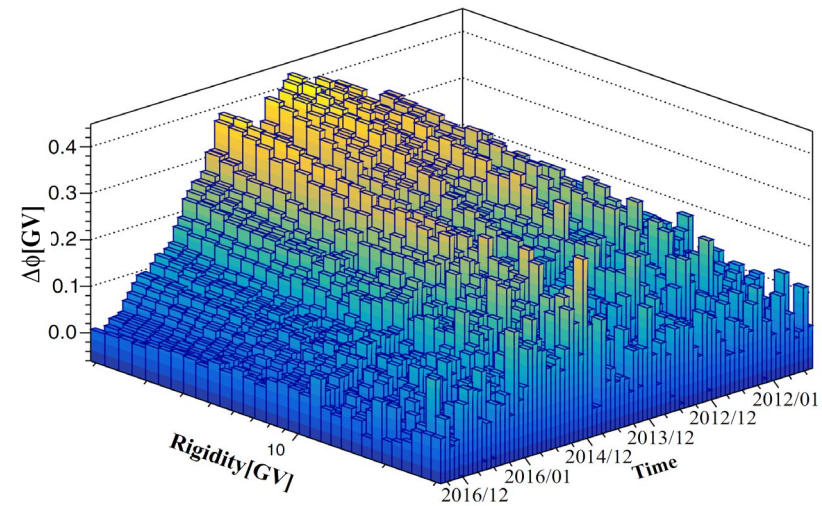
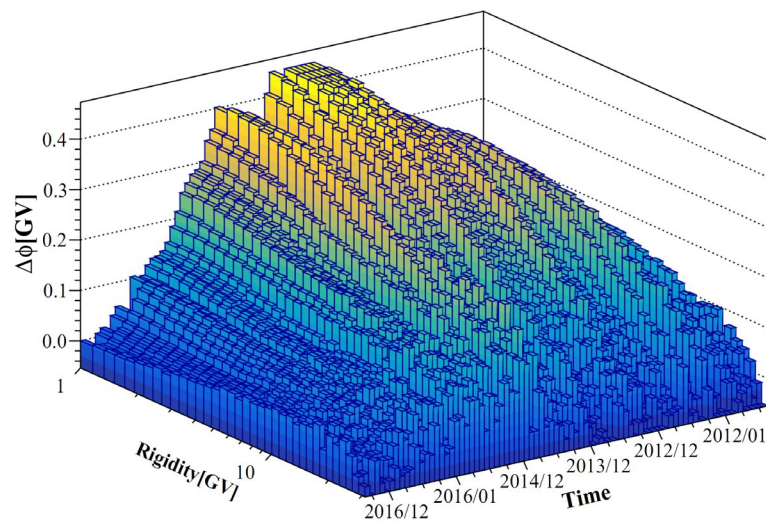
# 研究结果

Long&Wu, PRD 109, 083009 (2024)

BR2426和BR2463时期， $\Delta\phi$ 参数随磁刚度的变化



2011-2017年间， $\Delta\phi$ 参数随磁刚度R的变化（左边为拟合质子的结果，右边为拟合氦核的结果）



# 研究结果

以纯扩散模型为例:

采用不依赖能量（刚度）的 $\phi$

EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	PARABOLIC ERROR	MINOS ERRORS	
				NEGATIVE	POSITIVE
1	D0_xx	3.71995e+28	2.48444e+26	-2.46106e+26	2.45635e+26
2	D_g_1	-3.31963e-01	1.54277e-02	-1.51973e-02	1.35203e-02
3	D_g_2	4.51004e-01	5.13863e-03	-4.92774e-03	5.07187e-03
4	D_rigid_br	5.35318e+03	1.95264e+01	-3.55968e+01	3.55888e+01
5	D_g_3	3.40102e-01	1.31223e-02	-1.31062e-02	1.31842e-02
6	D_rigid_br2	2.60923e+05	2.47357e+04	-2.33195e+04	3.60497e+04
7	eta_t	2.36519e+00	8.15960e-02	-8.05611e-02	8.17490e-02

采用依赖能量（刚度）的 $\phi$

EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	PARABOLIC ERROR	MINOS ERRORS	
				NEGATIVE	POSITIVE
1	D0_xx	3.87834e+28	3.21516e+26	-3.17726e+26	3.21339e+26
2	D_g_1	-1.73340e-01	1.64804e-02	-1.60090e-02	1.60402e-02
3	D_g_2	4.61743e-01	5.11265e-03	-5.02952e-03	5.02447e-03
4	D_rigid_br	6.14317e+03	7.19557e+01	-7.03378e+01	7.24583e+01
5	D_g_3	3.47092e-01	1.29891e-02	-1.44202e-02	1.31314e-02
6	D_rigid_br2	2.69635e+05	2.38093e+04	-2.48963e+04	2.82837e+04
7	eta_t	2.08384e+00	1.02907e-01	-9.87836e-02	9.94601e-02

→ 对低能区扩散指数的估算具有较大影响



# 总结

- 利用不依赖宇宙线星际能谱的方法，对力场近似中调制参数 $\phi$ 对能量的依赖性进行了研究；
- 结果显示调制参数 $\phi$ 在太阳活动较强时期显示出明显的能量（磁刚度）依赖性，与磁刚度整体上遵循线性对数的关系；
- 结合修正后的力场近似模型（采用了随能量变化的 $\phi$ ），对宇宙线低能区传播参数的影响显著；
- 下一步将结合反质子周期性数据，研究 $\phi$ 随能量的变化关系是否与由质子氦核得到的结果一致。