

# 银河系宇宙线空间依赖 传播模型研究

报告人：郭义庆（高能所）

合作者：

紫金山天文台：袁强 研究员

高能所：胡红波 研究员，刘伟博后等

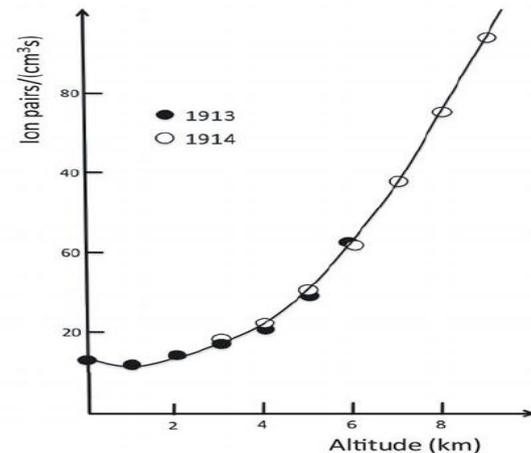
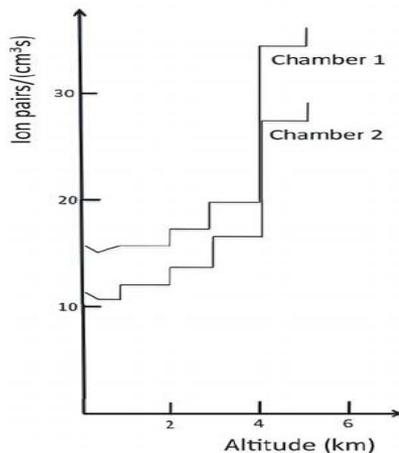
高能物理分会—上海交大（2018/06/22）

# 主要内容

1. 宇宙线的发现
2. 传统宇宙线传播模型
3. 最近实验观测结果
4. 空间依赖传播模型
5. 总结

# 1912年8月7日 Hess 发现宇宙线

Victor Franz Hess 第七次气球飞行线路，最大飞行高度：海拔**5350米**



(取自P.Carlson在ICRC2011上的报告)

(宇宙线研究的主要手段是什么?)

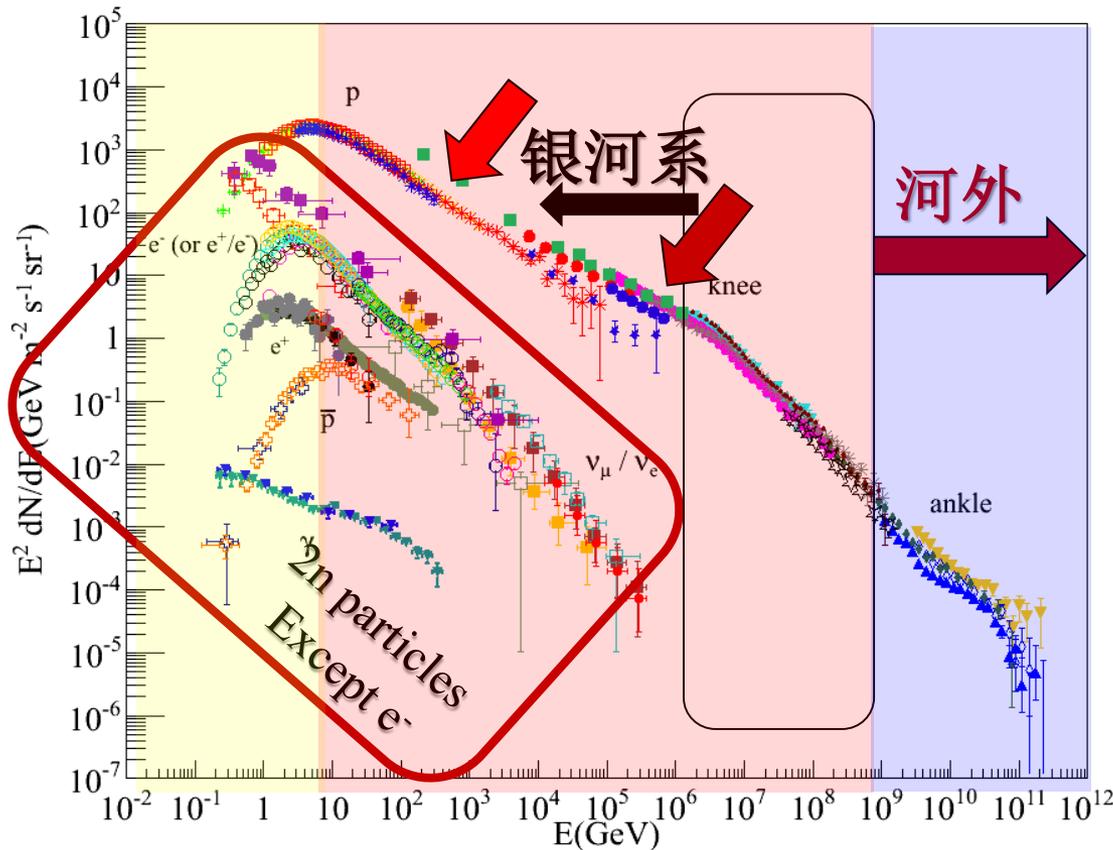
# 宇宙线能谱

- **能量: (12量级, 流强30量级)**

- 范围:  $10^9 - 10^{21}$  eV
- 最高能量:  $3 \times 10^{20}$  eV

- **能谱: 近似幂率**

- 年龄:  $\sim 10^7$  年
- 能量密度:  $1 \text{ eV/cm}^3$
- 亮度:  $10^{41} \text{ ergs/s}$
- 能谱结构:
  0.  $\sim 200 \text{ GeV}$ : 能谱变
  1.  $\sim 4 \text{ PeV}$ : “膝”
  2.  $\sim 30 \text{ PeV}$ : “第二膝”
  3.  $\sim 4 \text{ EeV}$ : “踝”
  4.  $\sim 40 \text{ EeV}$ : GZK 截断

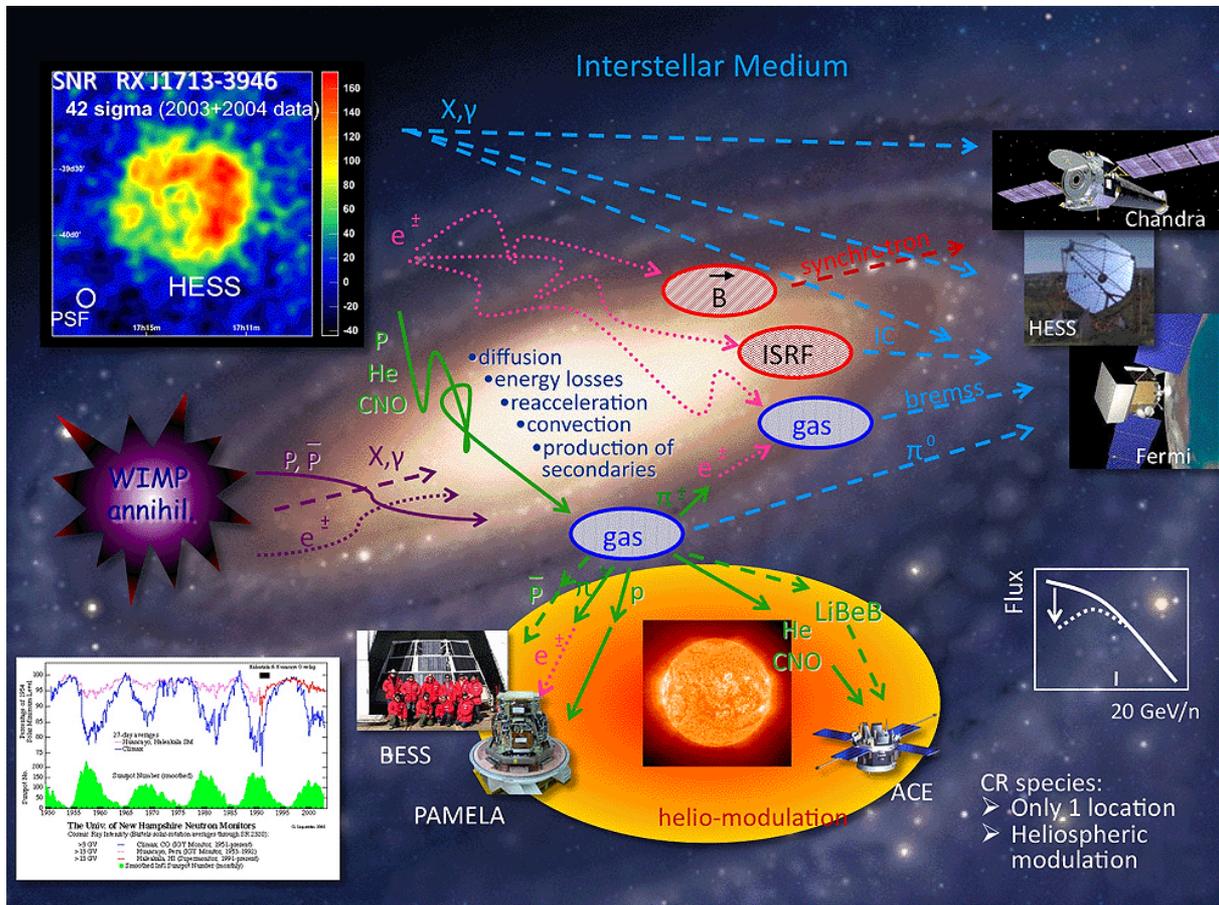


## 研究三个基本问题:

1. 宇宙线来自于哪里?  
→ 起源问题
2. 怎么样获得能量?  
→ 加速问题
3. 怎么样到达地球?  
→ 传播问题

# 传统宇宙线传播模型

# 宇宙线传播图像



加速

扩散和相互作用

太阳系内传播

地球附近探测

# 宇宙线传播（数学描述）

$$\frac{\partial \psi(\vec{r}, p, t)}{\partial t} = q(\vec{r}, p) \text{ sources (SNR, nuclear reactions...)}$$

$$\text{diffusion} \quad + \vec{\nabla} \cdot [D_{xx} \vec{\nabla} \psi - \vec{V} \psi] \quad \text{convection}$$

$$\text{diffusive reacceleration} \quad + \frac{\partial}{\partial p} \left[ p^2 D_{pp} \frac{\partial \psi}{\partial p} \frac{1}{p^2} \right]$$

$$\text{E-loss} \quad - \frac{\partial}{\partial p} \left[ \frac{dp}{dt} \psi - \frac{1}{3} p \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \psi \right] \text{convection}$$

$$\text{fragmentation} \quad - \frac{\psi}{\tau_f} - \frac{\psi}{\tau_d} \quad \text{radioactive decay}$$

$\psi(\mathbf{r}, p, t)$  – density per total momentum

**PPT: 来自于Galprop 作者: Igor V. Moskalenko (Stanford U.)**

# 传统传播模型能谱

1. 稳恒态传播:

$$\frac{\partial \psi(\vec{r}, p, t)}{\partial t} = 0$$

2. 与刚度(~能量)相关的传播系数:

$$D_{XX} = D_0 (\mathbf{R}/\mathbf{R}_0)^\delta$$

3. 加速源注入能谱:

$$q(E) = J_0 * E^{-\beta} \exp(-E/E_{\max})$$

4. 观测能谱 (整个银河系能谱一样) :

$$\mathbf{F}_{\text{原初}}(\mathbf{E}) \sim q(\mathbf{E}) / D_{XX} \sim \mathbf{J}\mathbf{E}^{-\beta-\delta} \exp(-\mathbf{E}/\mathbf{E}_{\max})$$

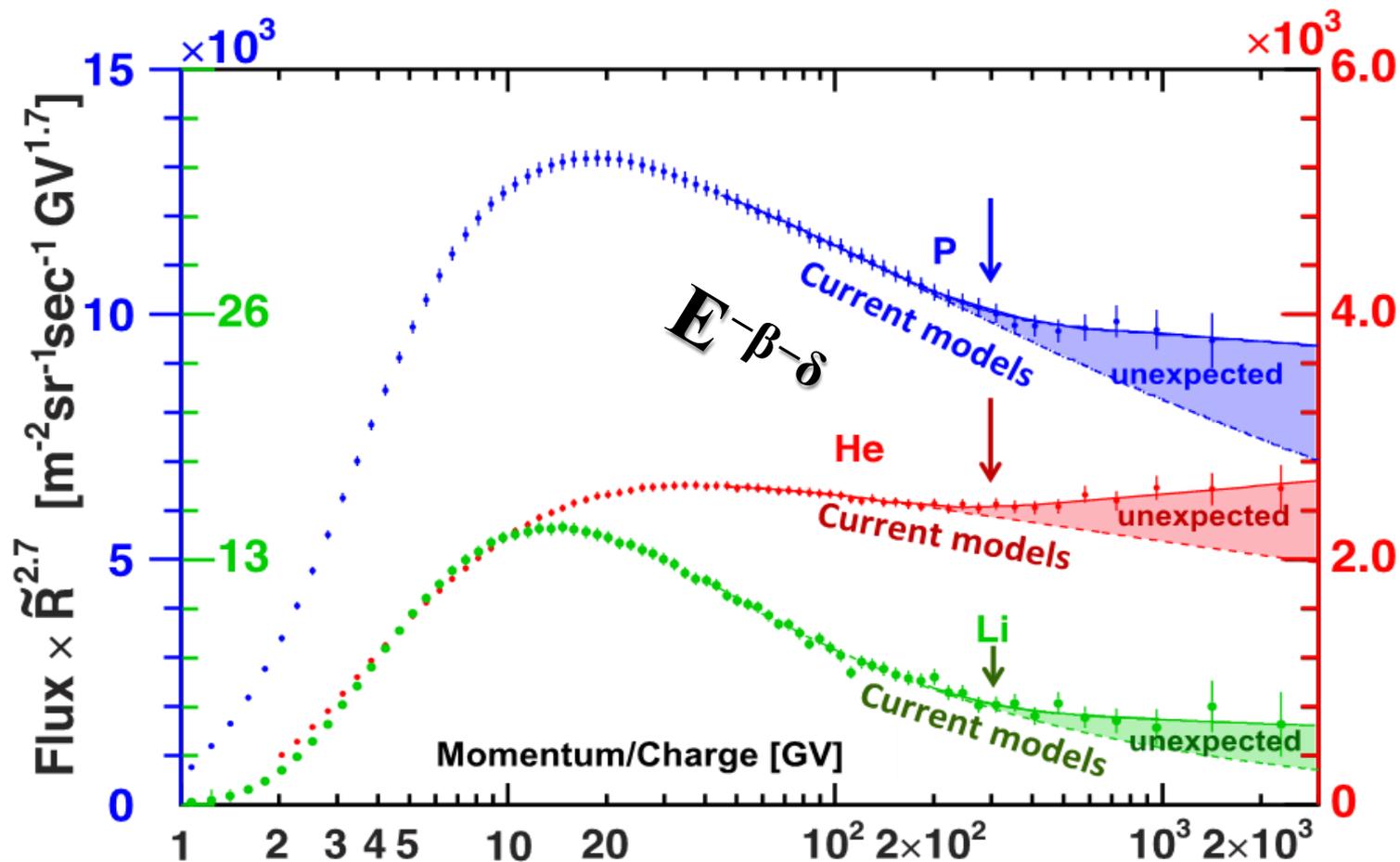
5.  $F_{\text{次级}}(\mathbf{E}) / F_{\text{原初}}(\mathbf{E}) : \sim \mathbf{E}^{-\delta}$

特点

# 最近实验观测结果

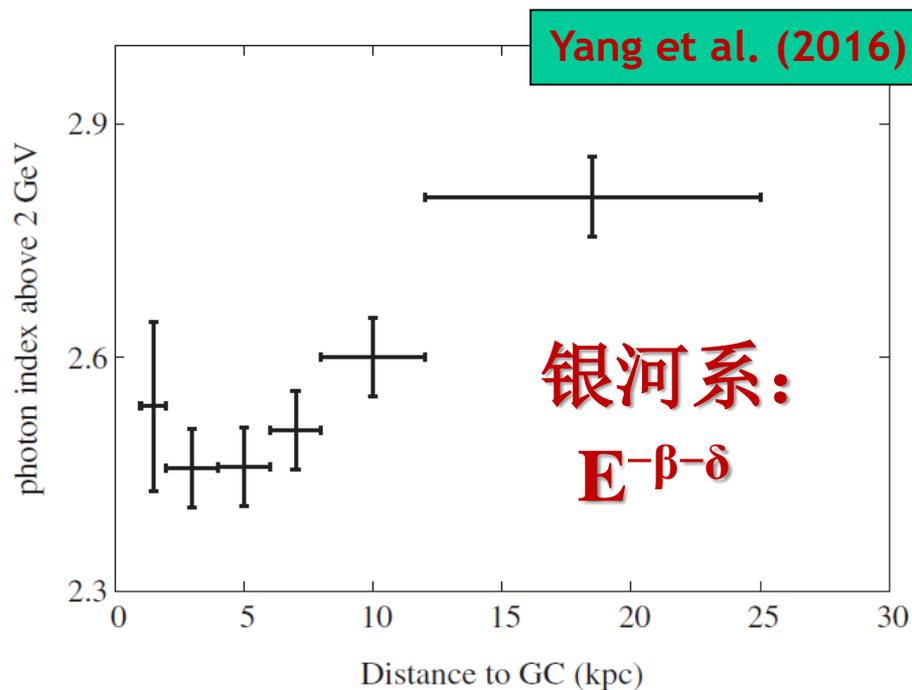
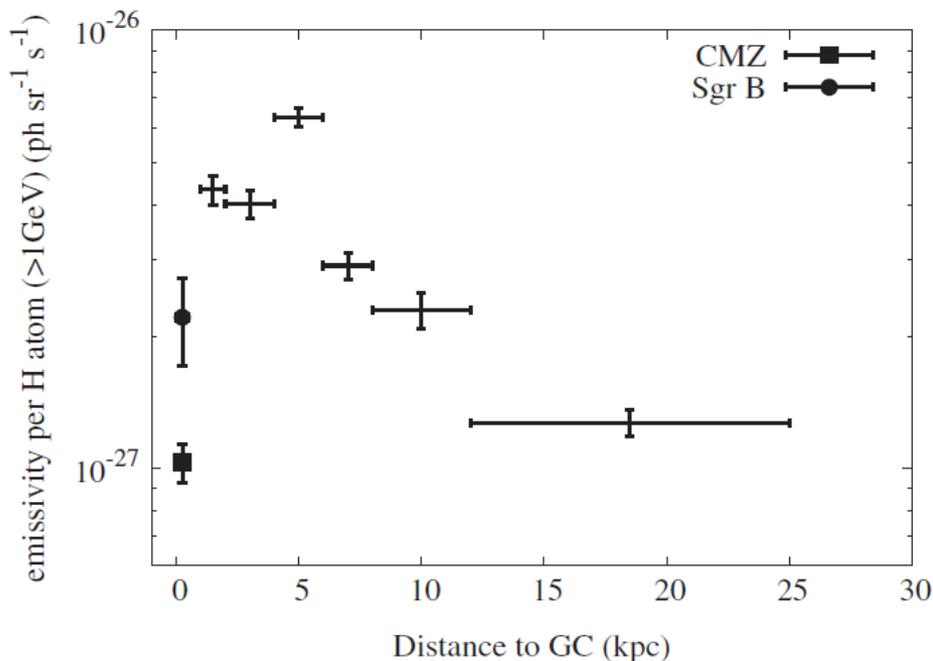
- 1. 原初宇宙线粒子谱
  - 2. 次级宇宙线粒子谱
  - 2. 弥散伽马射线：银河系宇宙线
- } 太阳系宇宙线

# 宇宙线能谱200GV变硬



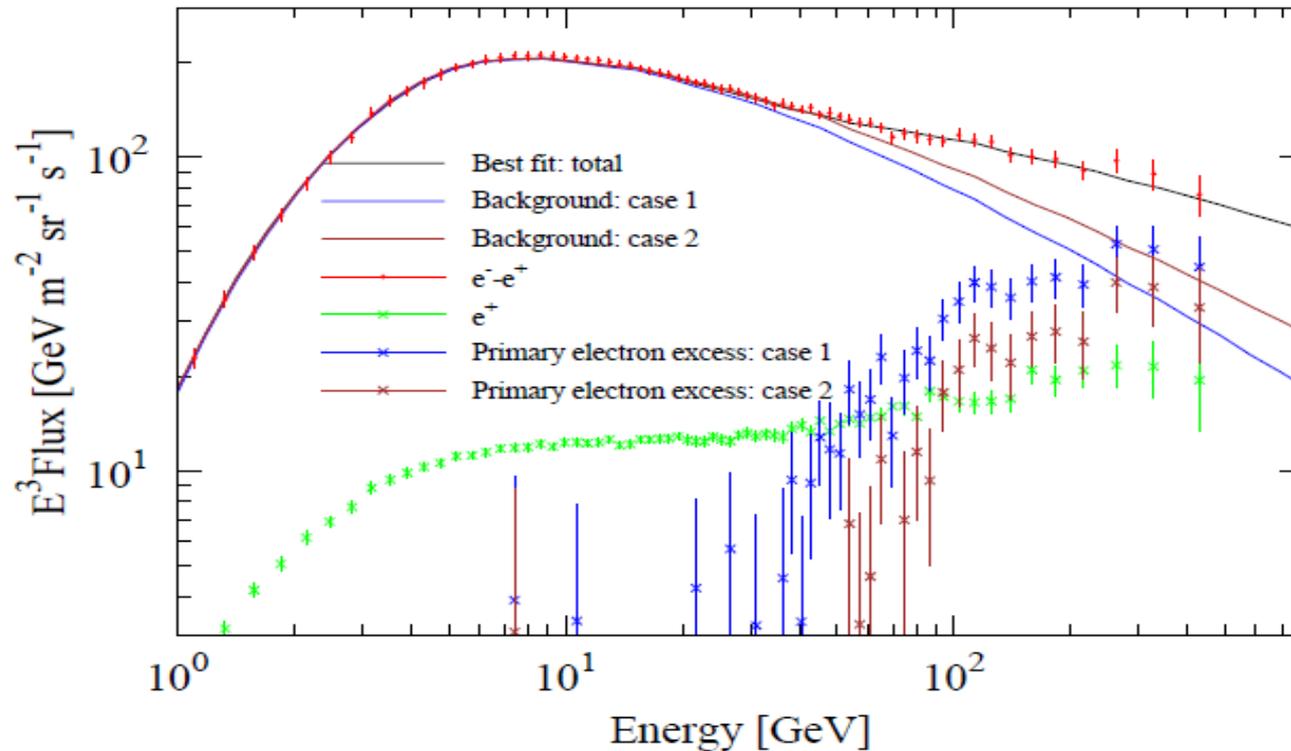
图来自于AMS02新闻稿材料

# (原初)宇宙线空间变化



根据弥散伽马射线给出的宇宙线强度和能谱随空间位置的变化：跟传统传播模型不一致

# 原初电子存在“超出”

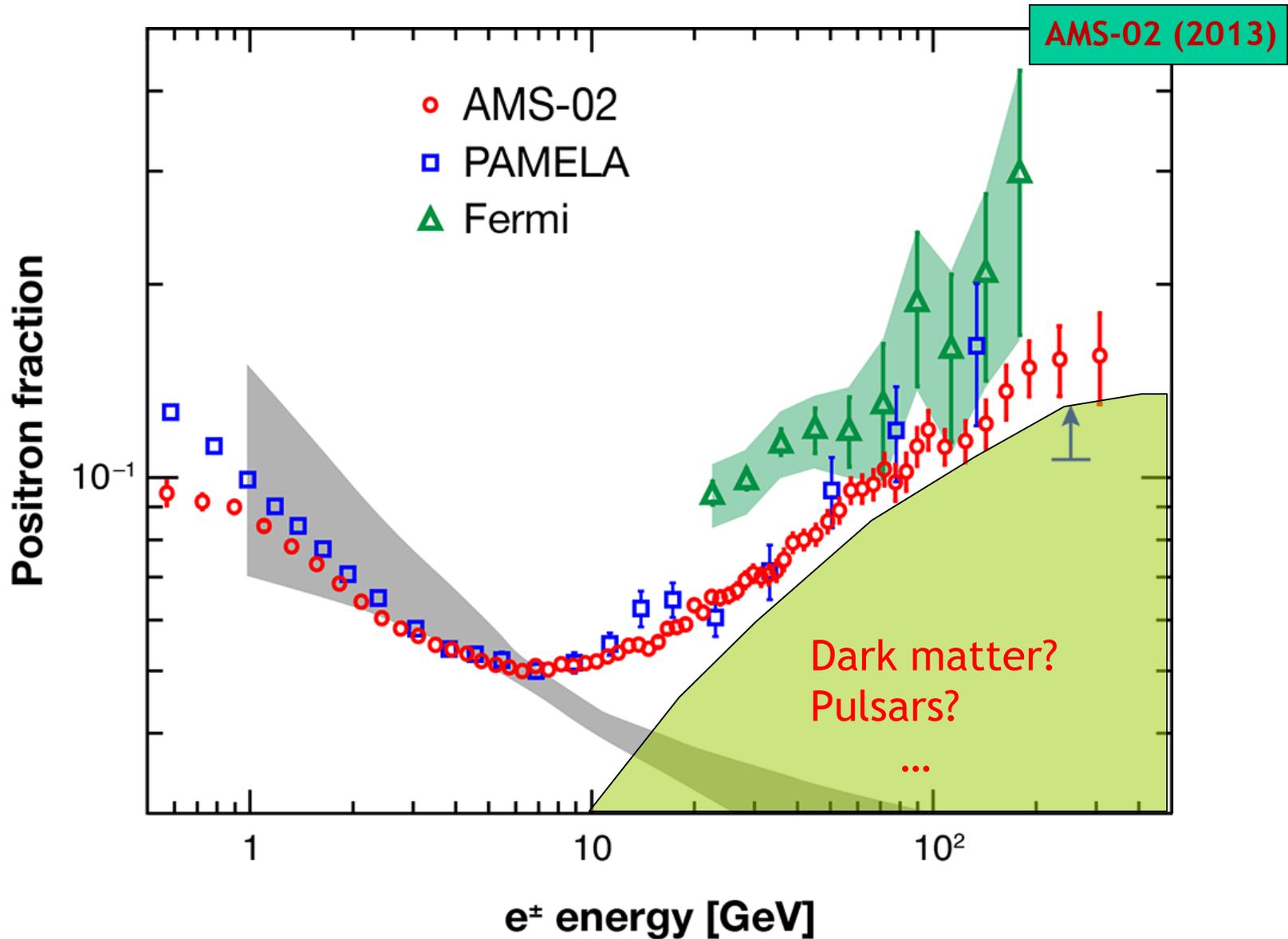


**X. Li, et al., 2015, PhLB, 749,267**

**Q. Yuan, et al., 2013, PhLB, 727,1-7**

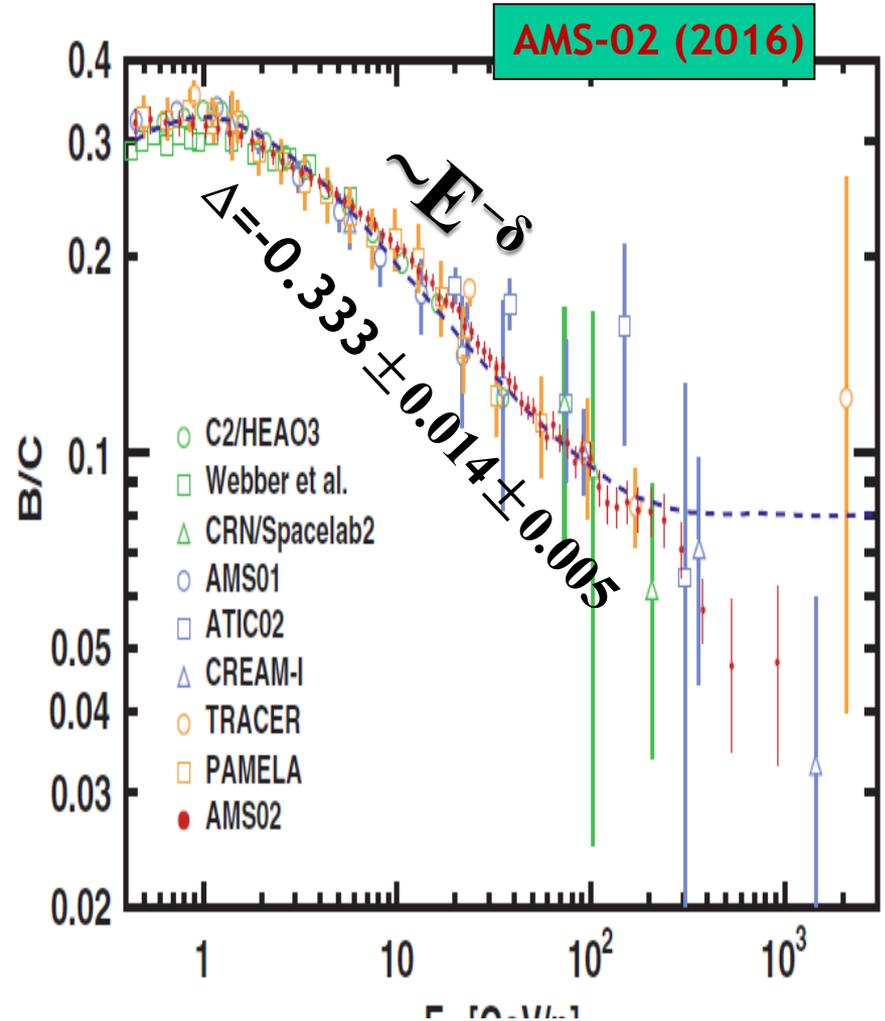
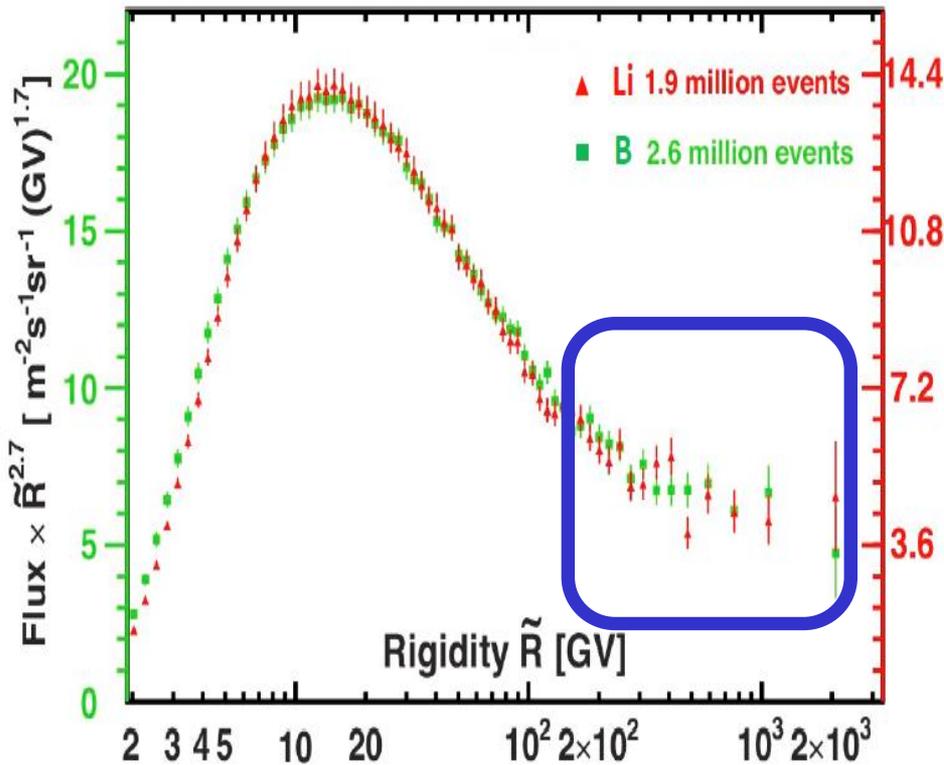
原初宇宙线存在超出  
次级宇宙线是否也存在超出？

# 次级宇宙线：正电子超出



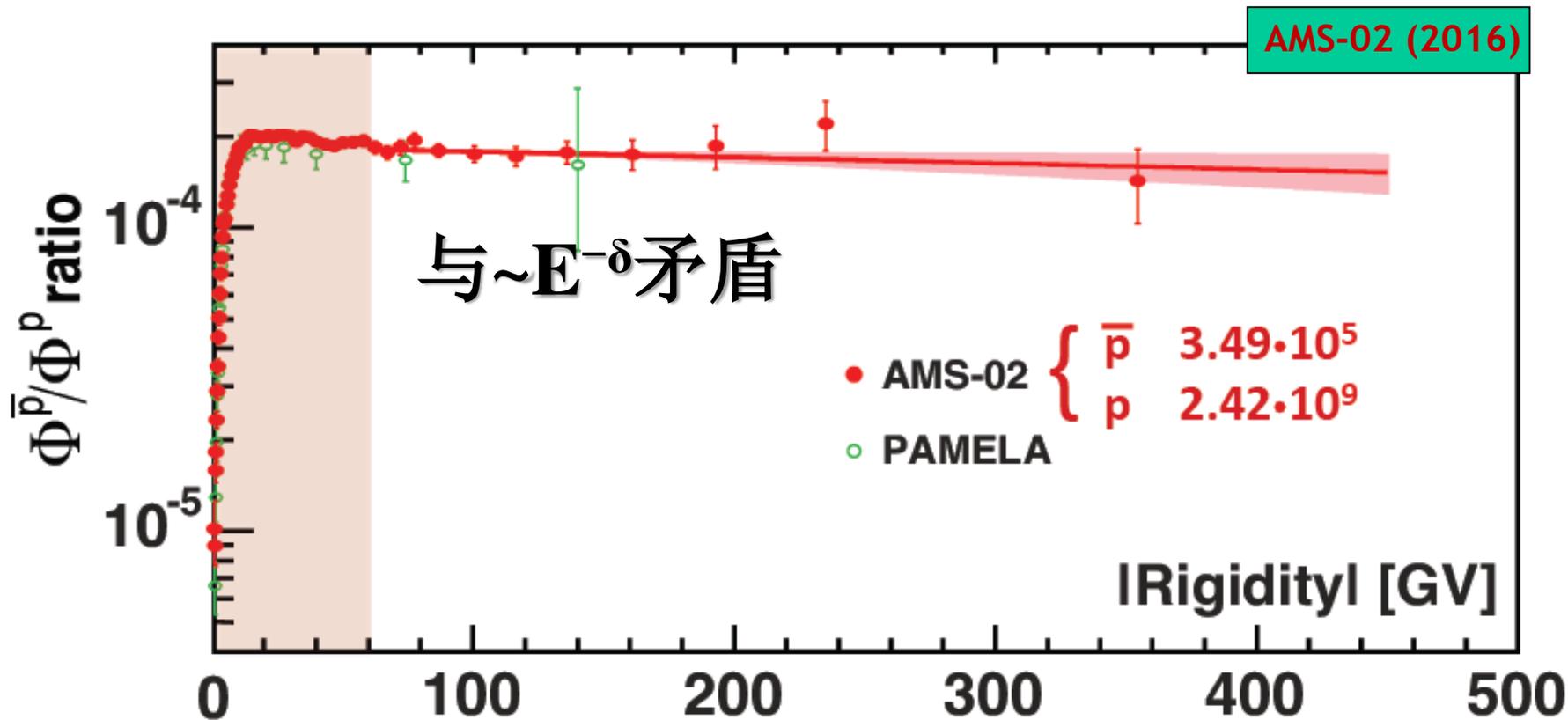
# 次级宇宙线：B/C

Secondary Cosmic Rays: Lithium and Boron  
 Above 7 GV Li and B have identical rigidity dependence



TeV/n以上是否存在拐折？

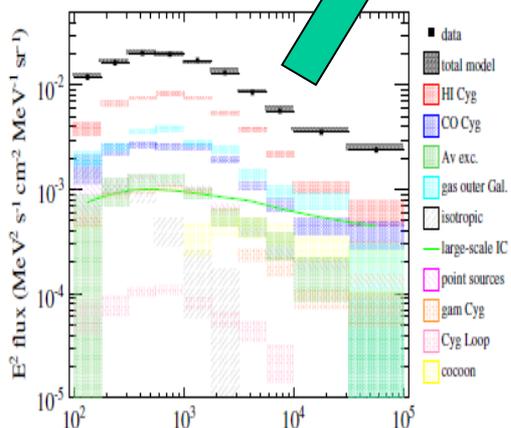
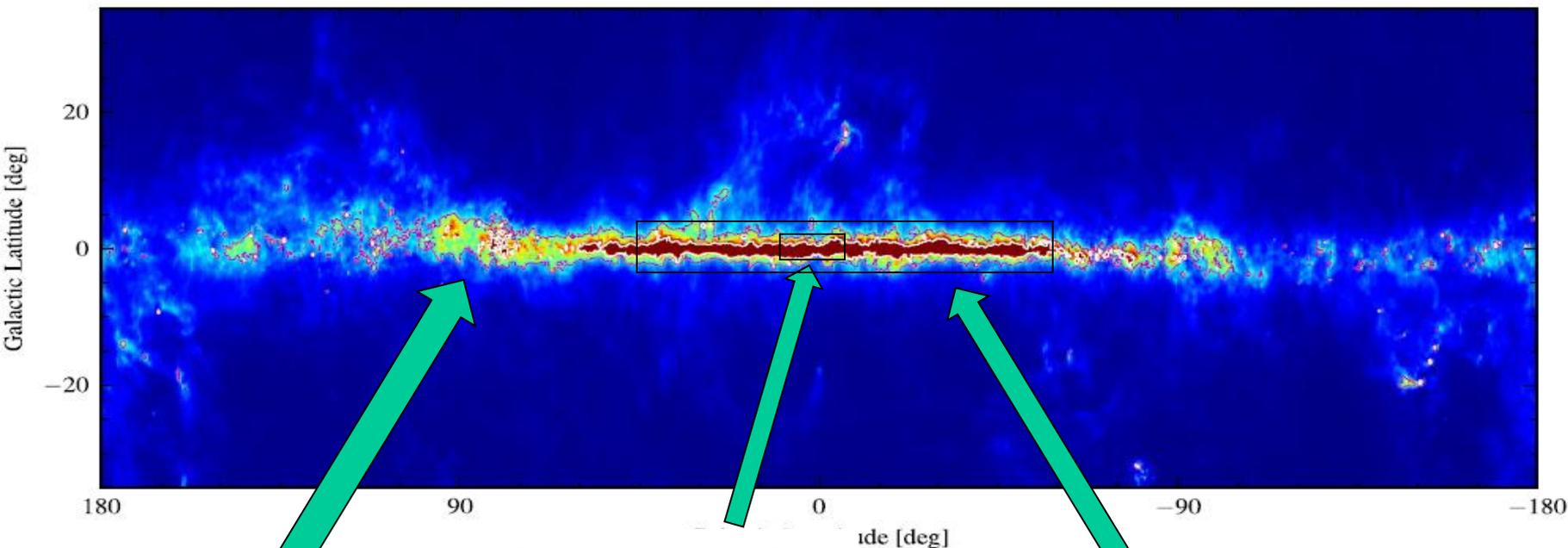
# 次级宇宙线：反质子/质子比



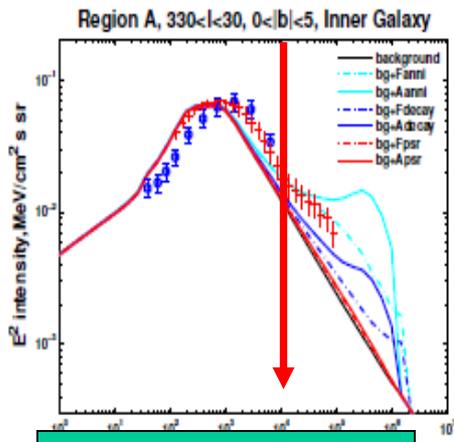
高能反质子/质子比例不随能量变化

# 银盘弥散 $\gamma$ 射线超出

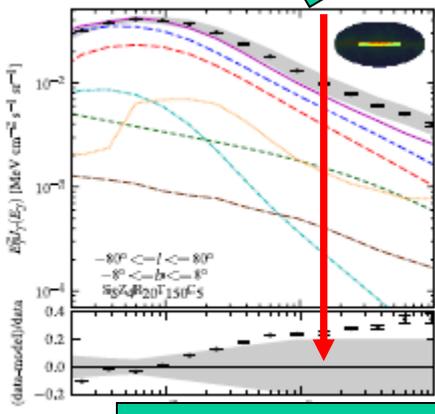
**Break @  $\sim 10$  GeV (CRs  $\sim 100$  GeV)**



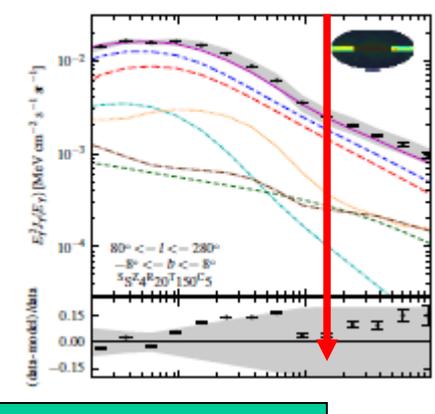
**A&A,2012,538,71**



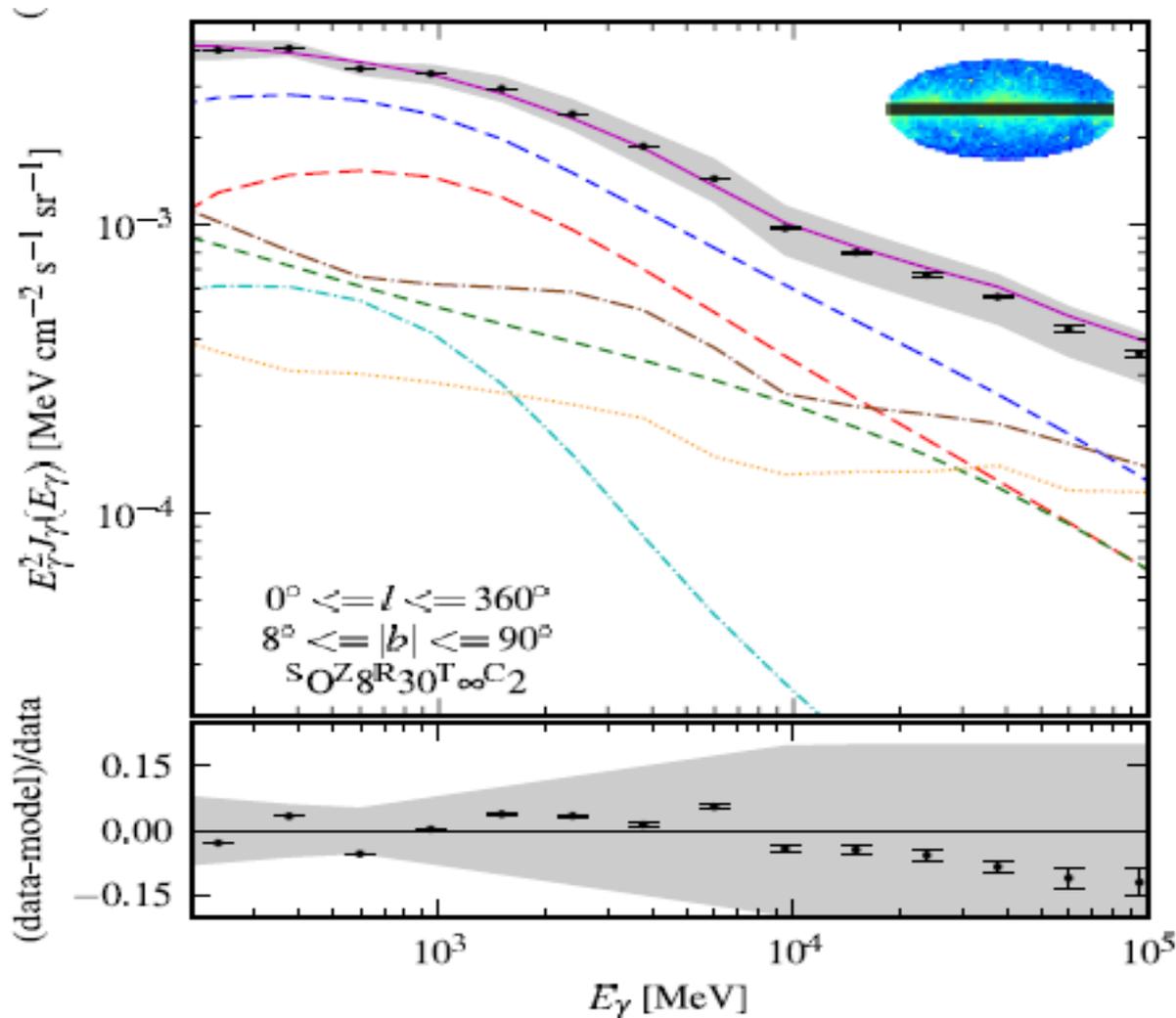
**ApJ,2009,ZhangJ**



**Ackermann,ApJ,2012,750,3**



# 银晕观测与传统传播模型一致



“超出” 仅仅  
在银盘！

Ackermann, ApJ, 2012, 750, 3

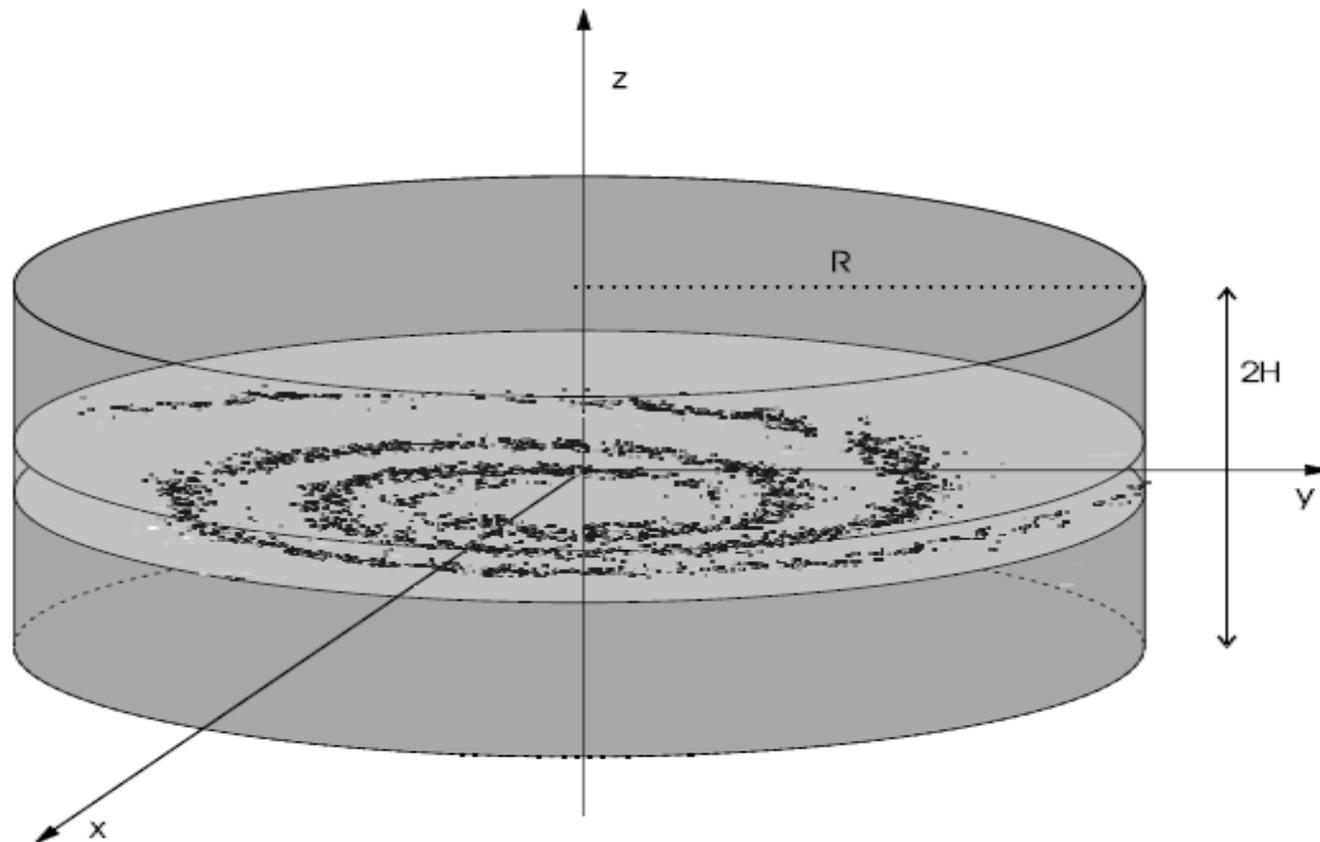
# 观测结果总结

- 原初宇宙线能谱在 高能段 存在变硬
- 次级粒子普遍存在“超出”，但  $B/C$  与  $\text{anti}p/p$  比例具体行为稍微不太一致
- 银盘弥散伽马射线存在“超出”
- 宇宙线能谱存在空间变化

# 空间依赖传播模型

# 双Halo模型中宇宙线能谱

(Tomassetti, 2012, ApJ, 752,13)



$$N_0 \equiv N(z=0) \sim \frac{L}{k_0} \left\{ \xi \rho^{-\nu-\delta} + (1-\xi) \rho^{-\nu-\delta-\Delta} \right\}$$

硬成分

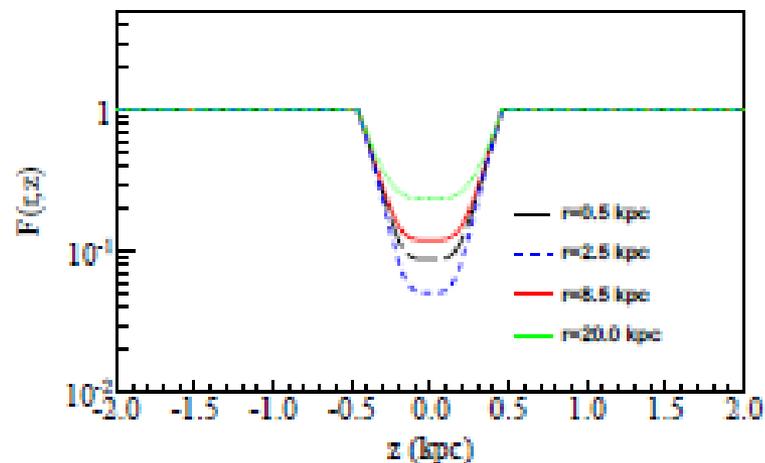
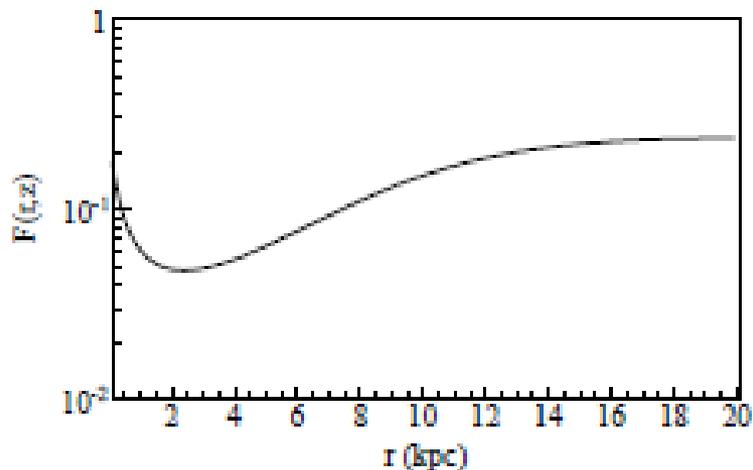
软成分

# “双晕”传播模型



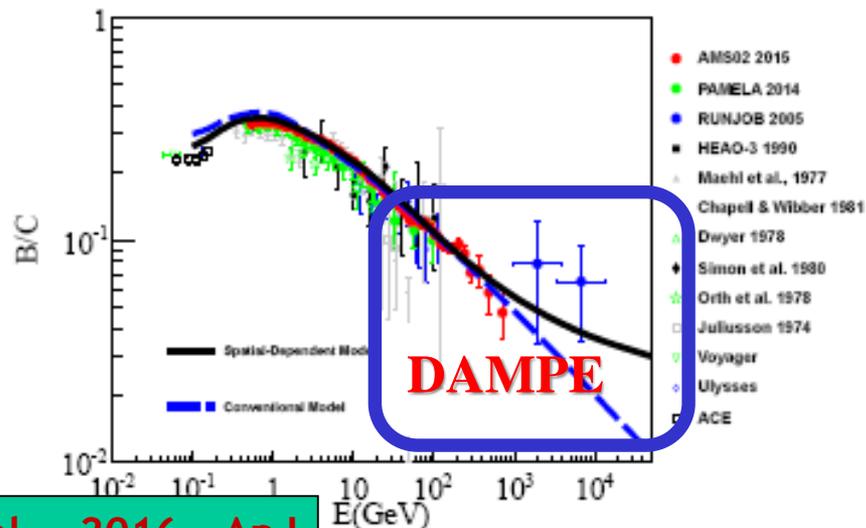
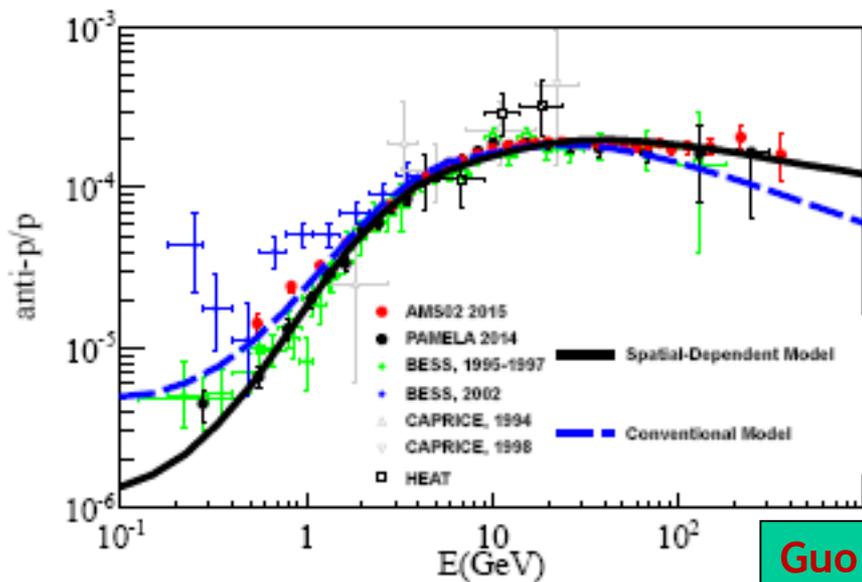
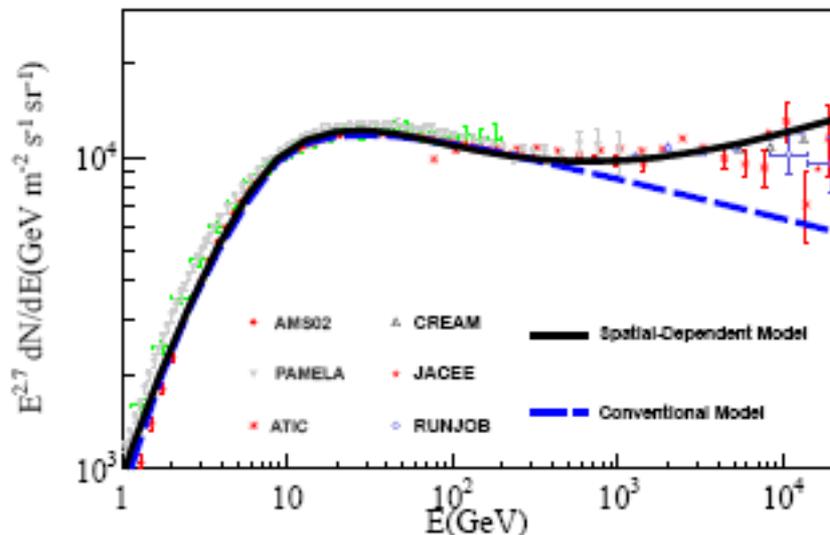
$$D_{xx}(r, z, p) = \begin{cases} \eta(r, z) D_0 \beta \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\varepsilon(r, z) \delta_0} & |z| < \xi z_h \quad (IH) \\ D_0 \beta \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\delta_0} & |z| > \xi z_h \quad (OH) \end{cases}$$

$$F(r, z) = \frac{N_m}{1 + f(r, z)} + \left( 1 - \frac{N_m}{1 + f(r, z)} \right) \cdot \min \left[ \left( \frac{z}{\xi z_h} \right)^n, 1 \right]$$



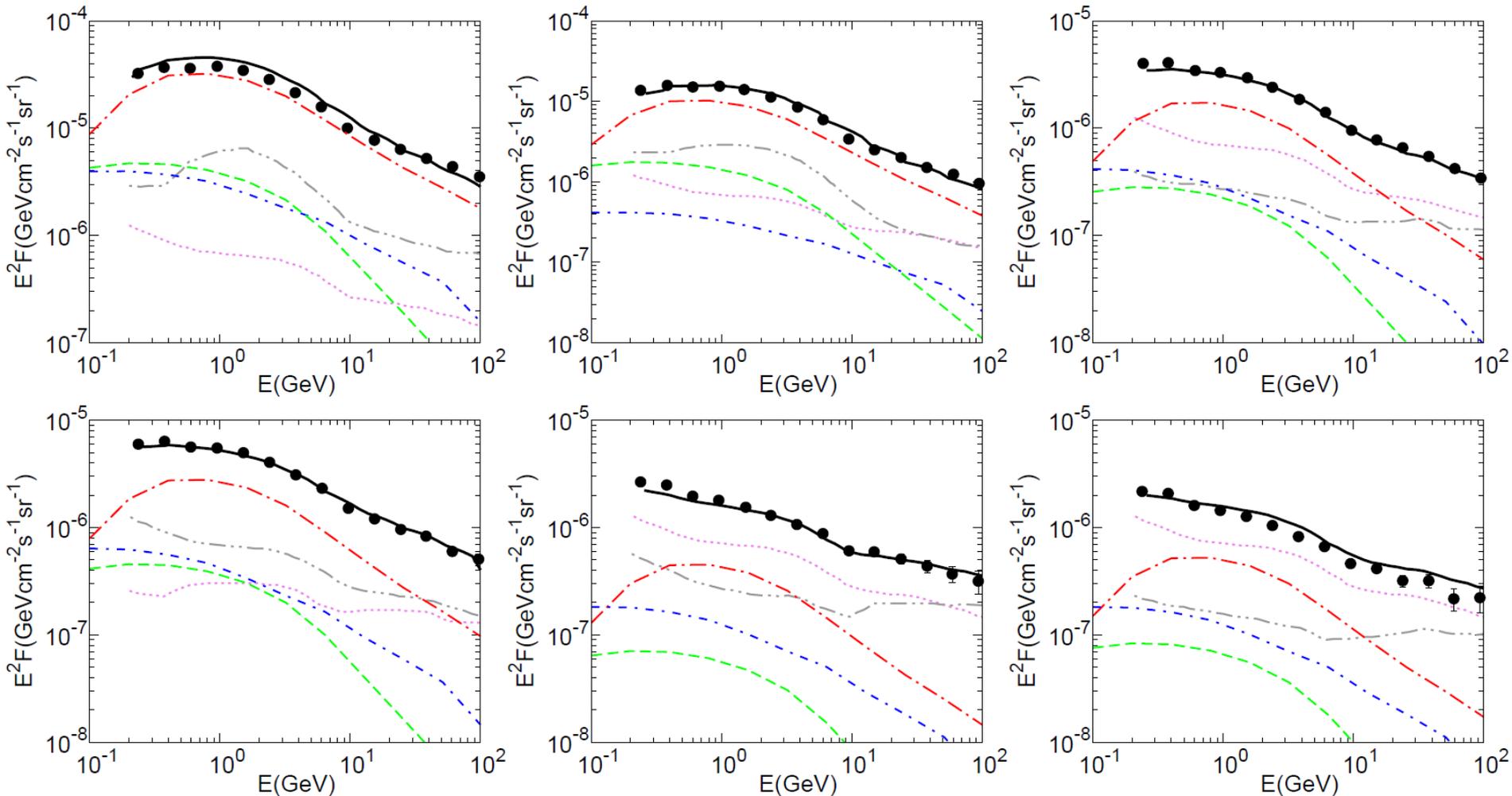
# 空间依赖的宇宙线传播

1. 重复原初质子200GV拐折
2. 解释正反质子比的“flat”分布，需要AMS02 TeV以上能谱观测的继续检验。
3. 预期B/C在TeV以上存在拐折，期望将来AMS02在TeV以上观测的检验。
4. 重现了银盘硬成分贡献工作！



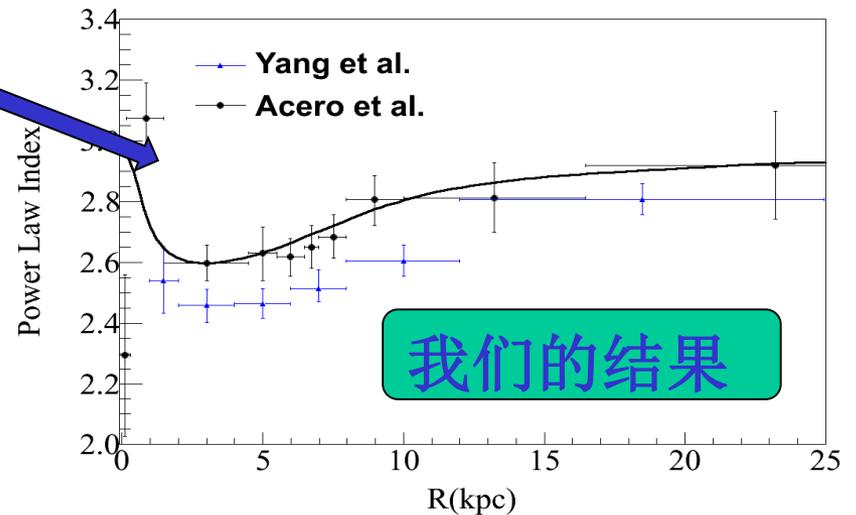
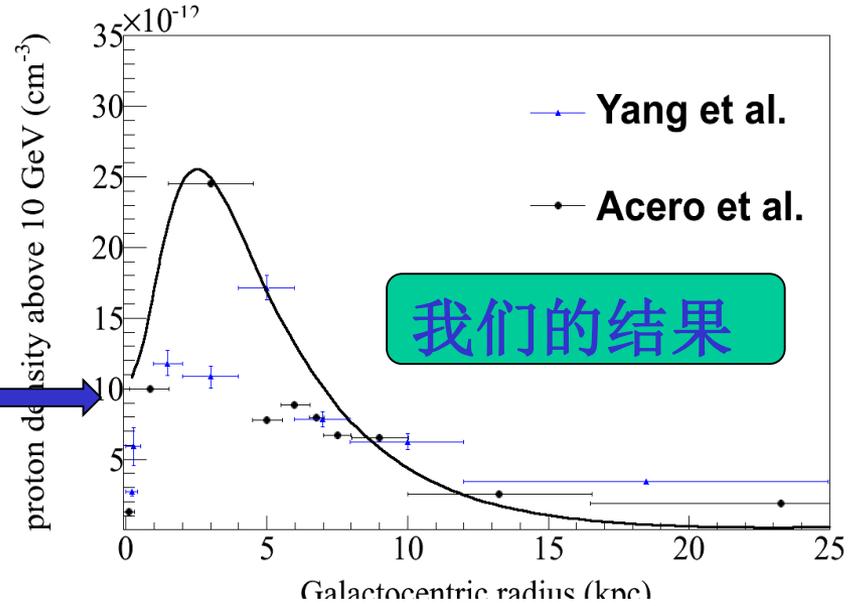
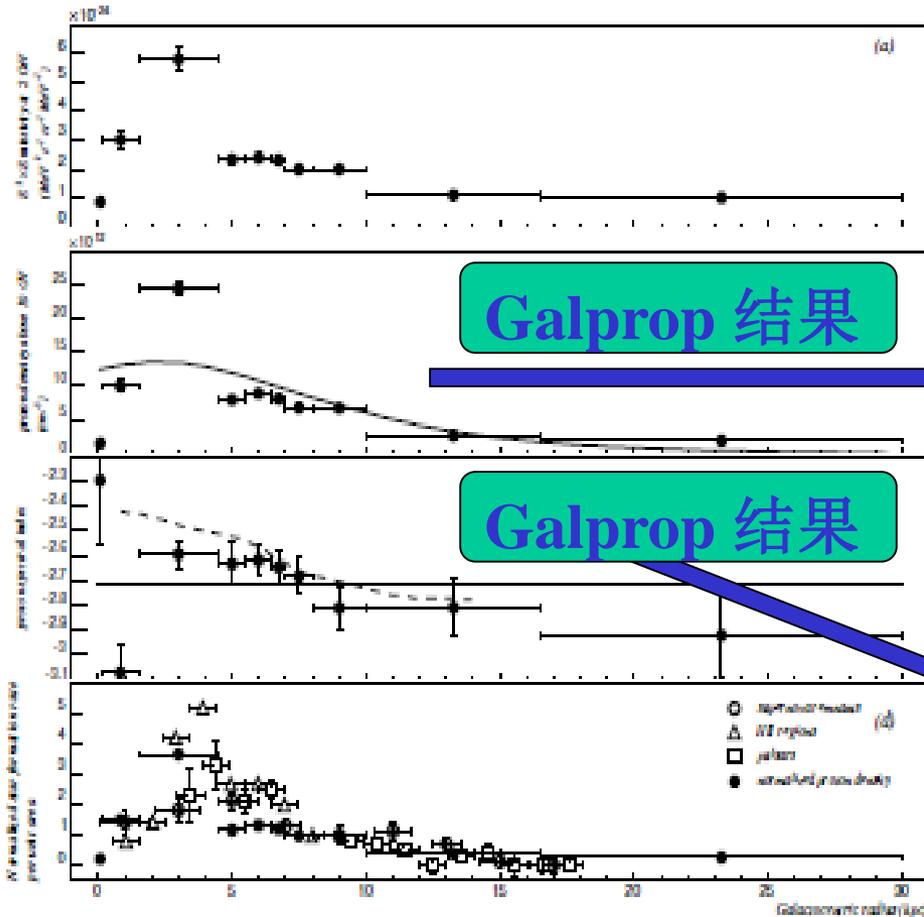
Guo et al., 2016, ApJ

# 两相传播模型：弥散伽马射线



Guo & Yuan, 2018, PRD

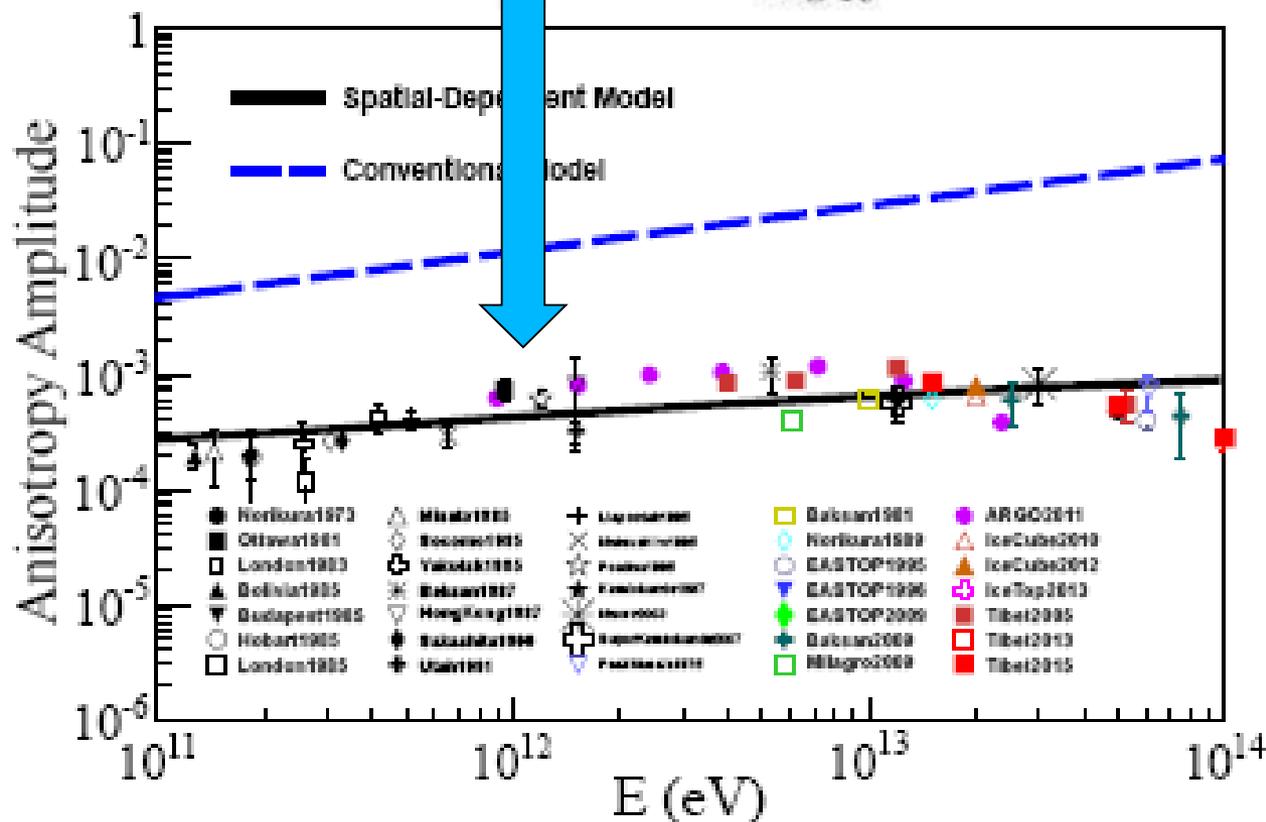
# 宇宙线“径向”分布问题



**Fermi-LAT 合作组文章**  
**ApJS 223 26 (2016)**

# 宇宙线各向异性问题

$$\delta_{\vec{x}} = \frac{3D(E) \nabla_{\vec{x}} n_{CR}(E, \vec{r}, t)}{c n_{CR}},$$



空间依赖传播能够在100GeV—100TeV  
能区在幅度上重复宇宙线各向异性。

# 各类模型相互比较

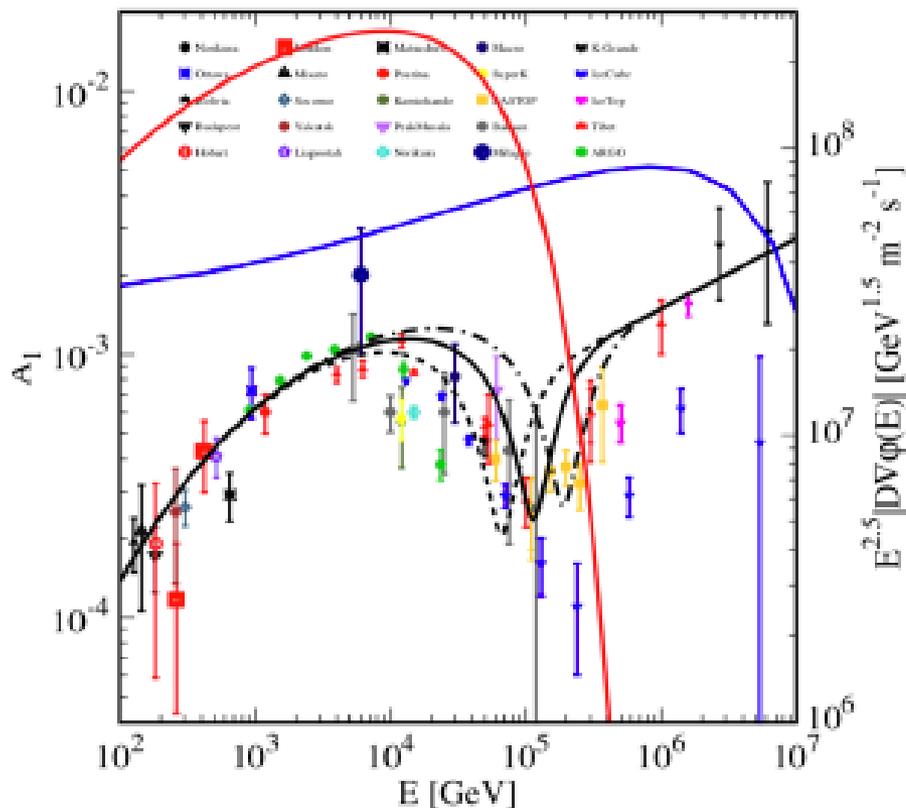
	Primary hardenings	B/C	$\bar{p}/p$	Spatial distribution	CR anisotropies	Diffuse $\gamma$ -rays	Ref.
Injection	√	○	○	×	×	?	[11]
Propagation	√	√	○	×	○	?	[12]
Two components A	×	√	√	×	×	√	[13]
Two components B	√	○	○	×	×	?	[14]
Local source	√	√	√	×	√	×	[15]
Superbubble	√	○	○	×	×	?	[16]
SDP	√	√	○	√	√	○	Our work

Note: “√” means good agreement, “×” means disagreement, “○” means marginal agreement, and “?” means not clear and more detailed analysis is needed.

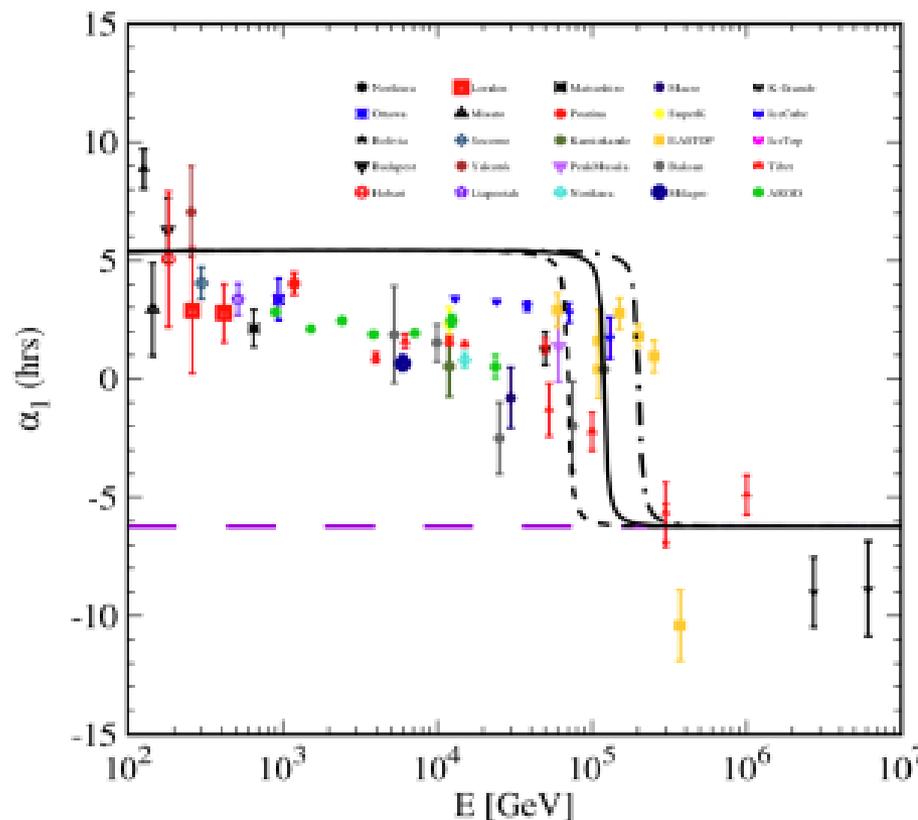
**Guo & Yuan, 2018, PRD**

# 临近源“Geminga”贡献

Amplitude



Phase

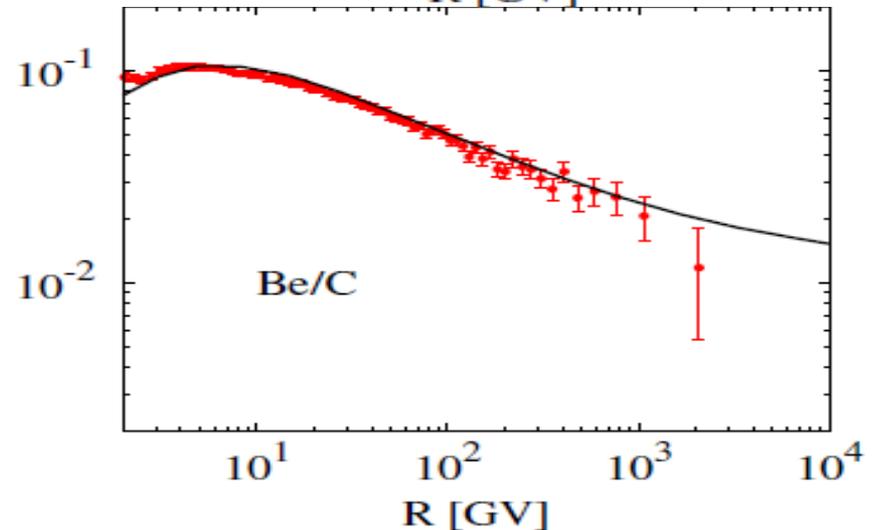
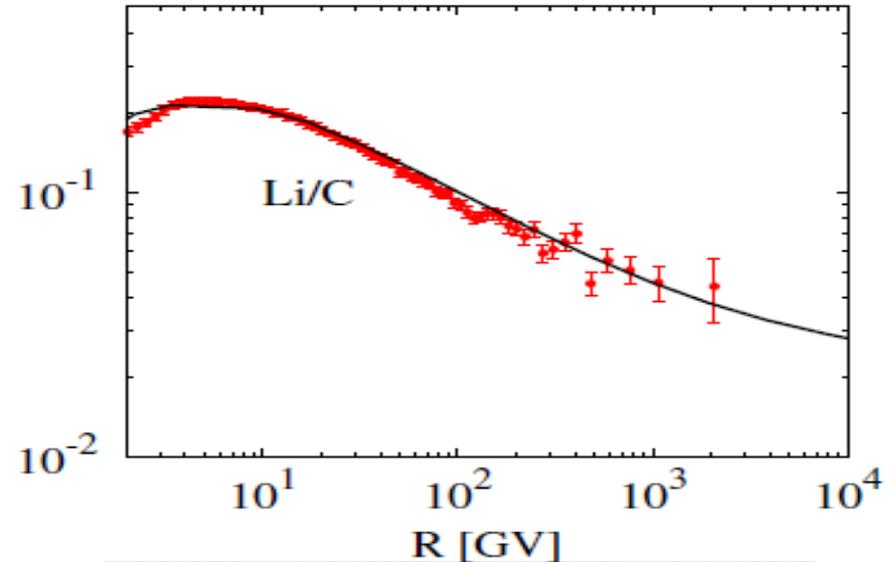
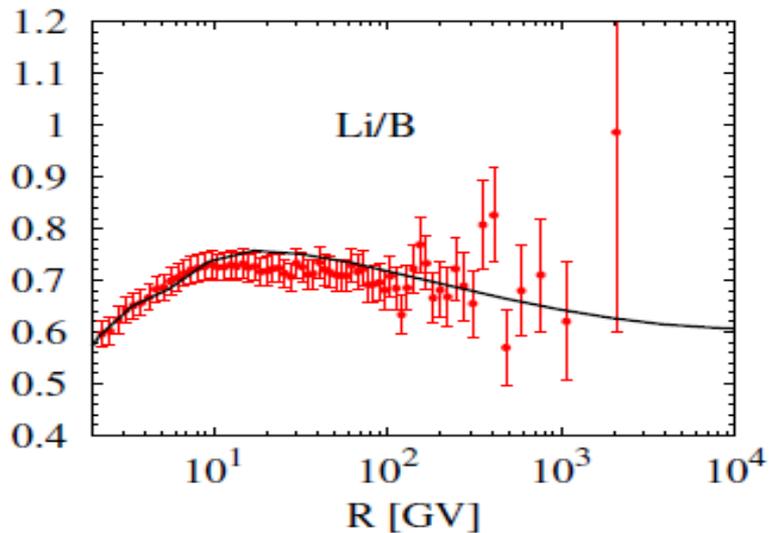


**Liu, Guo, Yuan (2018, in preparation)**

**(请参考本次会议刘伟博后报告)**

# 宇宙线空间依赖传播：AMS02最新观测 (Liu, Yao & Guo, arXiv:1802.03602)

1. AMS02 最新观测发表
2. 原初宇宙线符合
3. 次级宇宙线符合
4. 次级/原初比例符合



# 总 结

- 初级和次级宇宙线能谱在**高能段变硬**，**银盘伽马射线存在硬成分**，**宇宙线能谱随空间位置变化**
- **传统传播模型解释观测数据存在困难**
- **空间依赖传播**：可以理解硬成分的来源，同时解释原初，次级粒子超出；可以更好的描述宇宙线的各向异性，空间宇宙线分布等

**谢谢大家！**