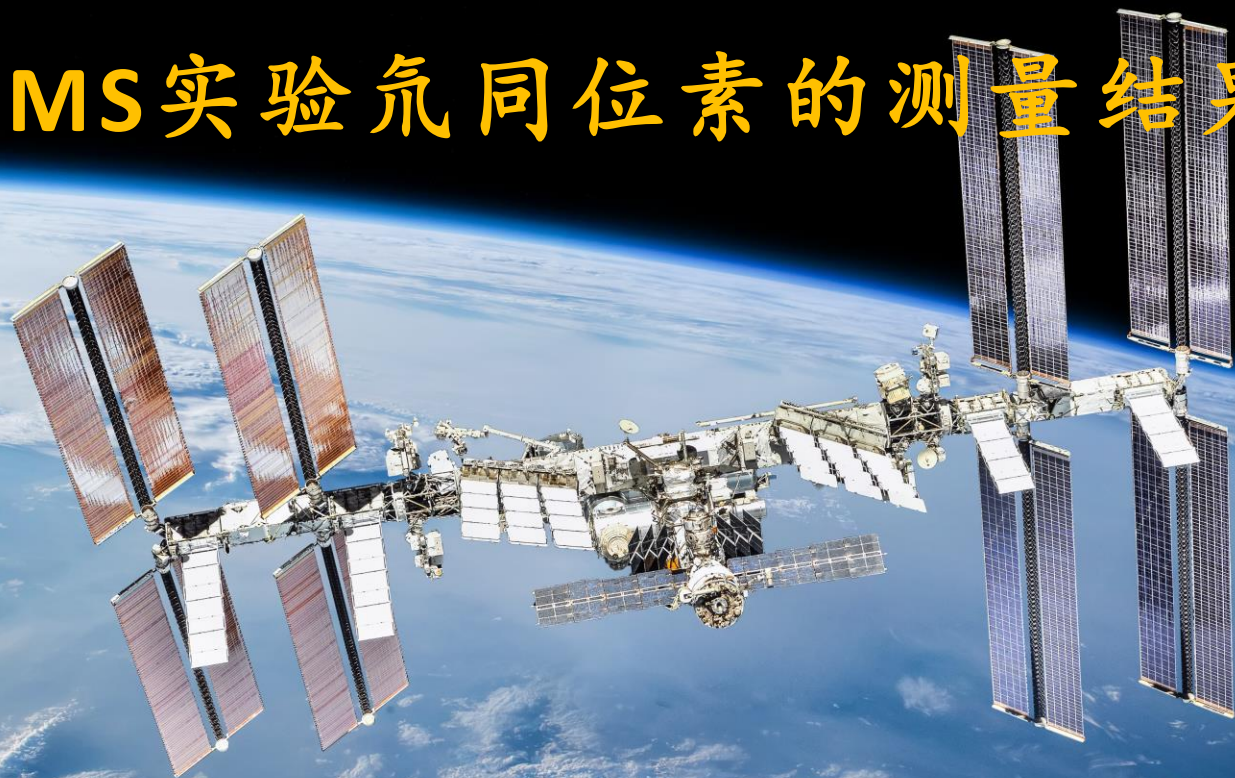


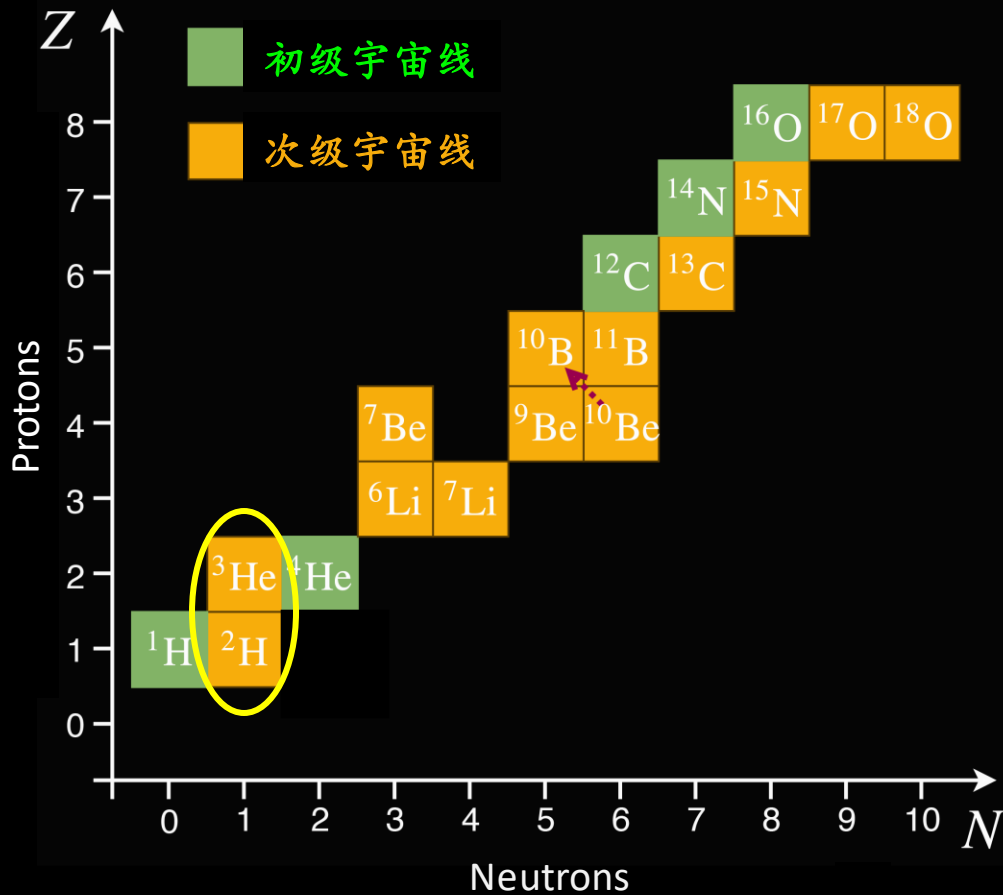
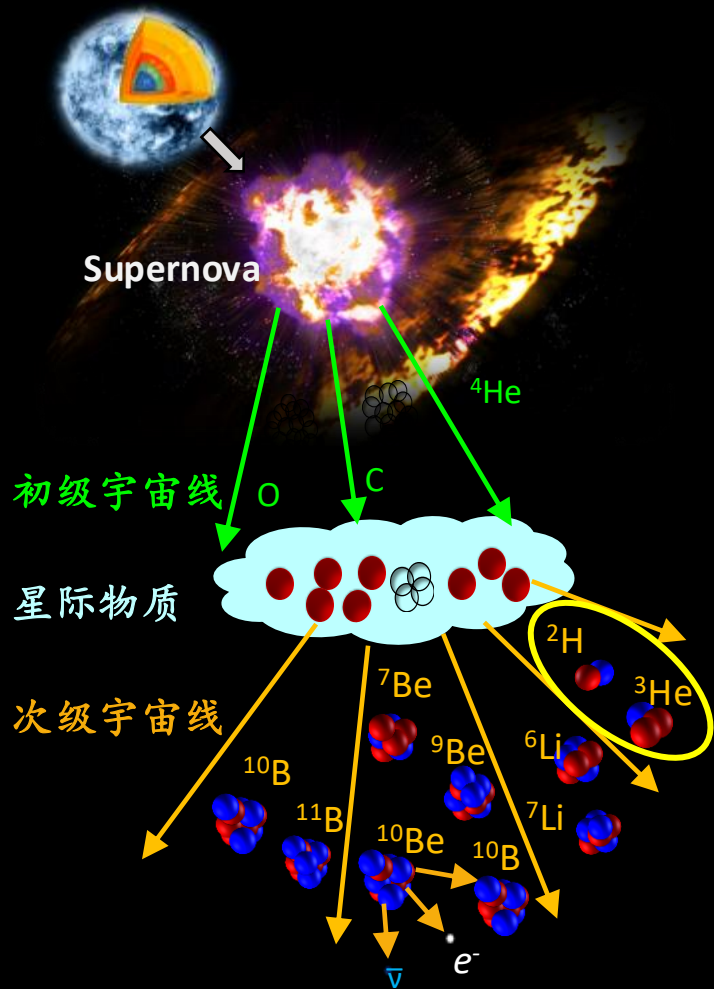
AMS实验氦同位素的测量结果



许伟伟

山东大学 / 山东高等技术研究院

宇宙线同位素的起源



氦和氦同位素

宇宙大爆炸产生的原初 $D/p \sim 10^{-5}$ 。

理论认为，宇宙线中的 D 和 ${}^3\text{He}$ 是次级宇宙线，由 ${}^4\text{He}$ 等原子核的碎裂产生。

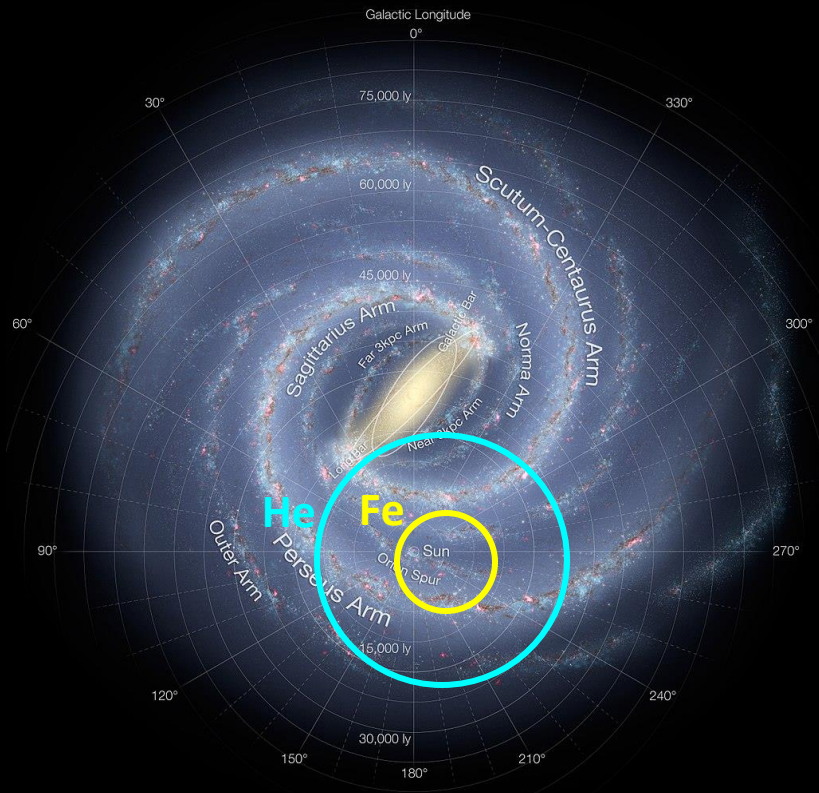
宇宙线有效传播距离 $\propto R^{4/2} A^{-1/3}$

(刚度 $R=p/Z$, p 是动量, Z 是电荷, A 是质量)

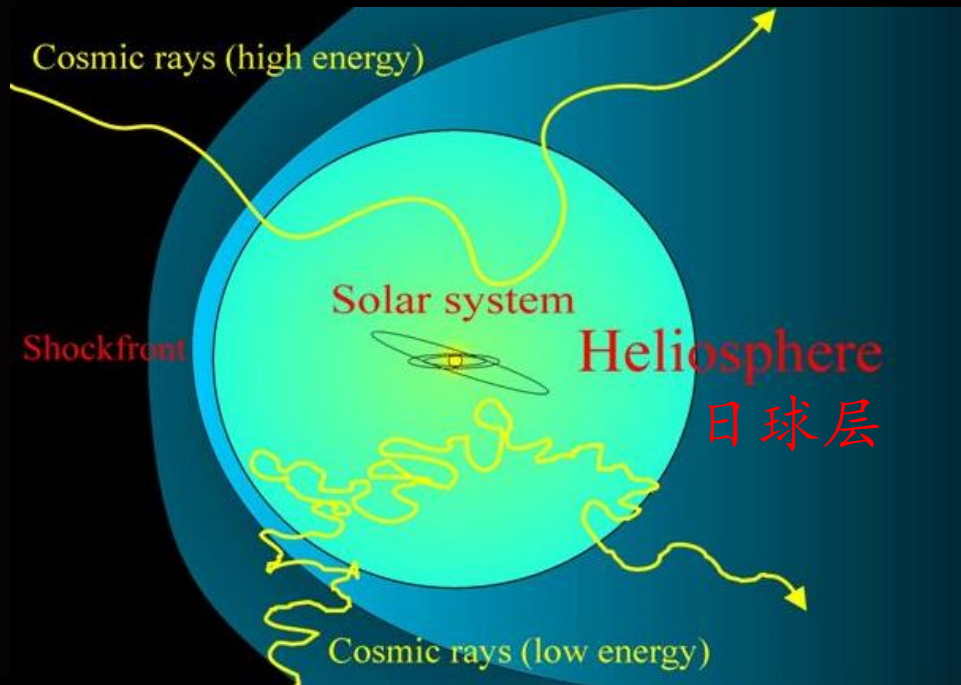
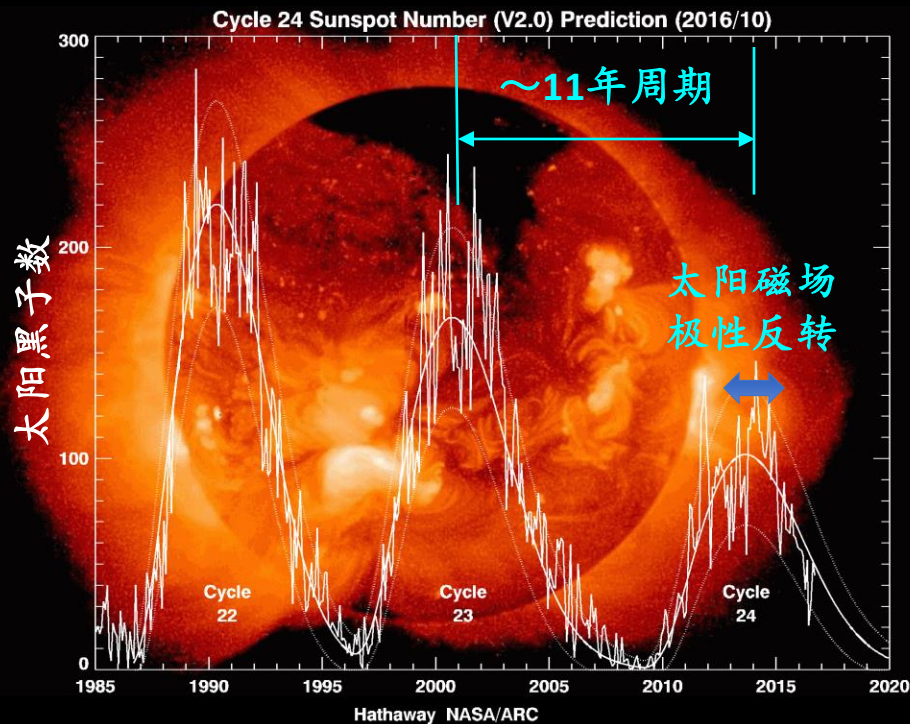
He 碎裂截面更大, 传播距离长, 来自更远的银河系空间。

D 和 ${}^3\text{He}$ 荷质比(Z/A)不同, 可以区分传播模型中的动能依赖性和刚度依赖性。

$({}^4\text{He}, \text{C}, \text{O}, \dots) + \text{星际介质} \rightarrow (D, {}^3\text{He}) + X$



宇宙线在太阳系内的传播



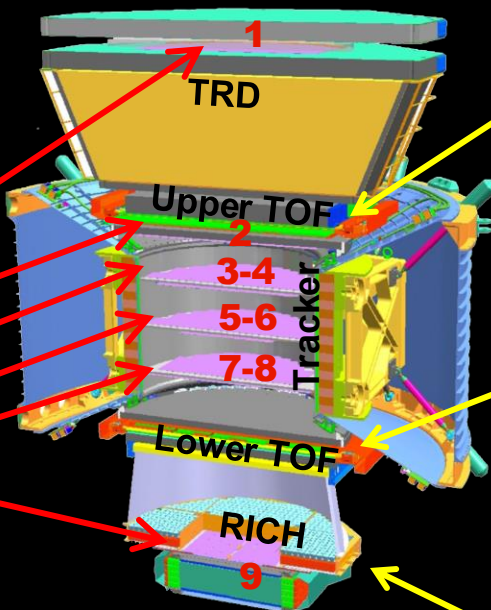
受太阳活动和太阳系磁场的影响，宇宙线的能谱发生改变且随时间变化。

氦的A/Z比值和氦-4相同，D/⁴He流强比受到太阳调制的影响更小。

AMS同位素测量：相同电荷Z，不同质量M

$$M = \frac{RZ}{\beta\gamma}$$

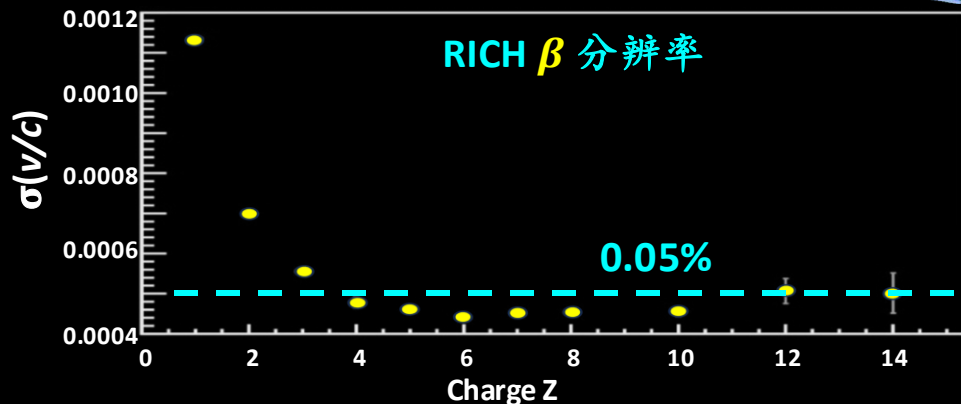
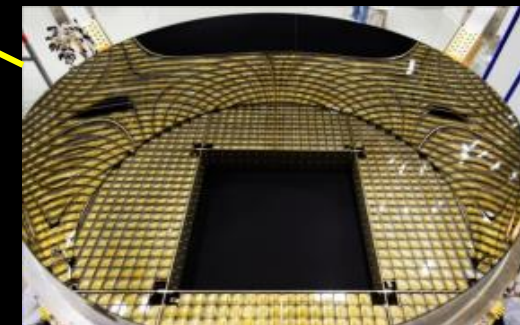
硅径迹探测器Tracker + 磁铁
测量R and Z



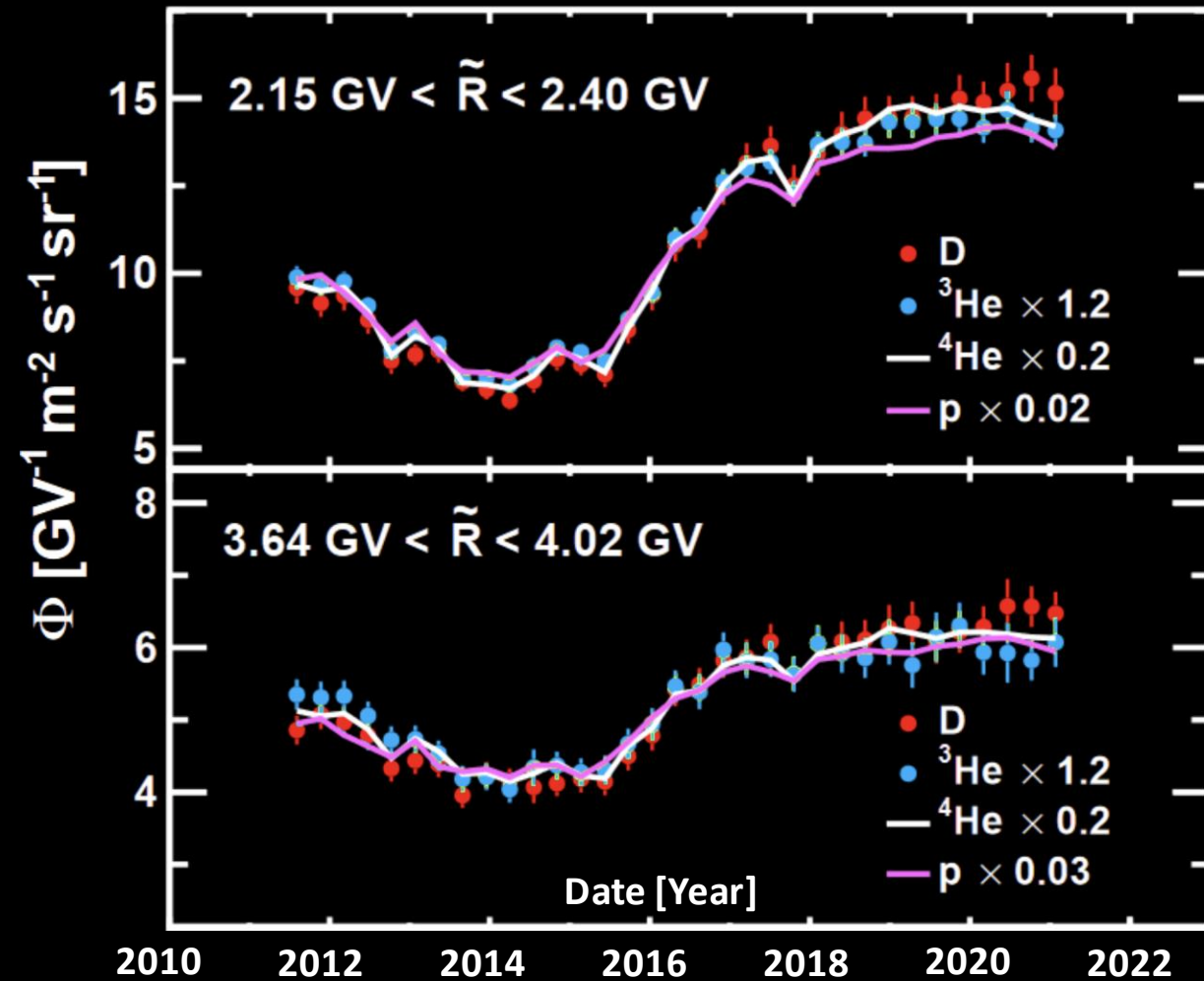
飞行时间探测器 TOF
测量 β 和 Z



切伦科夫探测器 (RICH)
测量 β and Z



AMS同位素流强的时间变化



氘、氦-3、氦-4、质子
流强随时间变化
趋势相似。

AMS同位素流强的时间变化

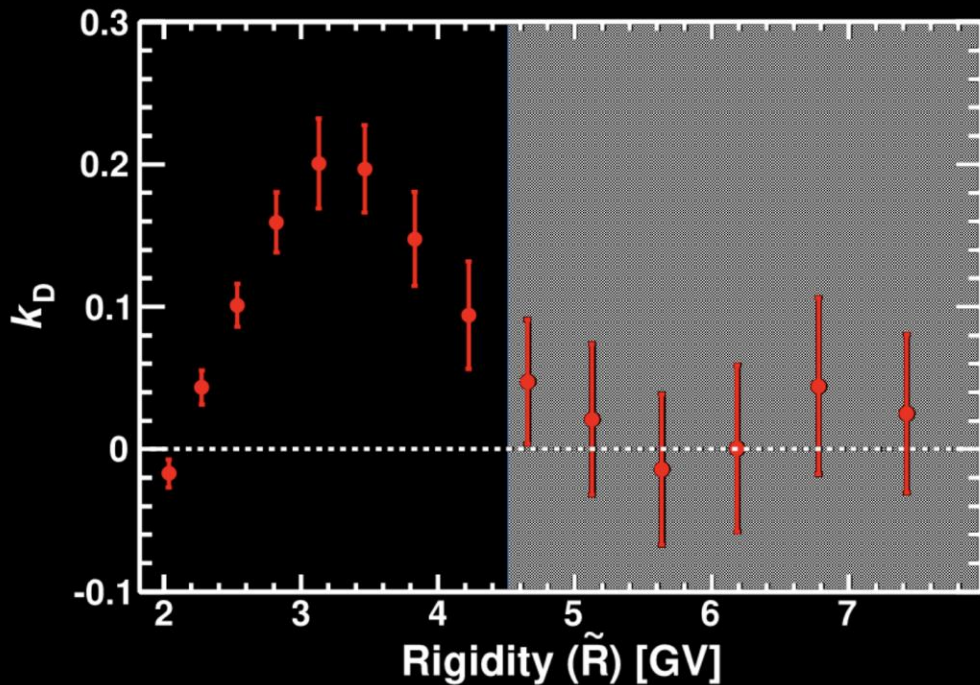
为了研究氘和氦-4受太阳调制影响的差异，拟合流强比 $\Phi_D^i/\Phi_{4\text{He}}^i$ 与氦流强 $\Phi_{4\text{He}}^i$ 的线性关系：

$$\frac{\Phi_D^i/\Phi_{4\text{He}}^i}{\langle \Phi_D^i/\Phi_{4\text{He}}^i \rangle} - 1 = k_D^i \left(\frac{\Phi_{4\text{He}}^i}{\langle \Phi_{4\text{He}}^i \rangle} - 1 \right)$$

$k_D > 0$ ， Φ_D 的变化幅度大于 $\Phi_{4\text{He}}$

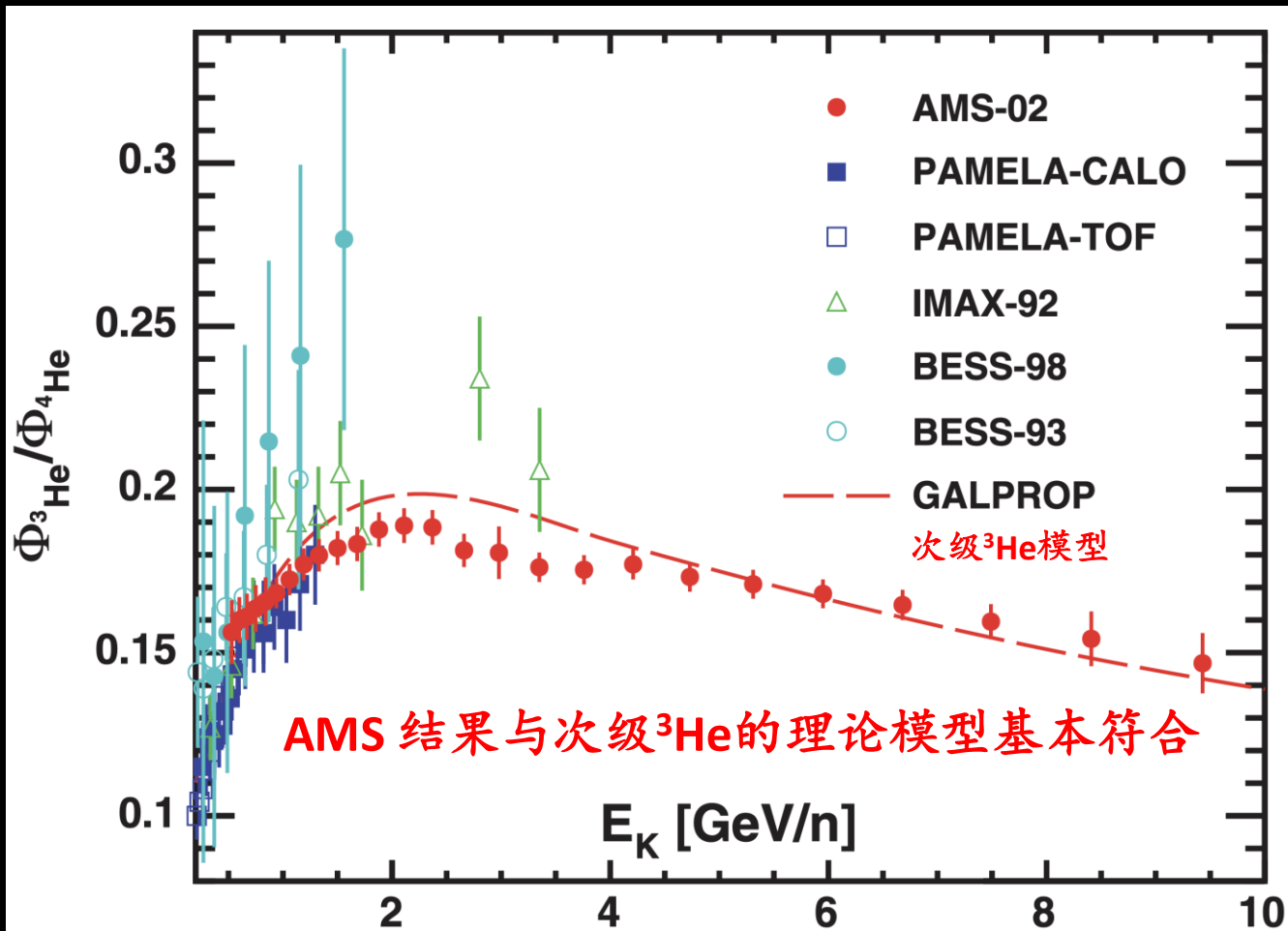
$k_D = 0$ ， Φ_D 的变化幅度等于 $\Phi_{4\text{He}}$

$k_D < 0$ ， Φ_D 的变化幅度小于 $\Phi_{4\text{He}}$

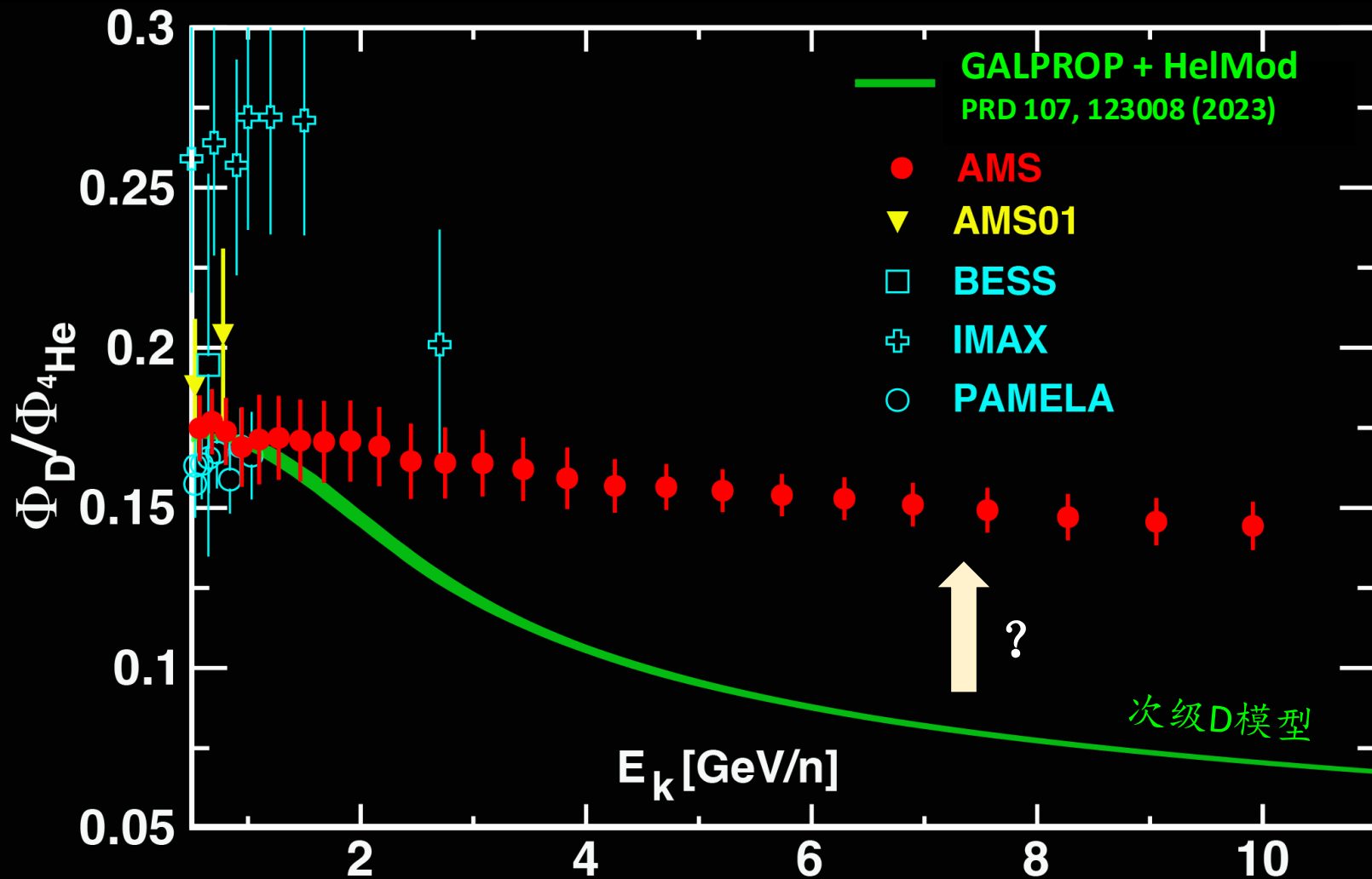


在刚度4.5GV以下， Φ_D 随时间的变化幅度大于 $\Phi_{4\text{He}}$
4.5 GV以上， $\Phi_D/\Phi_{4\text{He}}$ 不再随时间变化

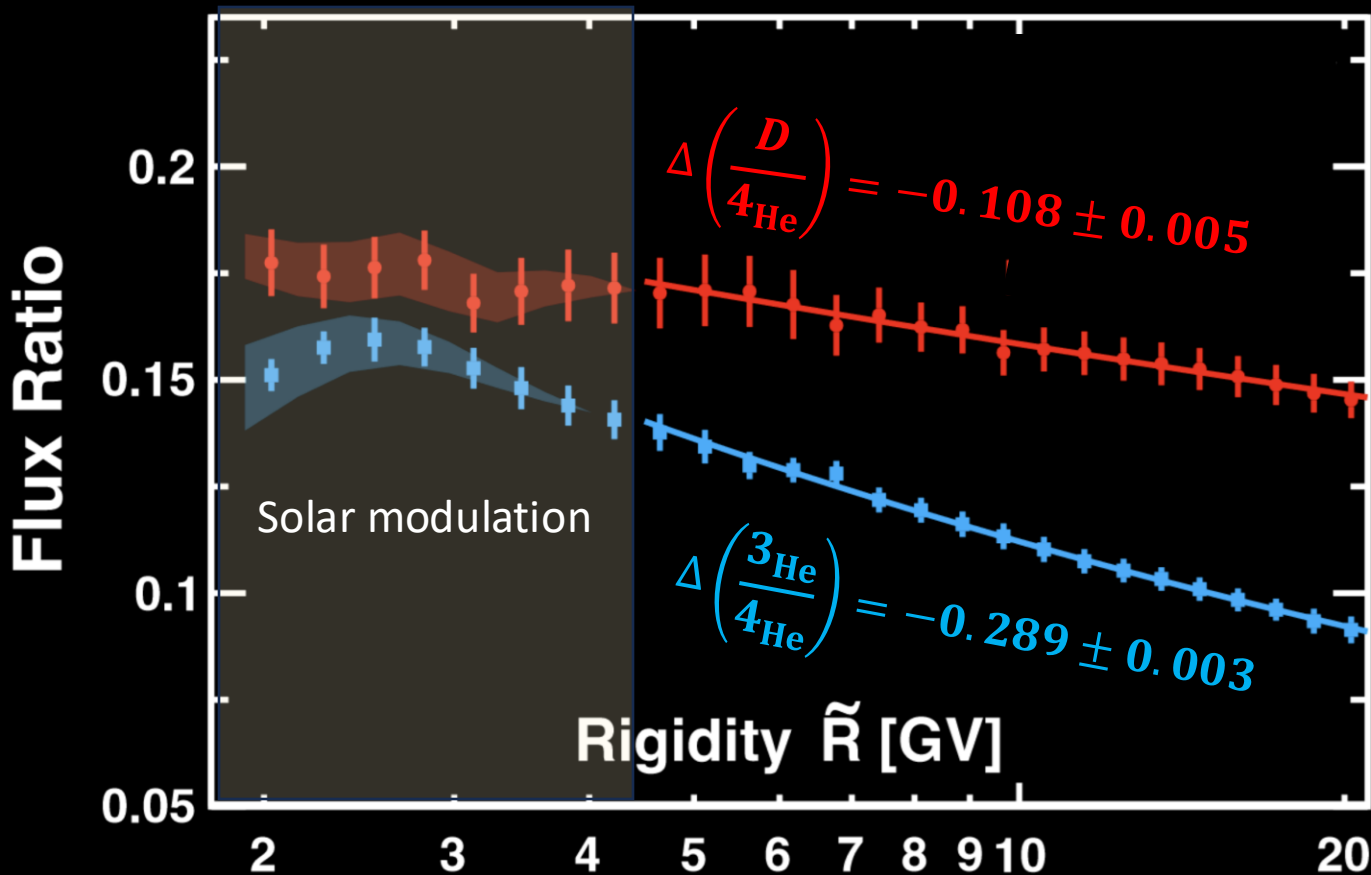
AMS 氦同位素



AMS氘同位素结果



D/⁴He 和 ³He/⁴He 的刚度依赖性



D/⁴He 和 ³He/⁴He
在4.5 GV以上随着
刚度的变化符合幂
律谱 $\propto R^\Delta$ 。

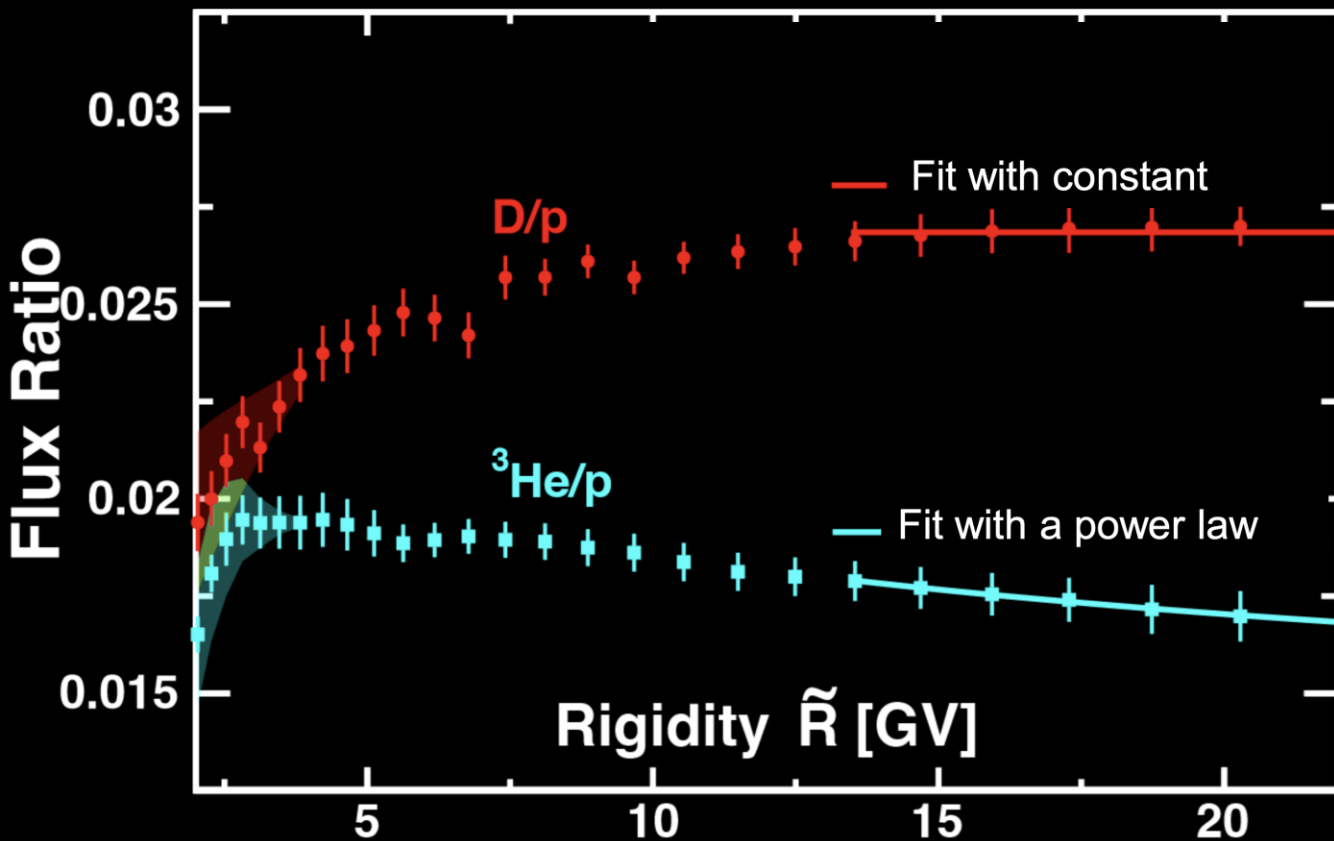
$$\Delta\left(\frac{D}{4\text{He}}\right) > \Delta\left(\frac{3\text{He}}{4\text{He}}\right)$$

³He是次级宇宙线

D的能谱比³He更
硬，显著性 $>10\sigma$

D存在初级成分？

D/p 和 $^3\text{He}/p$ 的刚度依赖性



p是初级宇宙线

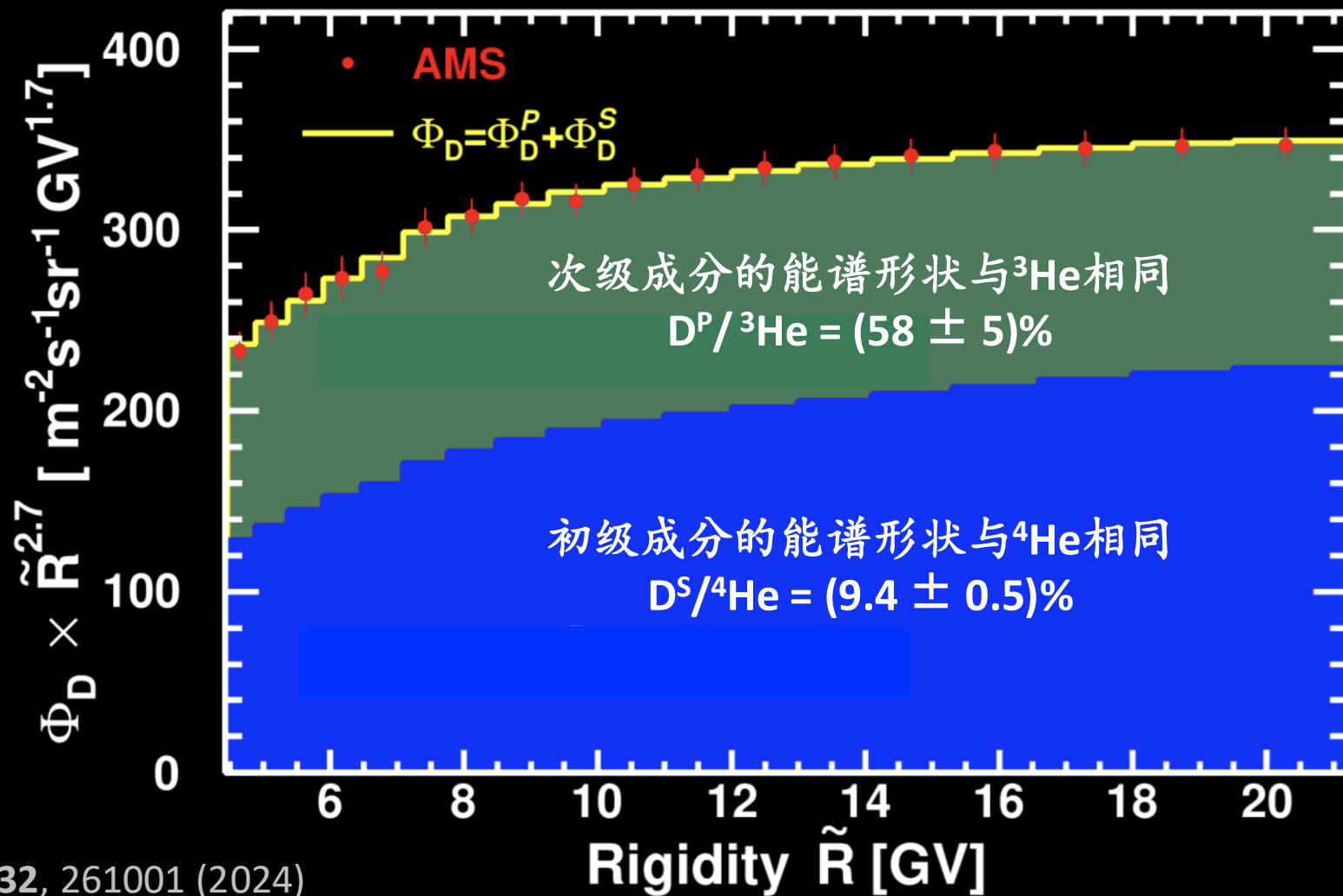
D/p随着刚度的增加而上升，在13 - 21 GV的范围内达到常数
 $D/p = 0.027 \pm 0.001$

原初D/p $\sim 10^{-5}$

$^3\text{He}/p$ 随着刚度的增加而下降，符合次级宇宙线特征

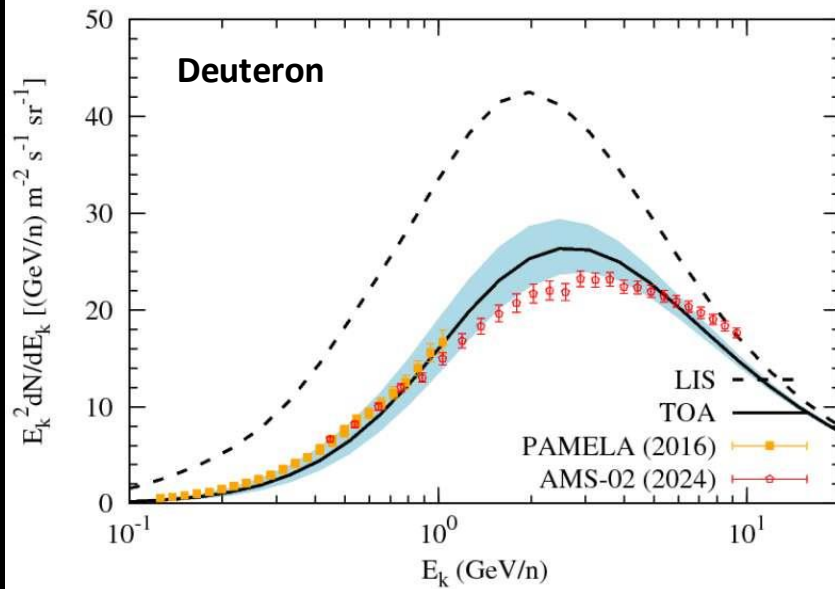
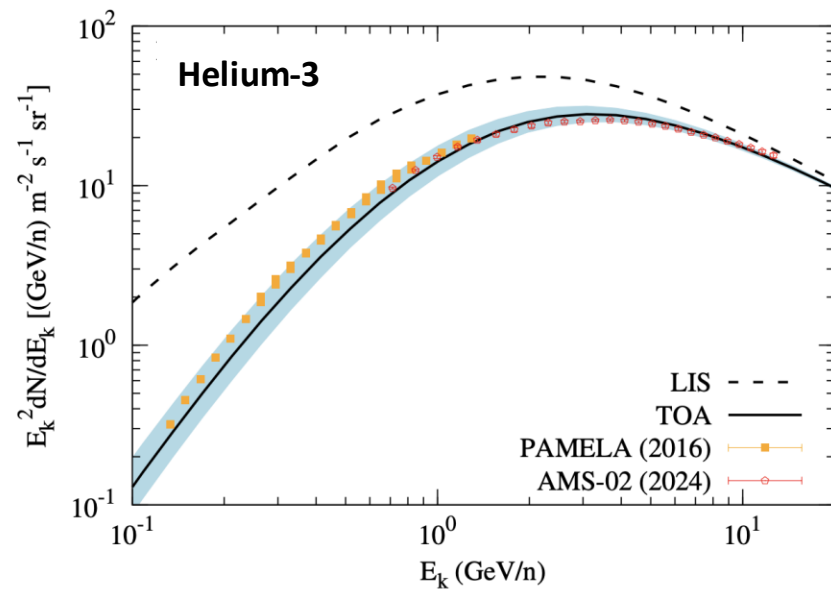
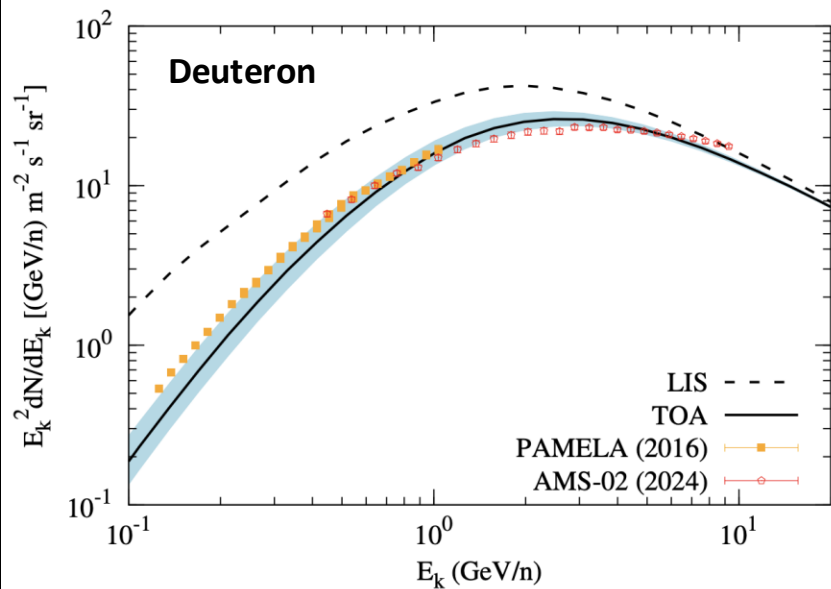
D存在初级成分？

氘同位素的初级与次级成分



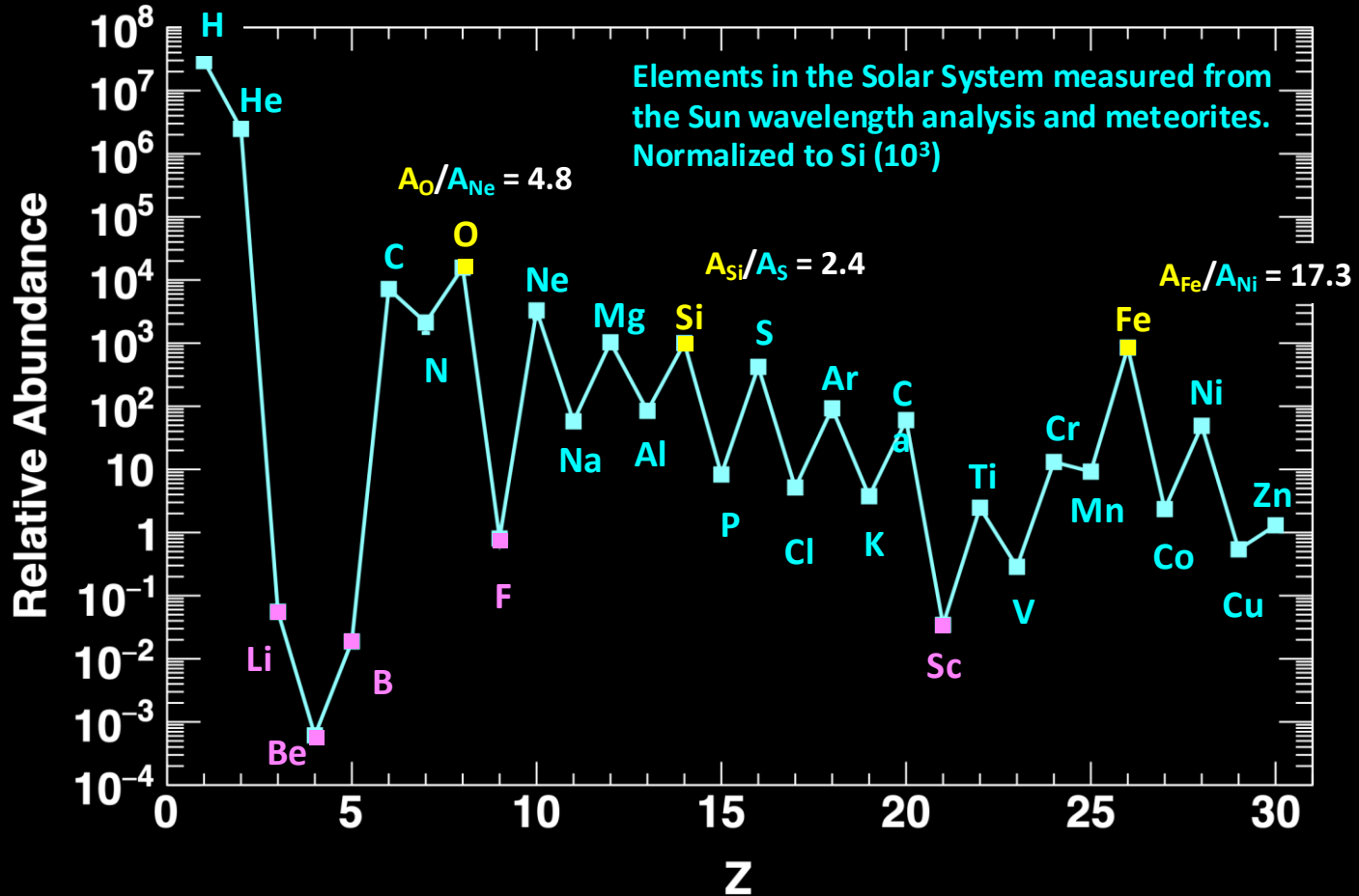
总结

- AMS基于2011至2021年的数据，精确测量了1.9 - 21 GV刚度范围的宇宙线氘(D) 流强及其随时间的变化
- D流强随时间变化的趋势与p、 ^3He 、 ^4He 一致，在4.5 GV以上D/ ^4He 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 不随时间变化
- 在4.5 GV以上，D/ ^4He 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 流强比随刚度的变化符合单一幂律谱，谱指数 $\Delta(\text{D}/^4\text{He}) > \Delta(^3\text{He}/^4\text{He})$ ，显著性大于 10σ
- 在13 - 21 GV刚度范围内， $\text{D}/\text{p} = 0.027 \pm 0.001$ （原初D/p $\sim 10^{-5}$ ）
- 在4.5 GV以上，氘能谱可描述为初级成分和次级成分的叠加，初级 $\text{D}^{\text{P}}/^4\text{He} = (9.4 \pm 0.5)\%$ ，次级 $\text{D}^{\text{S}}/^3\text{He} = (58 \pm 5)\%$



Qiang Yuan and Yi-Zhong Fan,
arXiv:2406.19315

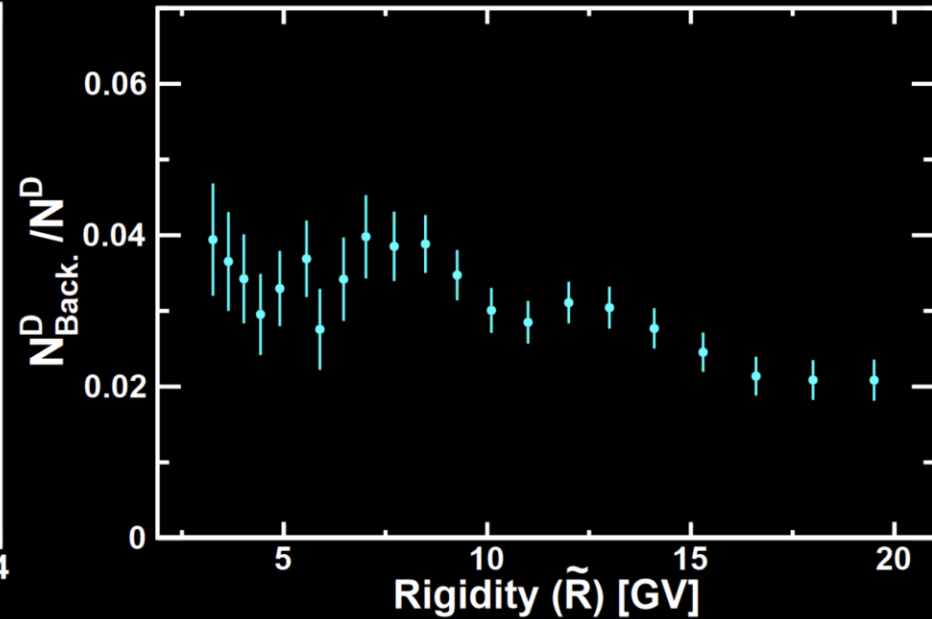
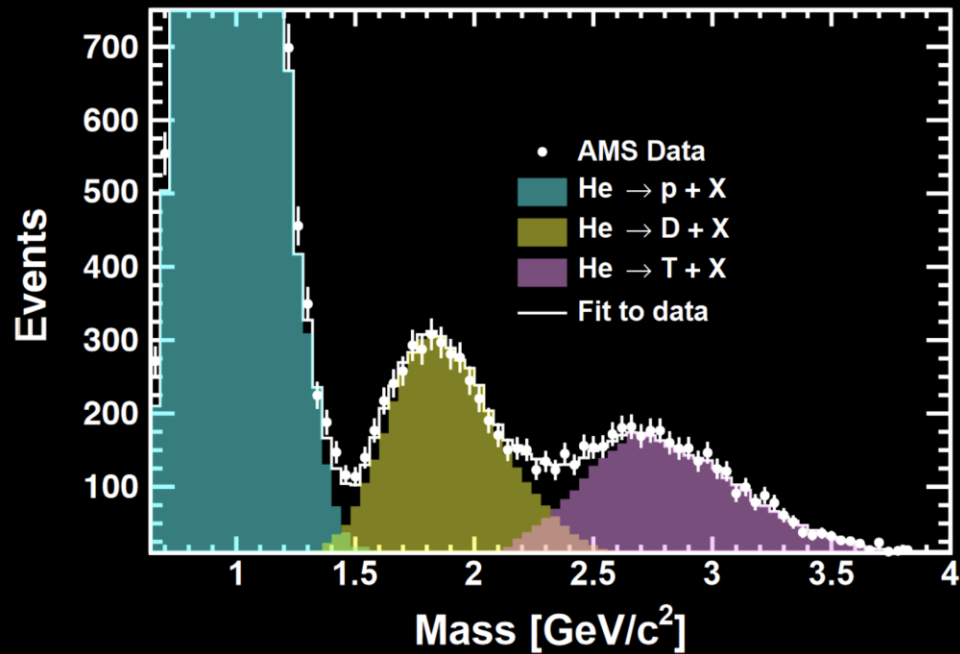
Abundance of elements in the Solar System

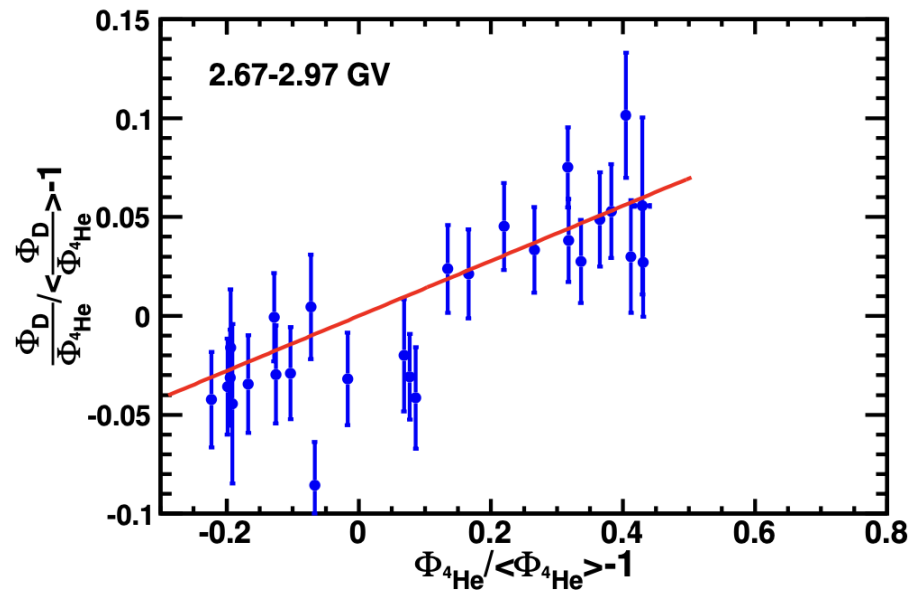
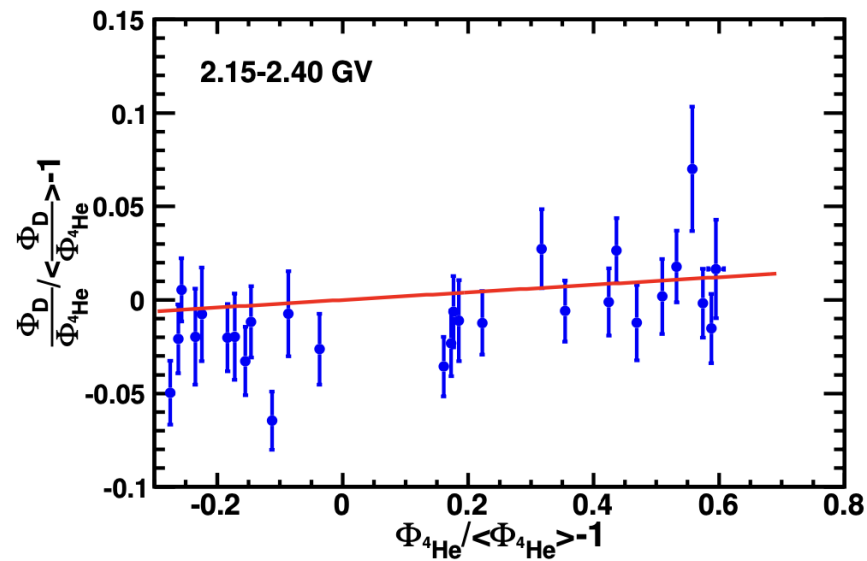
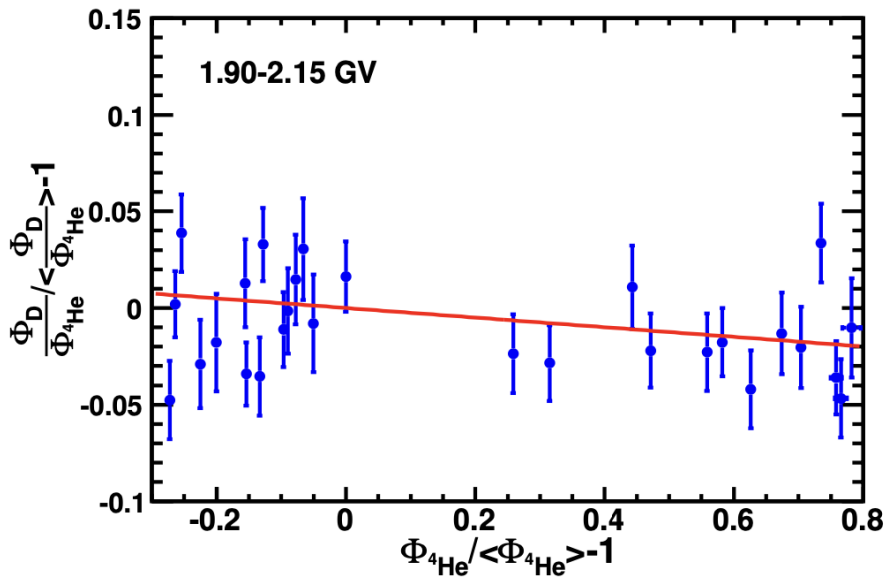


O, Si, and Fe are characteristic primary cosmic rays

Li, Be, B, F, and Sc are characteristic secondary cosmic rays

Estimation of Tol background





$$\frac{\Phi_D^i / \Phi_{4He}^i}{\langle \Phi_D^i / \Phi_{4He}^i \rangle} - 1 = k_D^i \left(\frac{\Phi_{4He}^i}{\langle \Phi_{4He}^i \rangle} - 1 \right)$$