

基于AMS测量轻核宇宙线时变流强

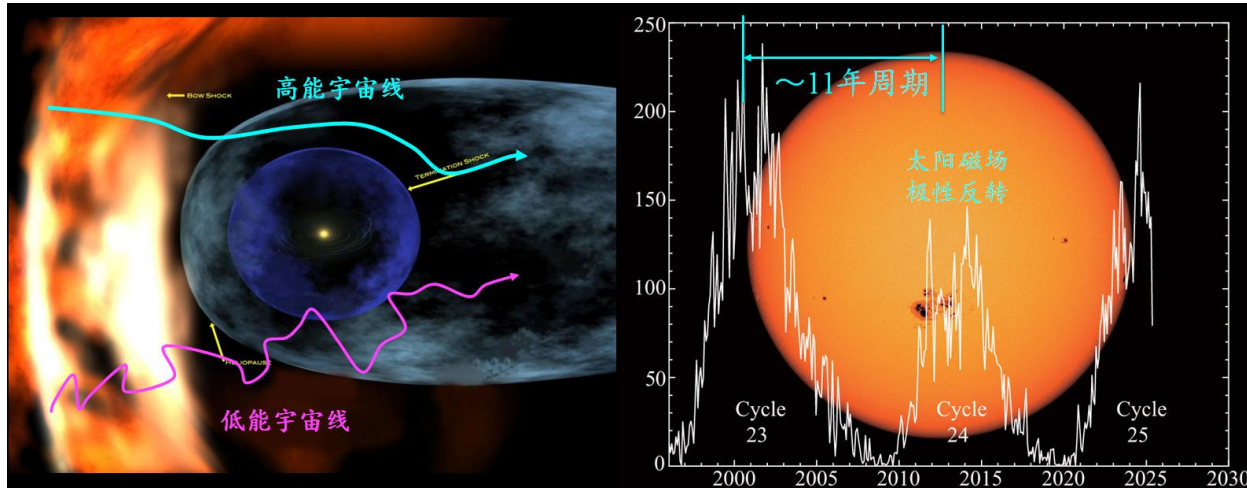
邹廉坤

山东高等技术研究院 (SDIAT)

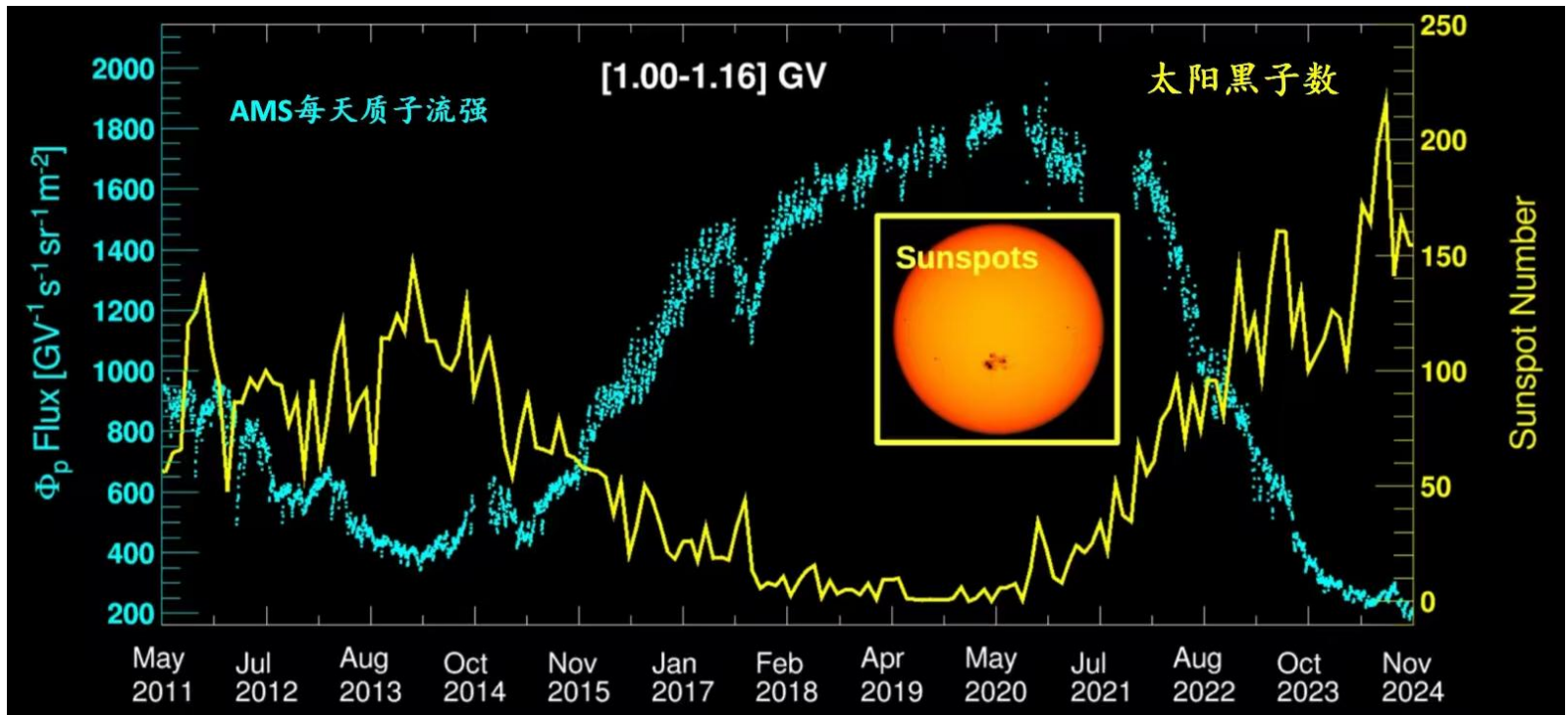
2026.07.16

中国物理学会高能物理分会第十二届全国会员代表大会暨学术年会

宇宙线在太阳系内的传播

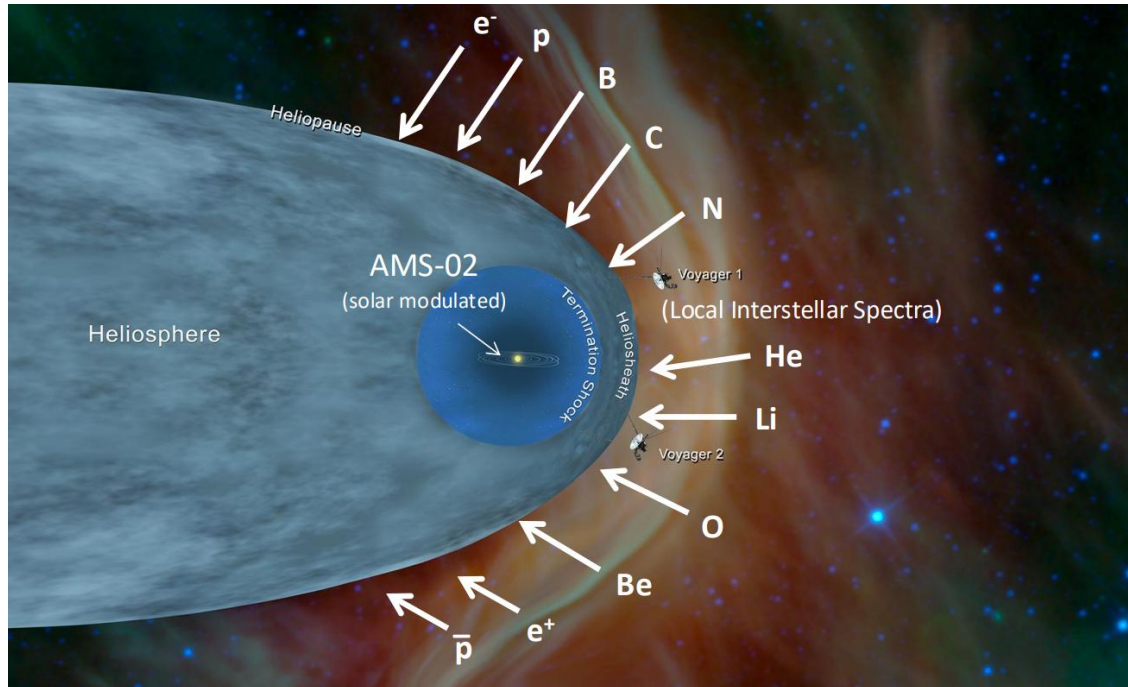


AMS 可以在近两个完整太阳周期 (2011-2030) 内精确测量宇宙线变化规律



太阳调制

进入日球层的银河宇宙线（GCRs）会经历扩散、对流、绝热能损与磁漂移过程（该过程由帕克方程描述），这一系列效应统称为太阳调制。



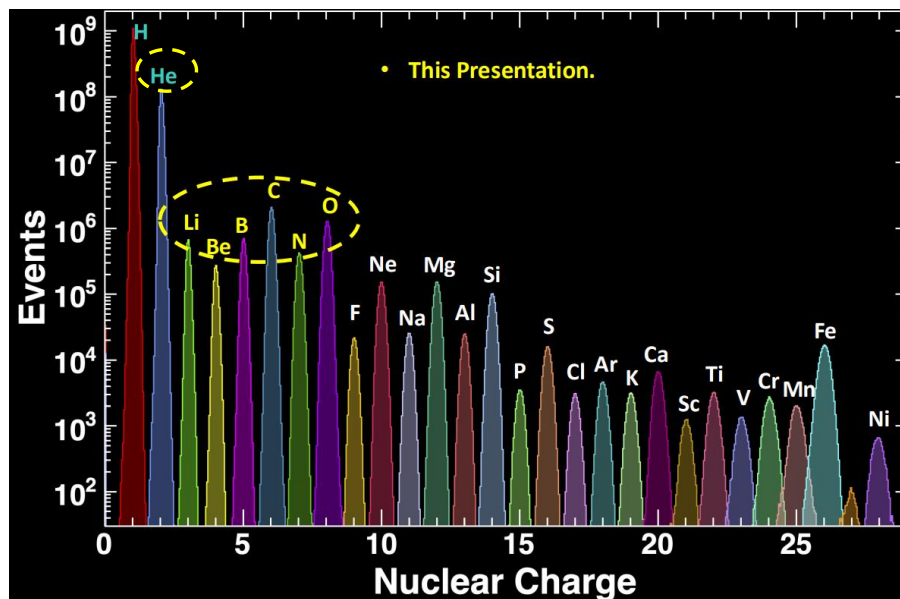
依据现有模型，不同原子核宇宙线的太阳调制差异可归因于两点

- 进入日球层的宇宙线能谱形状存在区别
- 各类宇宙线原子核粒子的运动速度不同

对具有不同能谱形状、不同荷质比（质量数 / 电荷数， A/Z ）的宇宙线原子核流强随时间演化的观测，能够为理解银河宇宙线在日球层内的传播过程以及太阳调制效应提供关键依据。

阿尔法磁谱仪 (AMS) 宇宙线轻核测量最新成果

此前 AMS 观测到，宇宙线中电荷数满足 ($2 \leq Z \leq 8$) 的原子核可划分为三组，各组刚度谱形状差异显著：氢、碳、氧核以原初宇宙线成分为主；锂、铍、硼核为次级宇宙线；氮核则同时包含原初与次级两种组分。这三类原子核的能谱形状与荷质比 (A/Z) 均存在明显区别。



本报告将展示 AMS 在 2011 年 5 月至 2022 年 11 月期间测得的氢、锂、铍、硼、碳、氮、氧原子核以 27 天 (1 个 Bartel's Rotation, BR) 为基本测量时间段的流强数据。

宇宙线轻核流强时间演化

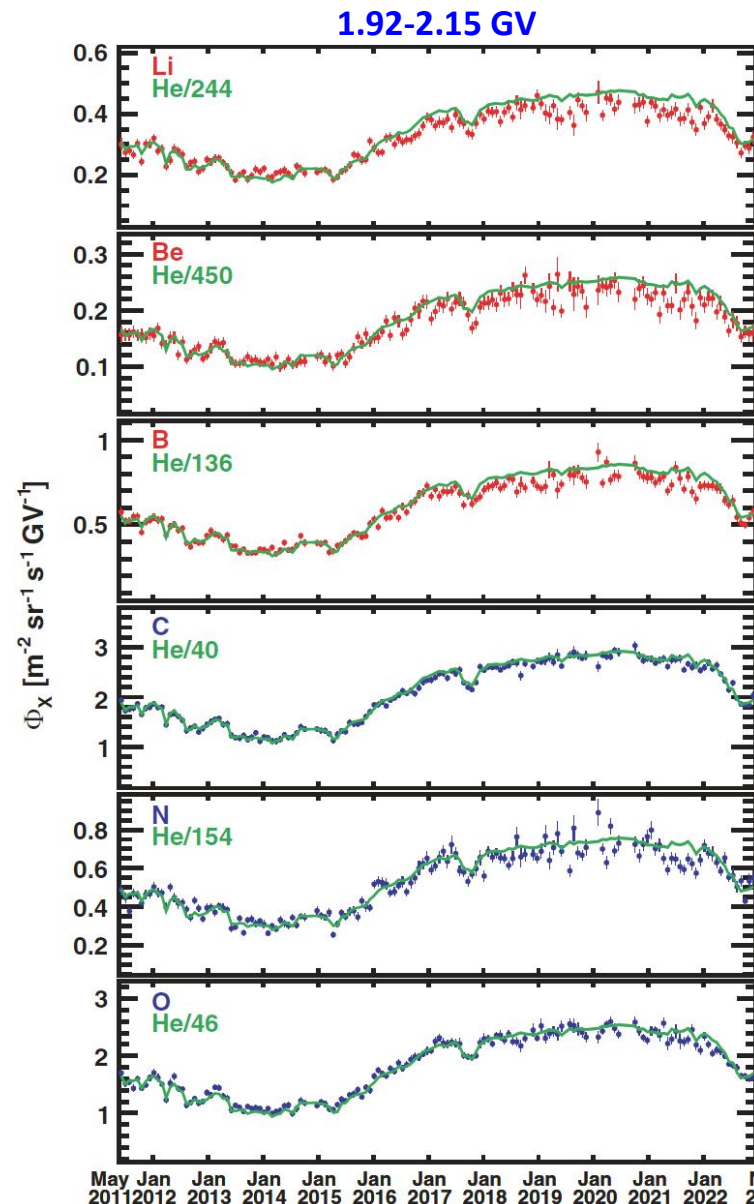
第j个BR周期、刚度区间
 $[R_i, R_i + \Delta R_i]$ 内的宇宙线流强 Φ_i^j :

$$\Phi_i^j = \frac{N_i^j}{A_i^j \epsilon_i^j T_i^j \Delta R_i}$$

有效接收度
 触发效率
 曝光时间
 刚度bin宽度

扣除本底并完成bin迁移修正后的有效事例数

- 本研究测量了 2 GV 至 60 GV 区间内轻核的流强时间演化, 有效统计事例数分别为: 氦核 9.61 亿、锂核 530 万、铍核 260 万、硼核 780 万、碳核 2610 万、氮核 660 万、氧核 2210 万。
- 所有核素的流强均呈现相似的长期与短期时间变化特征。
- 流强与太阳活动呈负相关: 太阳活动高年流强偏低, 太阳活动低年流强偏高。

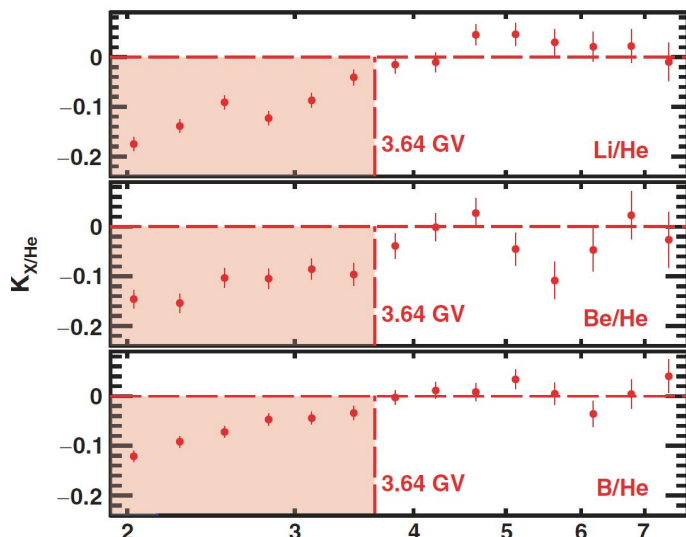
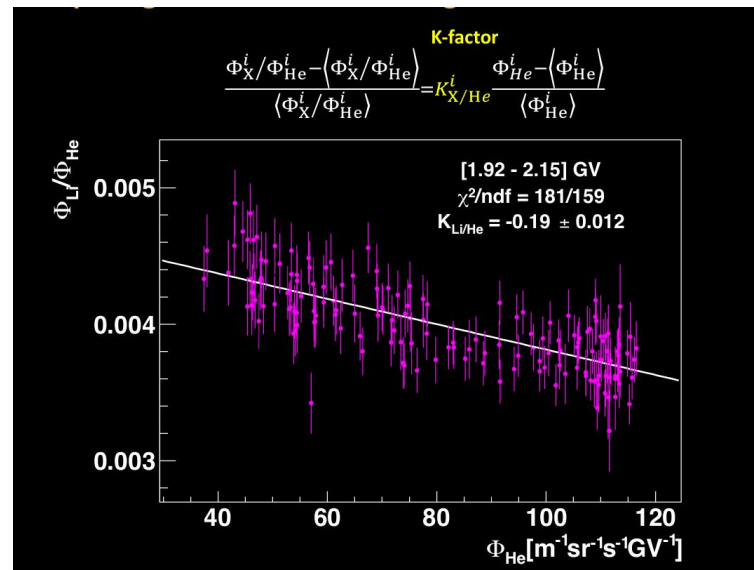


轻核宇宙线的太阳调制研究

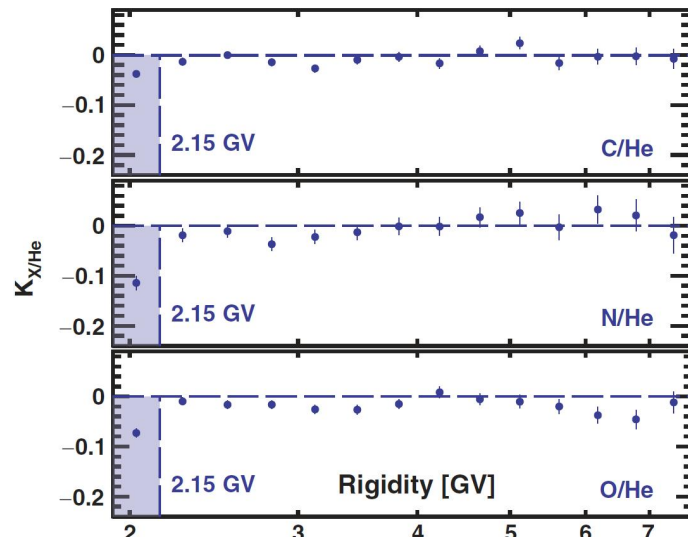
为研究各类原子核太阳调制效应的差异，我们对第*i*个刚度bin定义流强相对变化量，表达式如下：

$$\frac{\Phi_X^i/\Phi_{\text{He}}^i - \langle \Phi_X^i/\Phi_{\text{He}}^i \rangle}{\langle \Phi_X^i/\Phi_{\text{He}}^i \rangle} = K_{X/\text{He}}^i \frac{\Phi_{\text{He}}^i - \langle \Phi_{\text{He}}^i \rangle}{\langle \Phi_{\text{He}}^i \rangle}$$

参数 *K* 表示到该原子核与氦核之间太阳调制的相对强弱程度：
K=0表示受调制与氦相同；*K*<0 (>0)表示受调制弱于(大于)氦



刚度小于3.64GV时，锂、铍和硼受到的调制弱于氦



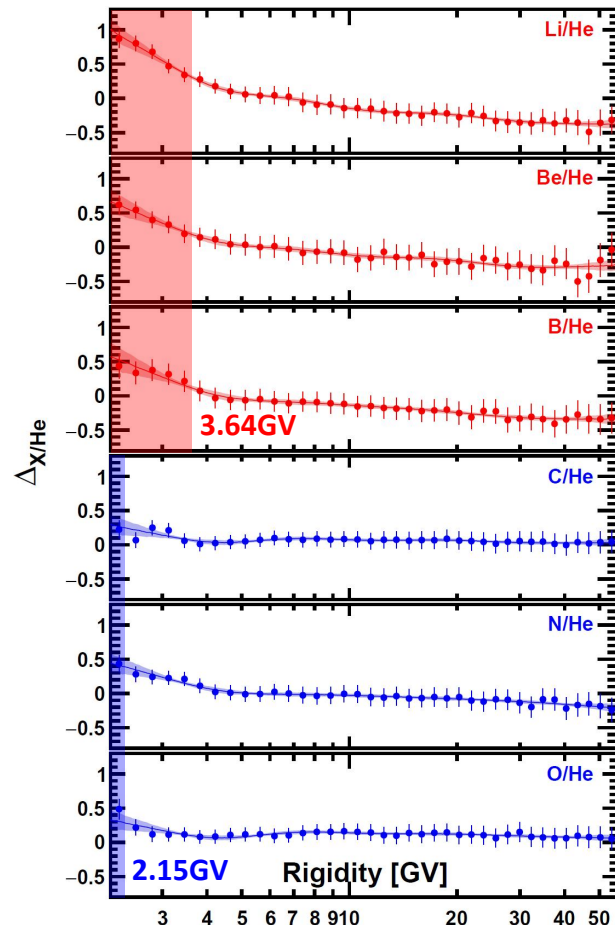
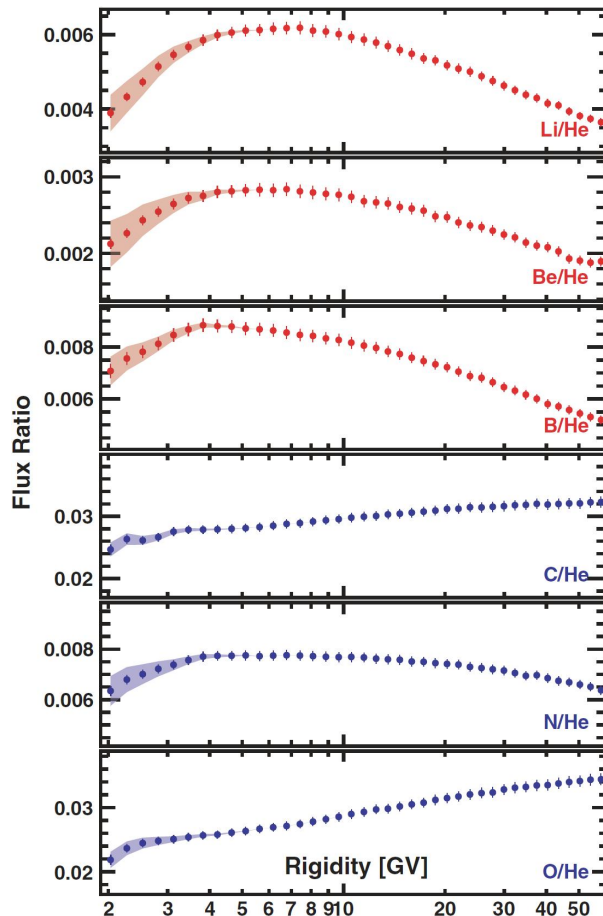
刚度小于2.15GV时，碳、氮和氧受到的调制弱于氦

能谱形状对太阳调制的贡献

为不依赖模型地探究太阳调制的能谱相关性，我们利用下式计算流强比值的谱指数 $\Delta_{X/He}$ ：

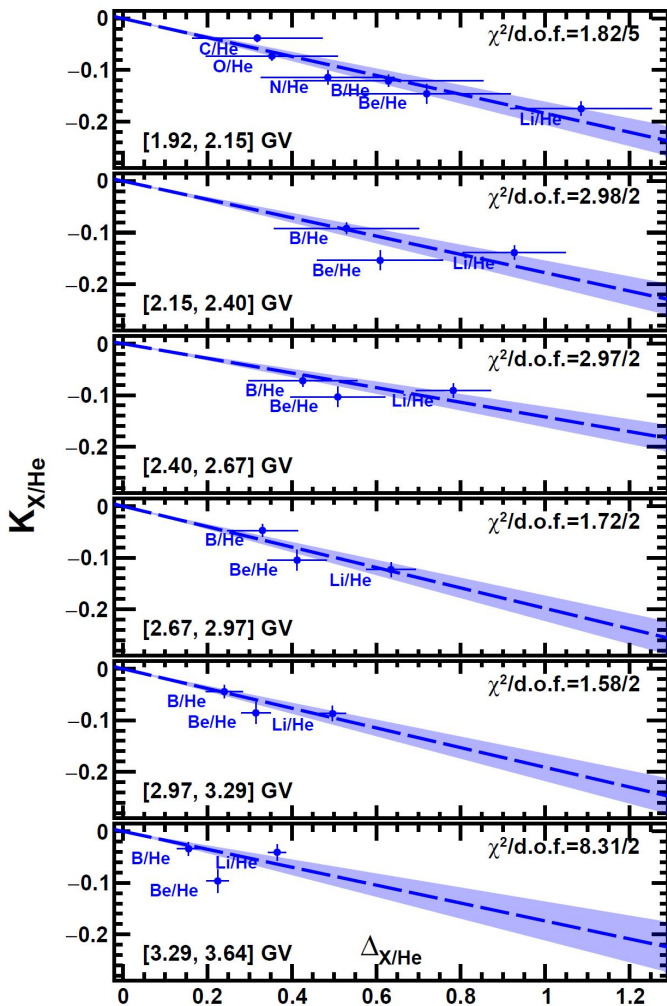
$$\Delta_{X/He} = \frac{d[\log\langle\Phi_X^i/\Phi_{He}^i\rangle]}{d[\log(R)]}$$

采用包含连续 3 个刚度bin的滑动窗口。



在刚度低于 3.64 GV 区间，Li/He、Be/He、B/He 流强比的谱指数大于 0；在刚度低于 2.15 GV 区间，C/He、N/He、O/He 流强比的谱指数同样大于 0。这说明在上述刚度范围内，氦核流强随刚度变化的更陡（即随刚度升高衰减速度更快），显著快于锂、铍、硼、碳、氮、氧核流强的衰减速率。

能谱形状对太阳调制效应的贡献



我们对 $\Delta_{X/He}$ 与 $K_{X/He}$ 二者的关联进行拟合，拟合形式为

$$K_{X/He} = \xi \Delta_{X/He},$$

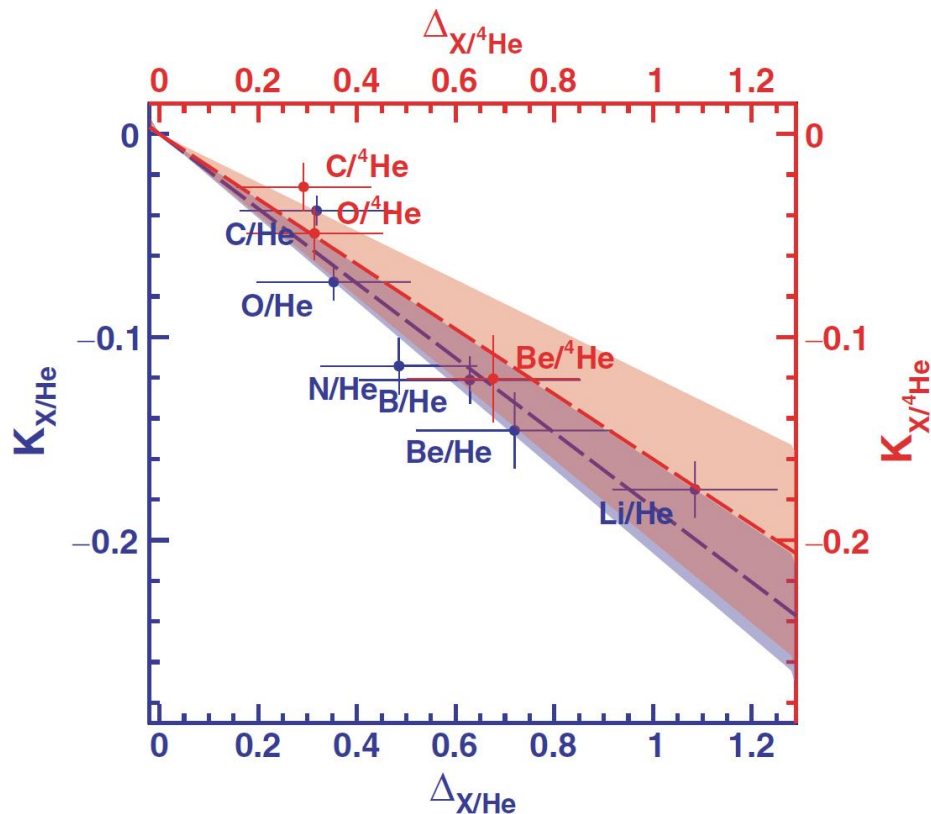
拟合得到如下结果:

R (GV)	ξ
1.92–2.15	-0.18 ± 0.02
2.15–2.40	-0.18 ± 0.02
2.40–2.67	-0.14 ± 0.02
2.67–2.97	-0.20 ± 0.02
2.97–3.29	-0.19 ± 0.03
3.29–3.64	-0.17 ± 0.04

所有参数 ξ 均与不随刚度变化的平均值 -0.175 ± 0.010 在误差范围内一致。 ξ 取负值表明：能谱斜率更陡的原子核，其流强受到的太阳调制幅度更强。

太阳调制的速度相关性研究

为采用无模型依赖方法定量估算速度效应的大小，我们对比了铍、碳、氧核与氦-4 核流强随时间的变化。由于这四种原子核荷质比 A/Z 相同，同一刚度下粒子速度相等，由此可判定太阳调制中的速度效应几乎可以忽略。



- $K_{Be/4He}$, $K_{C/4He}$, $K_{O/4He}$ 分别与 $K_{Be/He}$, $K_{C/He}$, $K_{O/He}$ 在误差范围内一致。
- 由线性关系 $K_{X/4He} = \xi' \Delta_{X/4He}$ 拟合得到的参数 ξ' , 与此前的 ξ 在误差范围内一致
- 相较于能谱形状带来的贡献, 太阳调制中的速度效应十分微弱。

PHYSICAL REVIEW LETTERS **134**, 051001 (2025)