

空间依赖的宇宙线 传播模型研究

报告人：郭义庆
(合作者：胡红波，田珍，靳超等)

首届LHAASO合作组会议
2016/08/17—天津，南开大学

主要内容

1. 宇宙线传播模型
2. 最近实验观测结果
3. 硬成分宇宙线对次级粒子超出贡献
4. 产生硬成分一个机制：空间依赖
宇宙线传播模型
5. 总结

1. 宇宙线传播模型

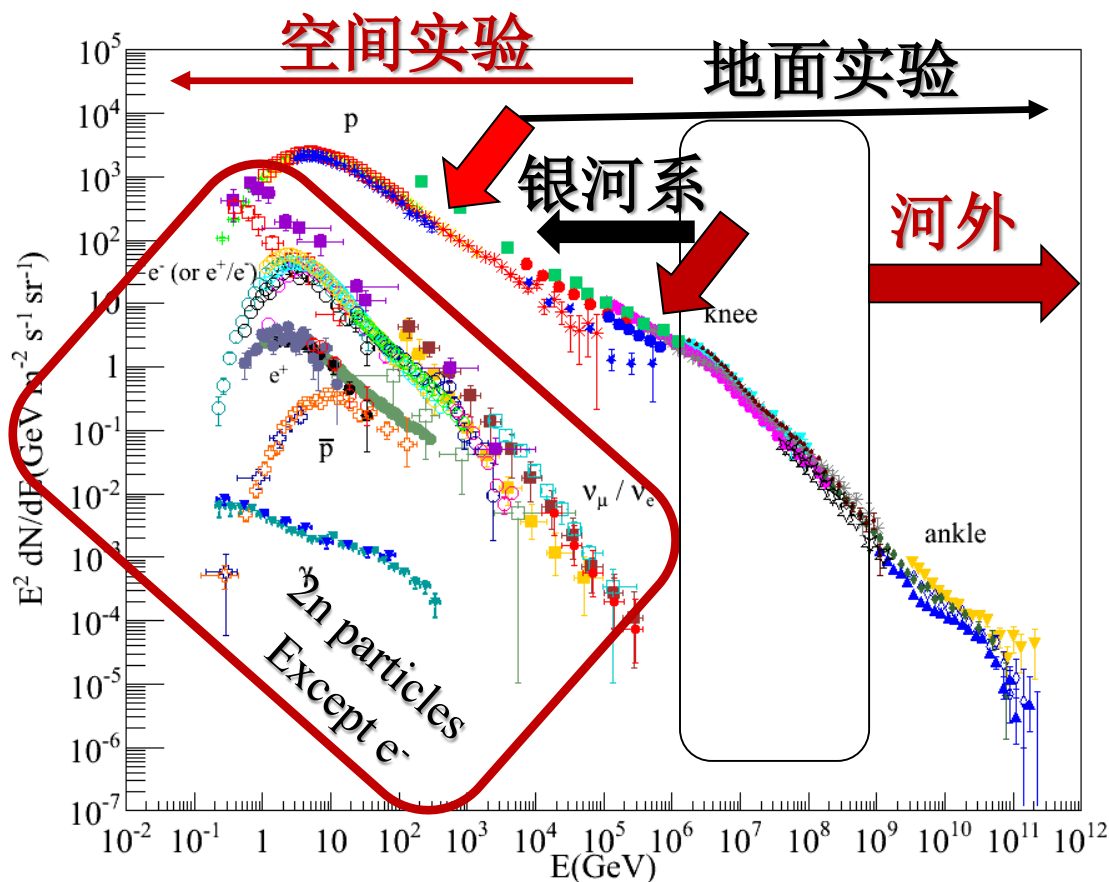
宇宙线能谱

能量:

- 范围: $10^9 - 10^{20}$ eV
- 最高能量: 3×10^{20} eV

能谱: 近似幂率

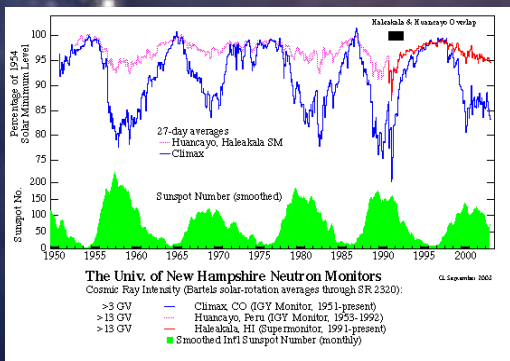
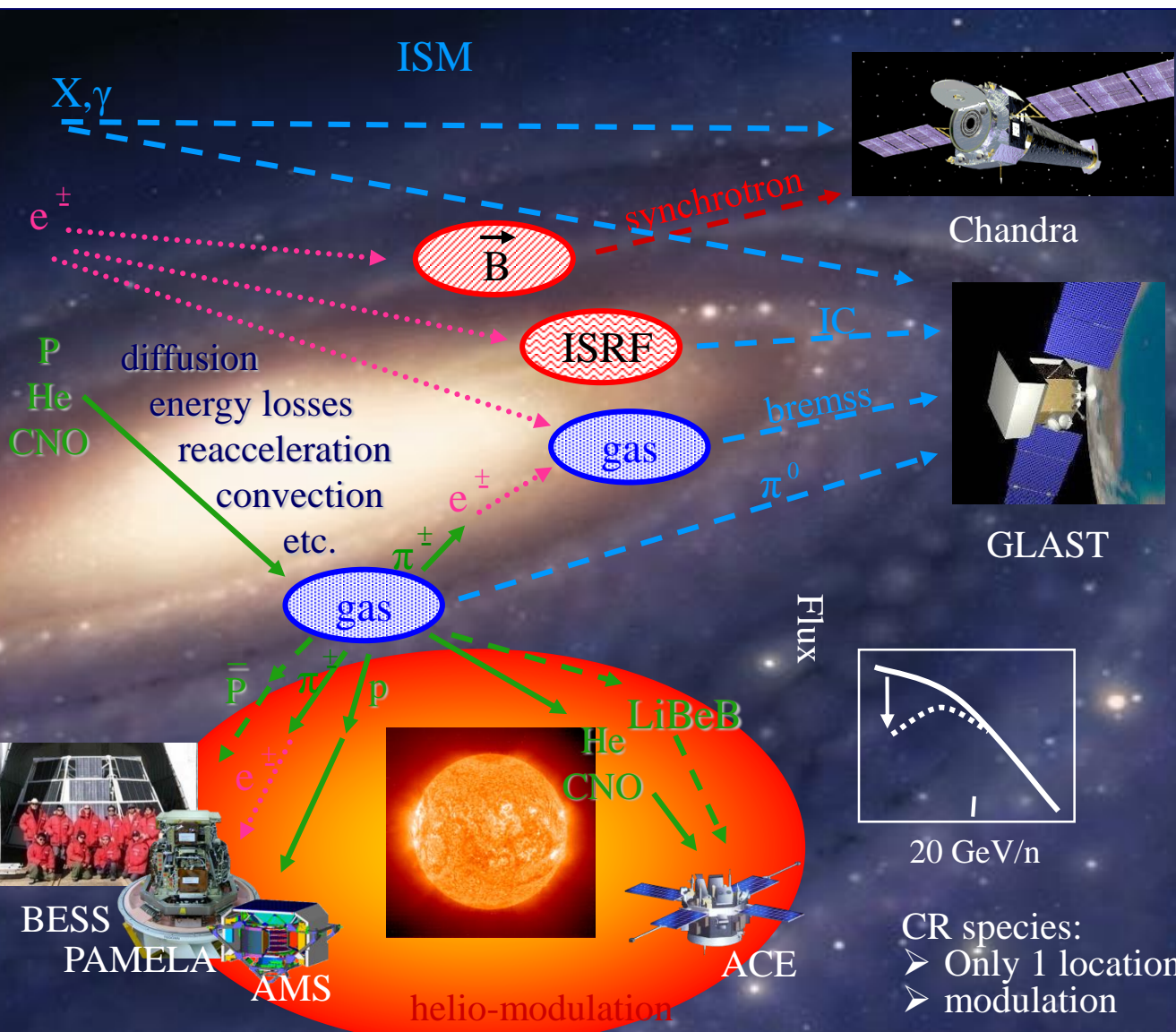
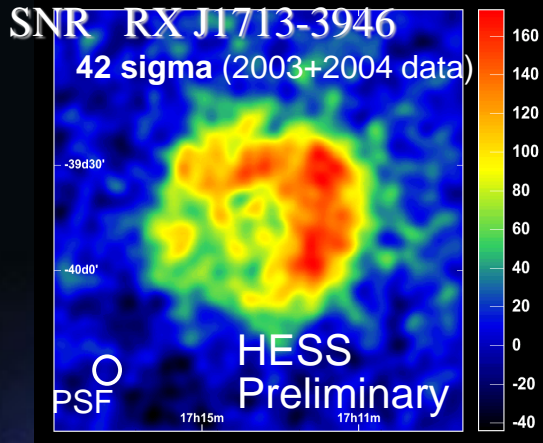
- 年龄: $\sim 10^7$ 年
- 能量密度: 1 eV/cm^3
- 亮度: 10^{41} ergs/s
- 能谱结构:
 0. ~ 200 GeV: 能谱变
 1. ~ 4 PeV: “膝”
 2. ~ 30 PeV: “第二膝”
 3. ~ 4 EeV: “踝”
 4. ~ 40 EeV: GZK 截断



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

宇宙线传播图像



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

宇宙线传播方程

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

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

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

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

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

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

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

传统传播模型中宇宙线能谱

1. 稳态解决方法:

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

2. 空间“各向同性”传播:

$$D_{XX} = \beta D_0 (\rho / \rho_0)^{-\delta}$$

3. 宇宙线注入能谱: $q(r, E) = J_0 * E^{-\beta}$

4. 得到 → “整个银河系” 单一幂率能谱:

需要观
测验证

(1) 原初宇宙线:

$$F(E) \sim q(r, E) / D_{XX} \sim JE^{-\beta-\delta}$$

(2) 次级粒子与原初粒子比例: $\sim E^{-\delta}$

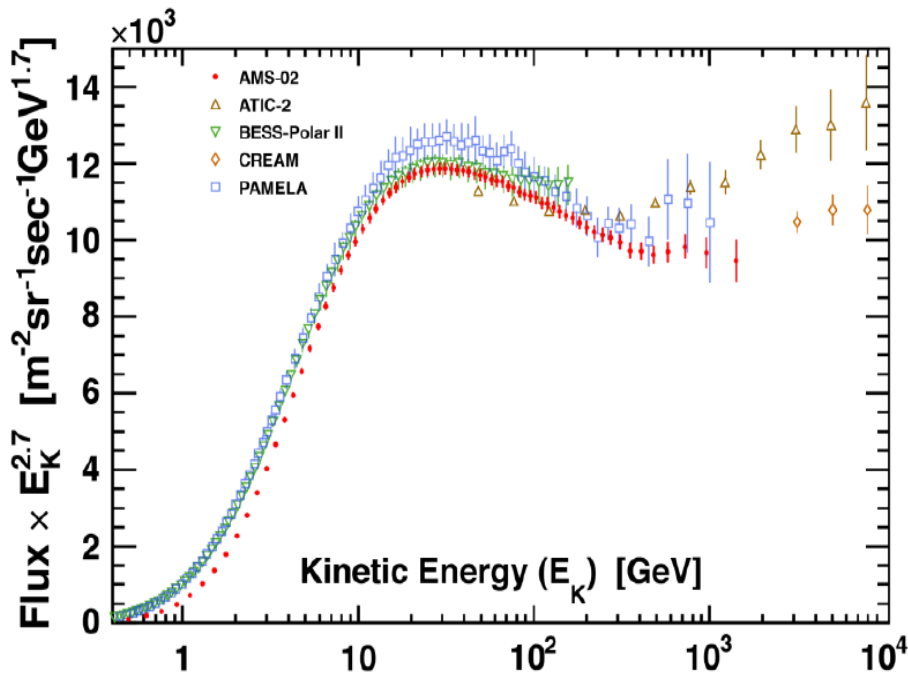
(随能量快速下降)

2. 最近实验观测结果

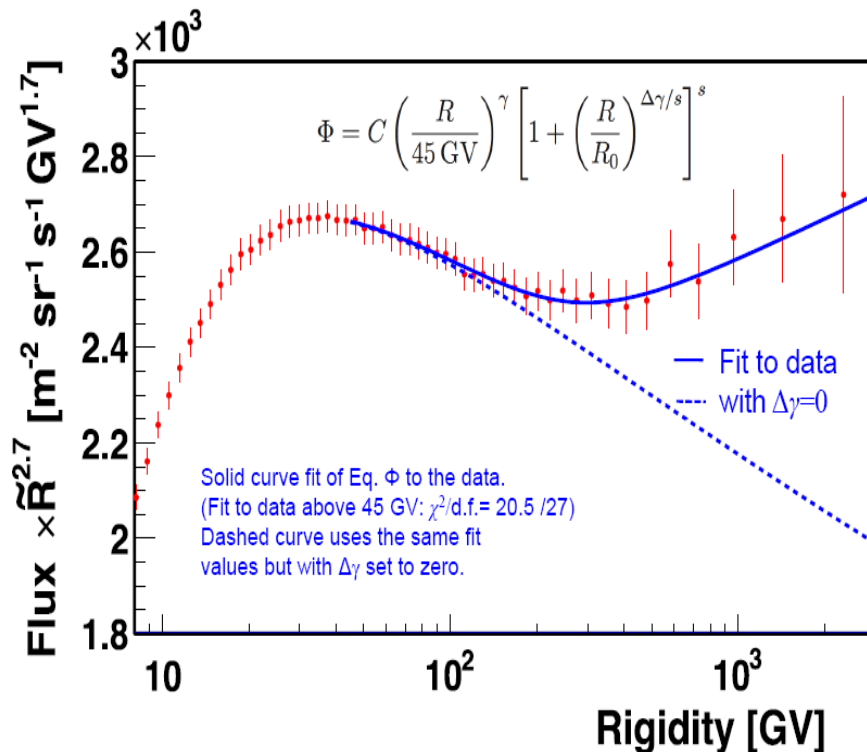
- (1) 原初宇宙线粒子谱
- (2) 次级宇宙线粒子谱

宇宙线能谱200GV变硬

AMS proton flux

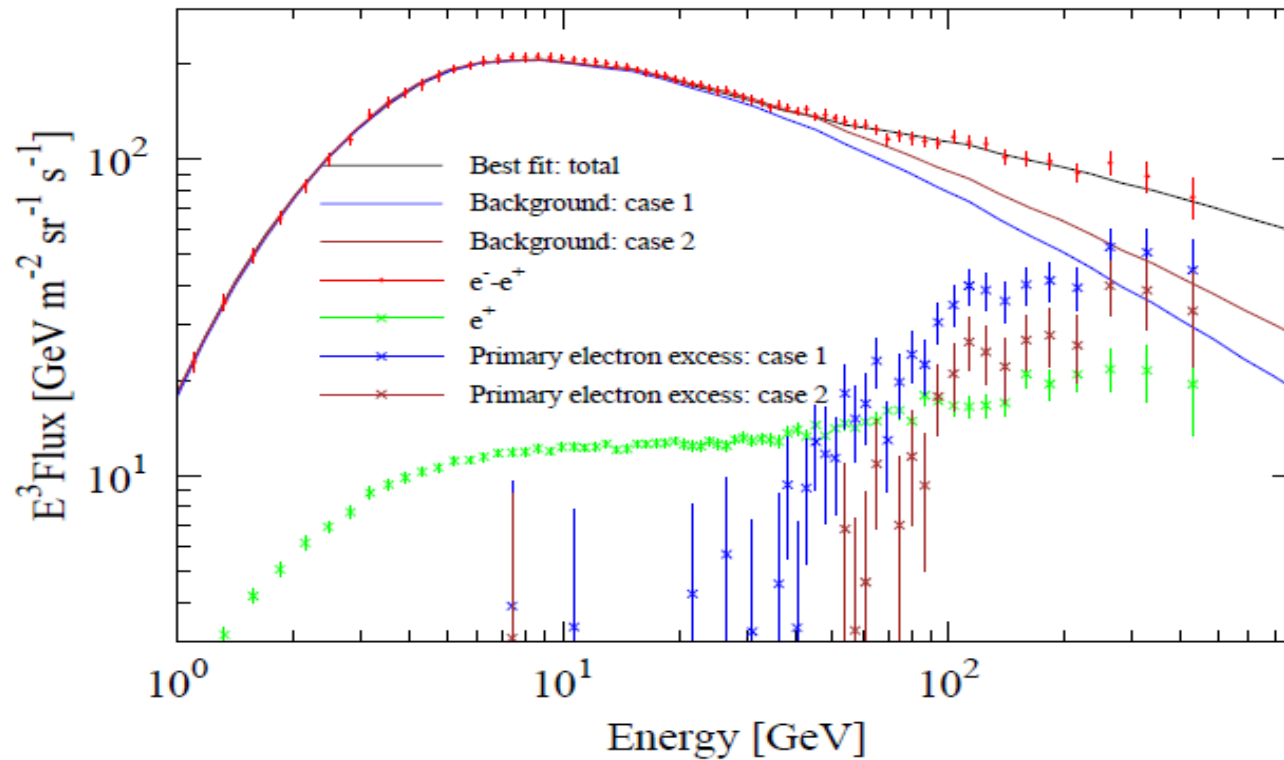


AMS Helium Flux



结果来自于丁肇中先生 2015在AMSDays报告

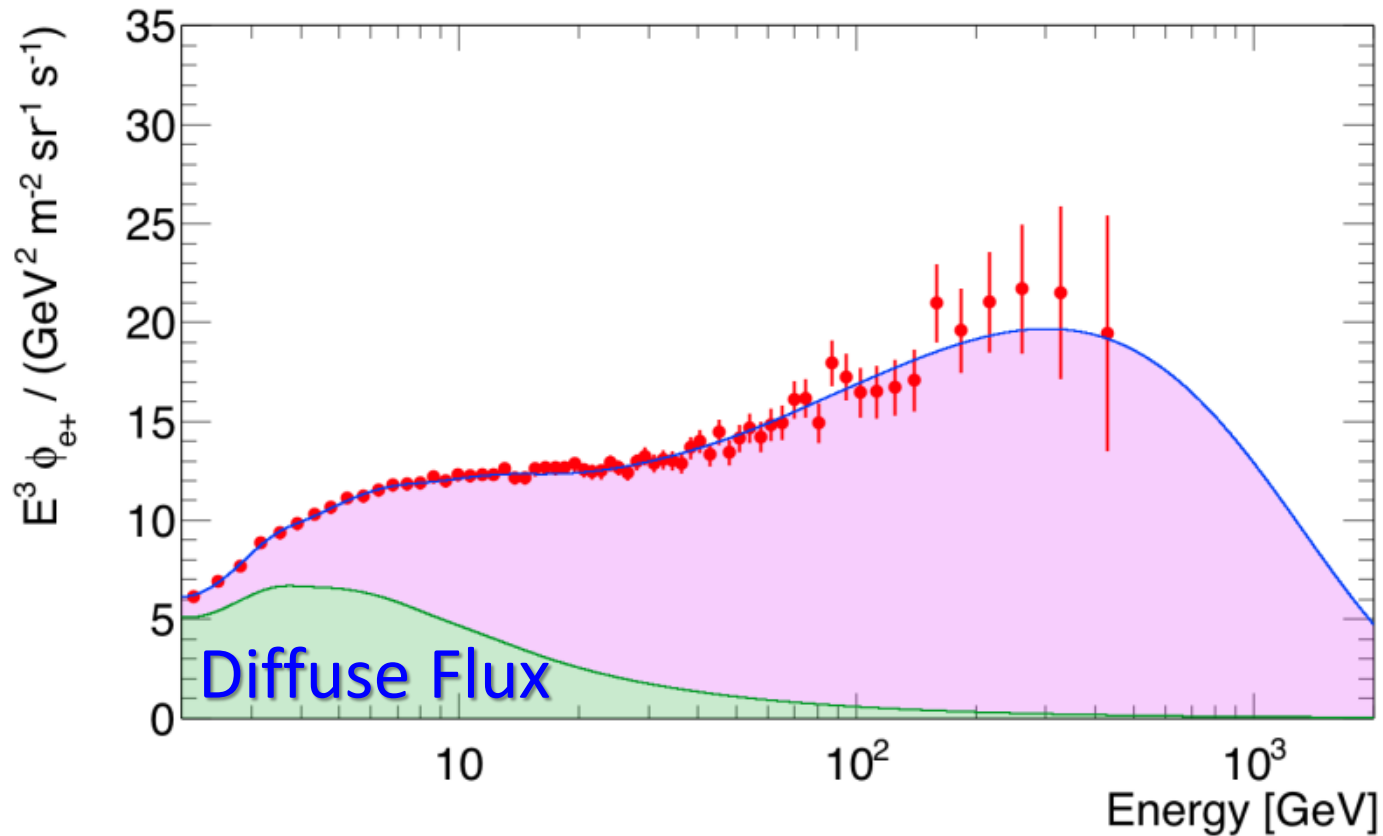
原初电子存在“超出”



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

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

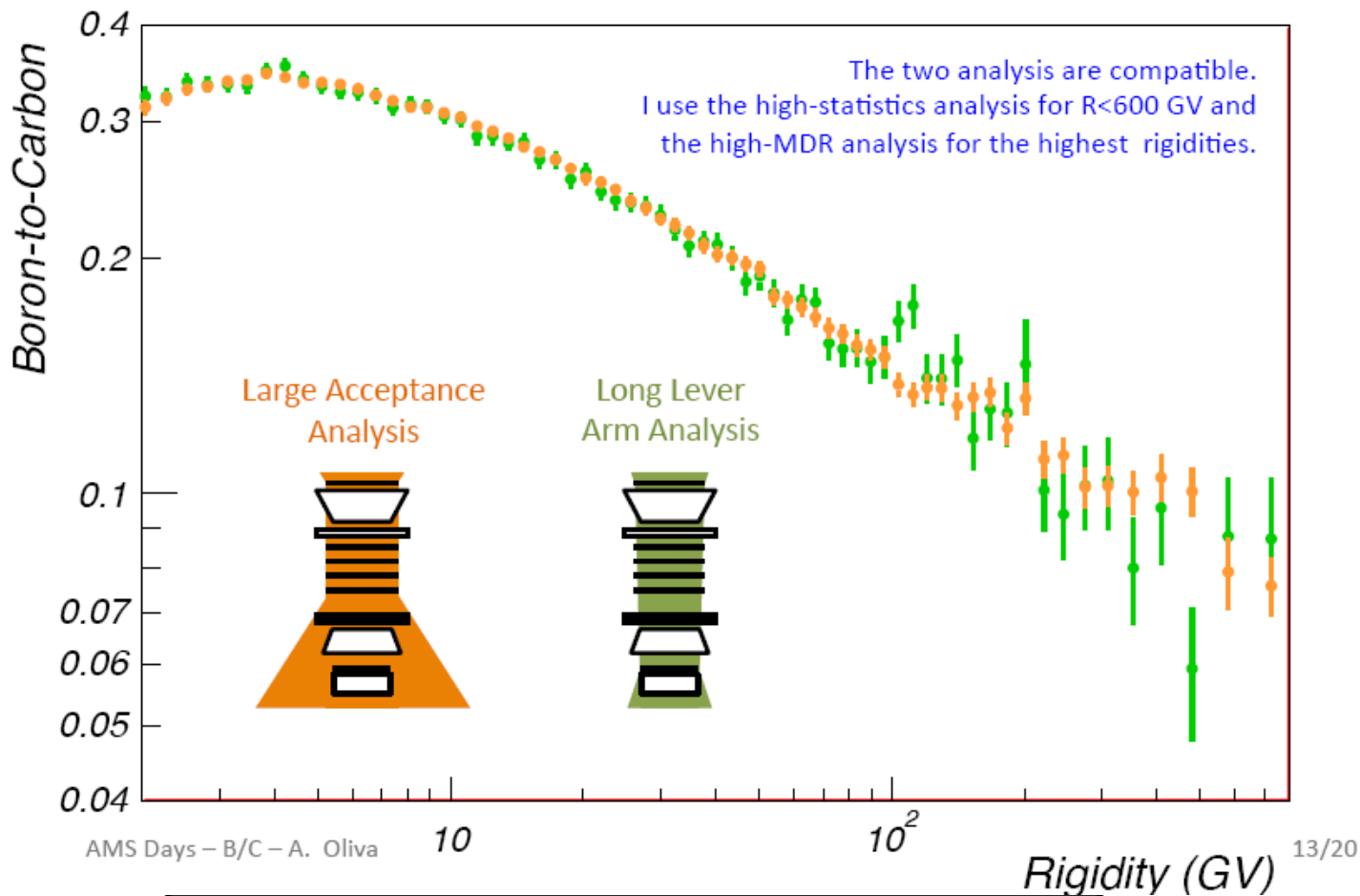
研究热点：正电子超出



起源：暗物质，宇宙线，Pulsar，其它？

B/C比 (AMS02)

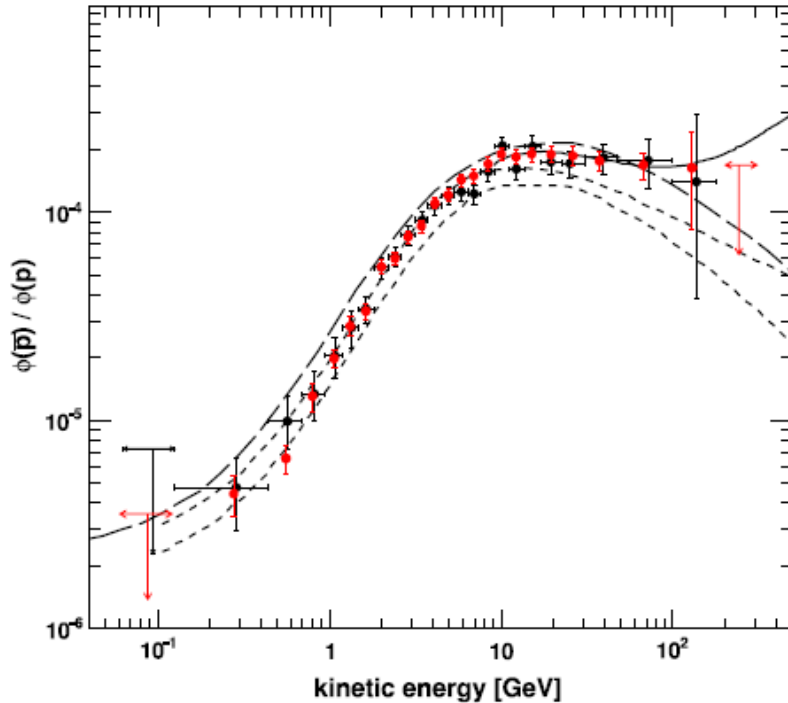
Verification of Unfolding and Acceptance



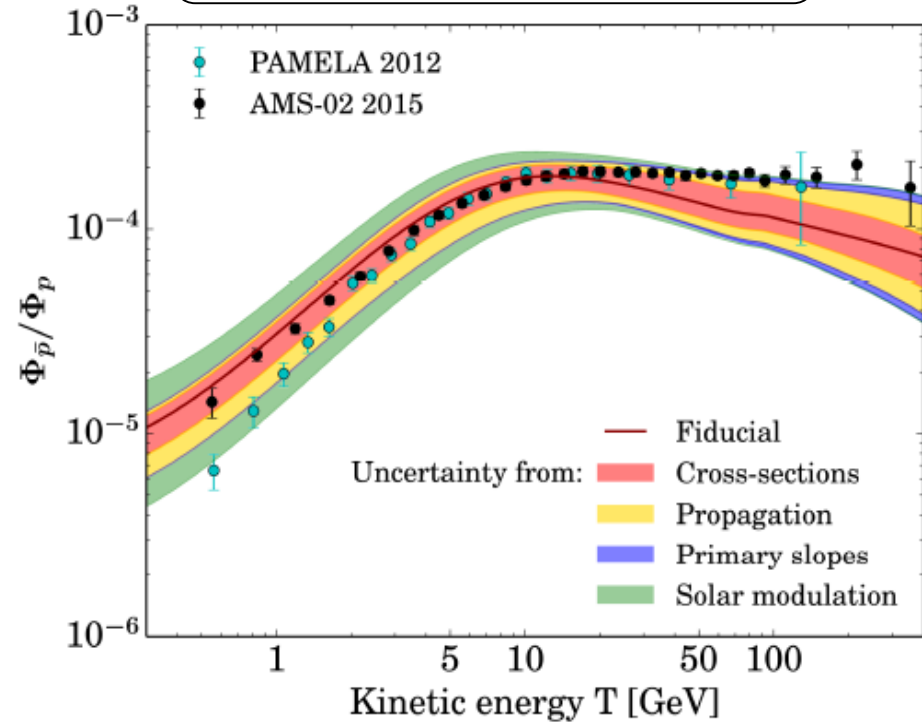
是否存在拐折，需要进一步验证！

正反质子比

Phys. Report, 2014_S



arXiv:1504.04276

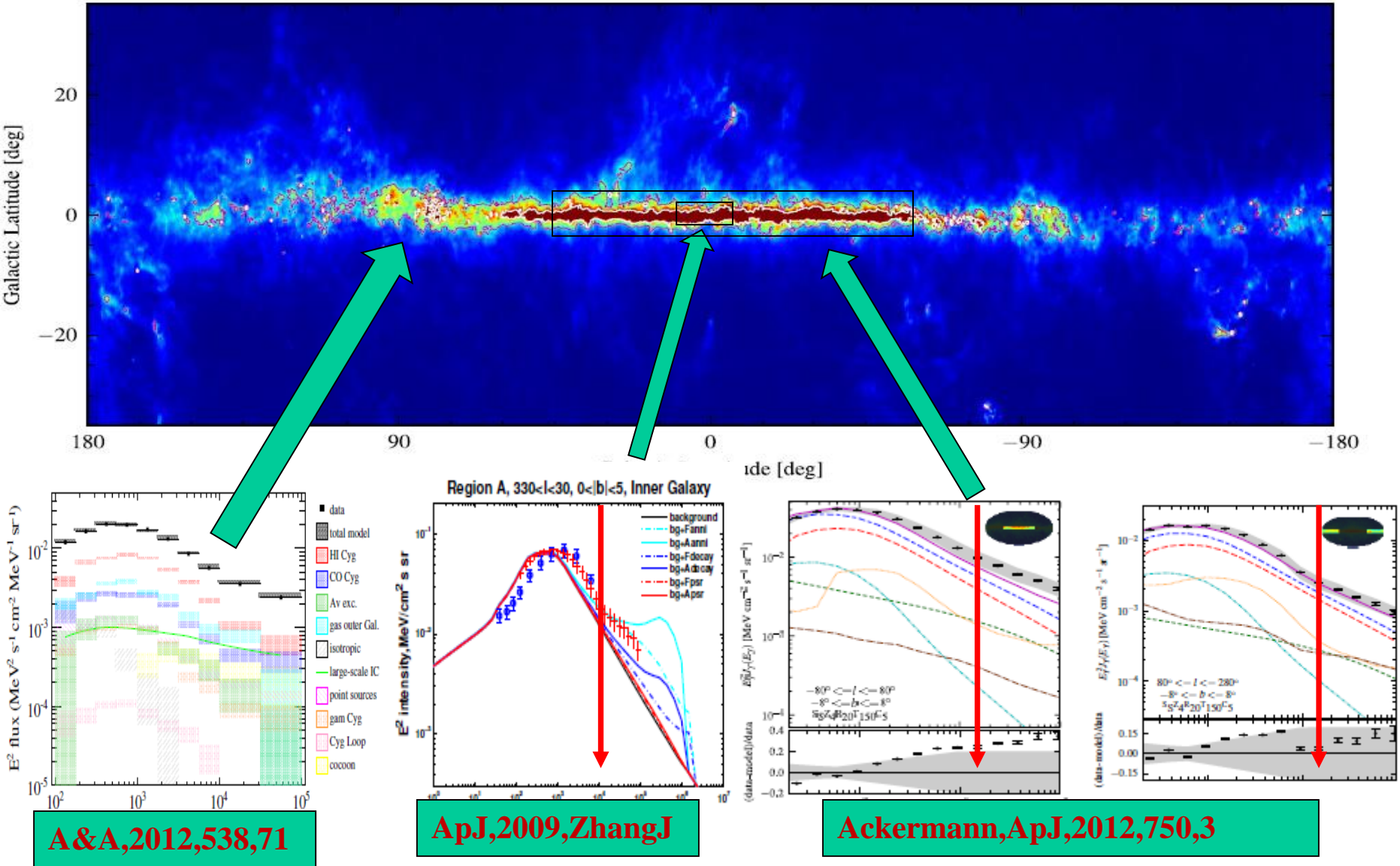


AMS02 观测到与传统模型不一致的分布 !!!

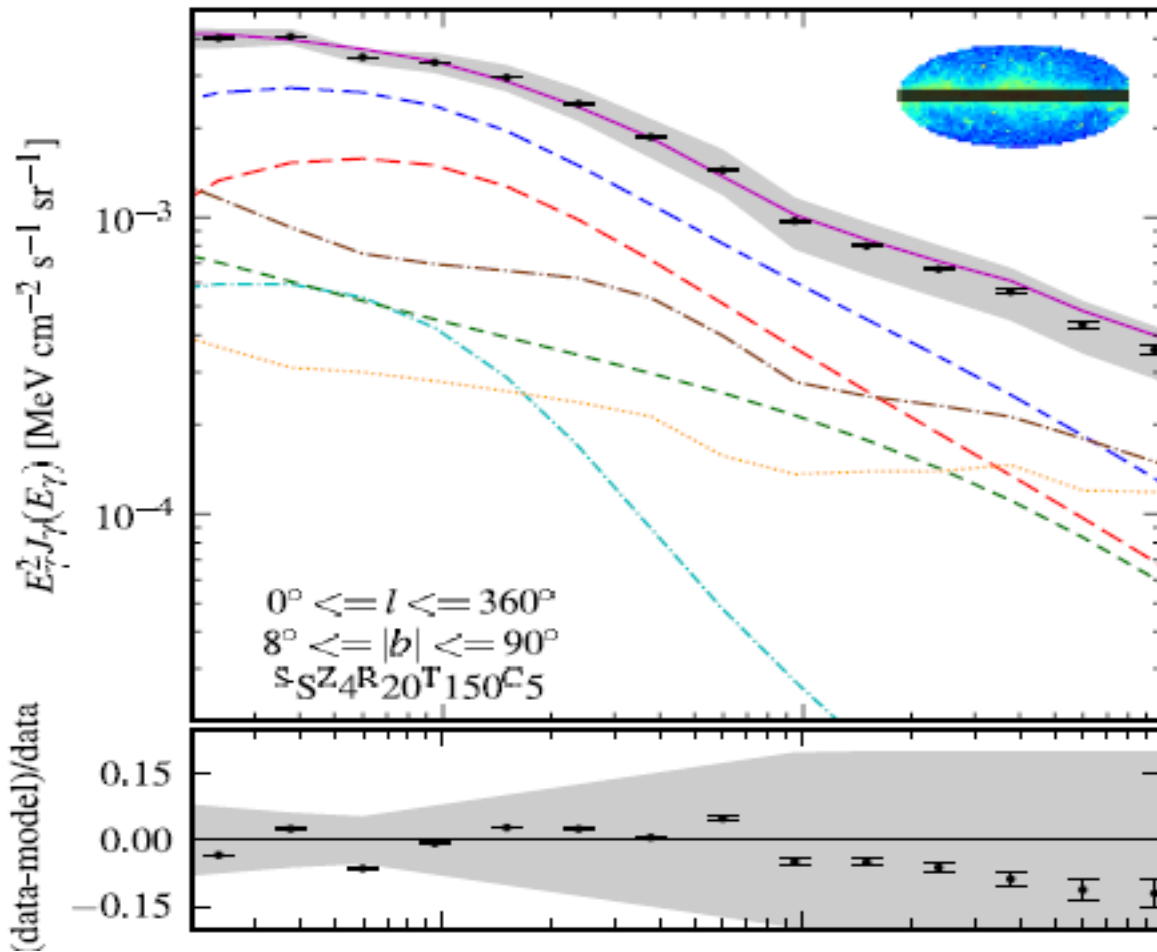
TeV 以上能量如何 ?

银盘弥散 γ 射线超出

Break @ ~ 10 GeV



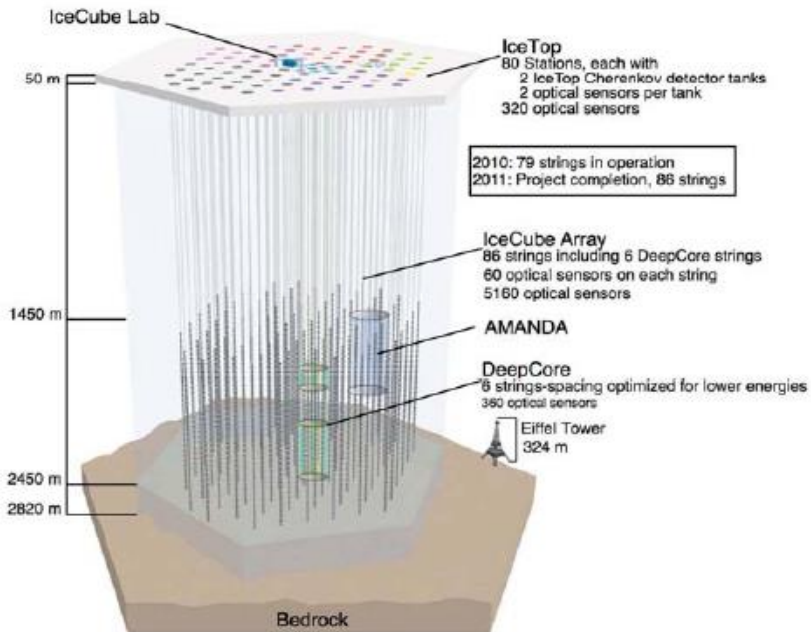
银晕观测与传统传播模型一致



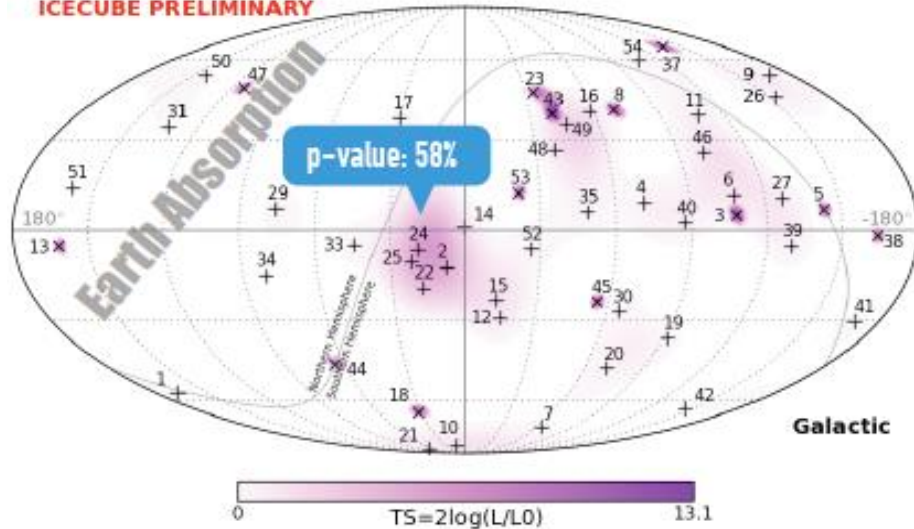
“超出” 仅仅
在银盘！

Ackermann, ApJ, 2012, 750, 3

IceCube 中微子



ICECUBE PRELIMINARY



中微子:

1. 总事例数: **54**
2. 本底: **~22**
3. 天体中微子: **~32**
4. 显著性: **6.5 σ**

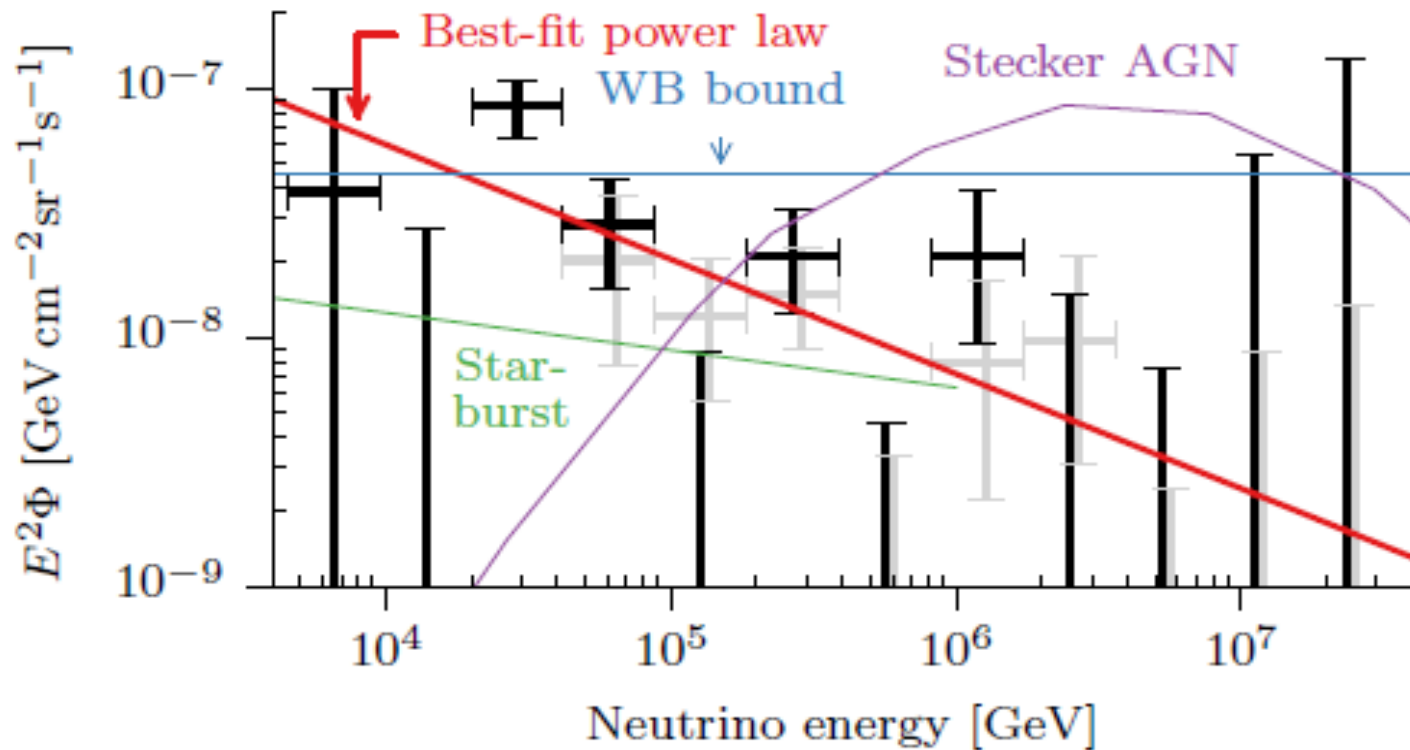
到达方向:

1. 各项同性:

PRL, 2014, arxiv:1405.5303

2. 各向异性: **银盘超出?**

IceCube 中微子能谱



- (1) 包括TeV能量: **2.46**
- (2) 能量从30TeV: **2.0-2.3**
- (3) 传统模型中pp碰撞: **~2.6**

宇宙线粒子 “超出” 可能的起源

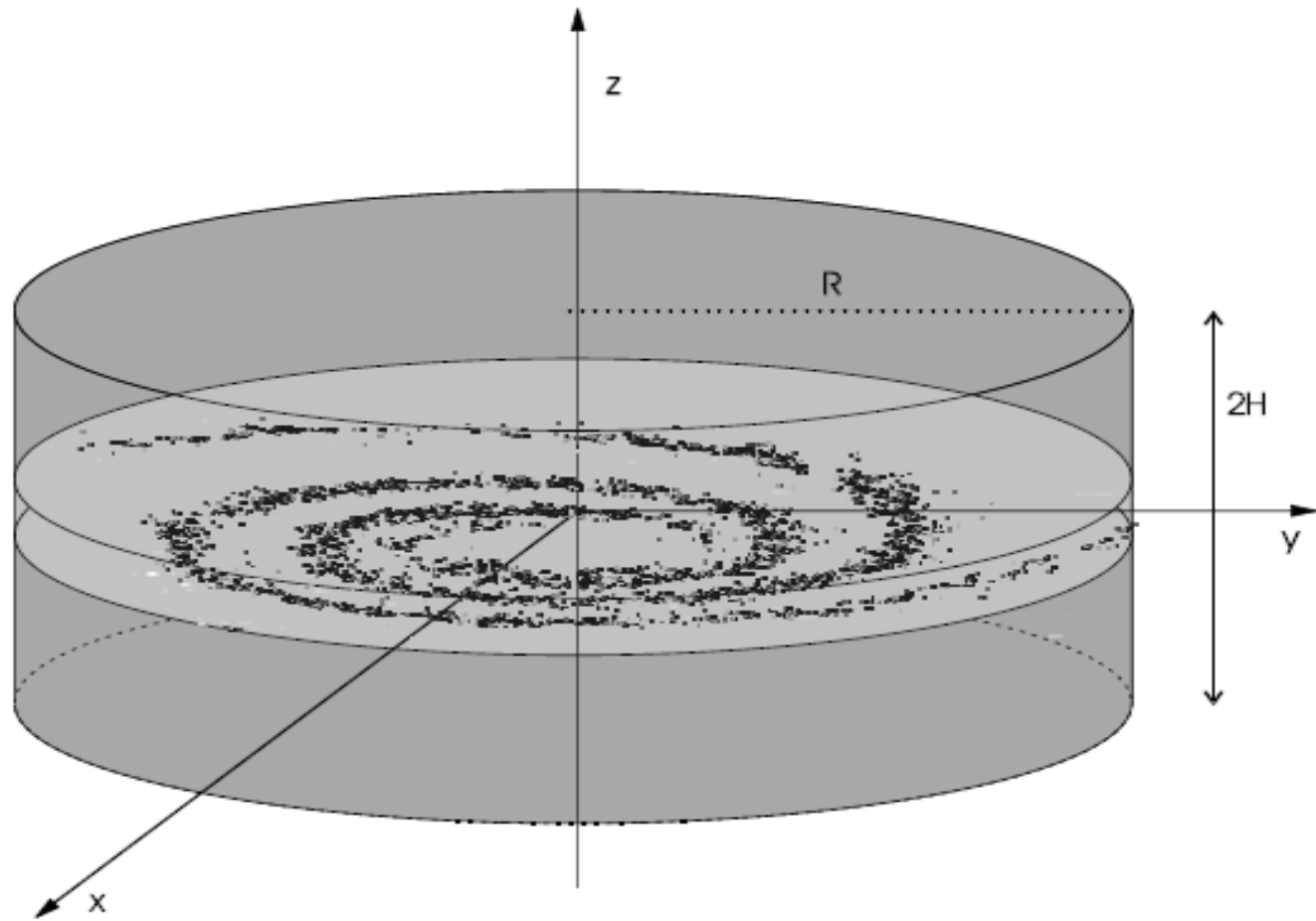
1. 天体源: Pulsar, SNRs, ...
2. 新物理: Dark Matter ...
3. 双区域宇宙线传播: Disk & Halo

宇宙线能谱解释模型

Mode	Model	Author ¹	reference
Primary CRs	Nearby SNRs	Thoudam, et al.	2012,MNRAS,421,1209
	Acc Mechanisms	Biermann, et al.,	2010,ApJ,725,184
	Group Sources	Yuan Q., et al.	2011,PRD,84,043002
	THM	Tomassetti	2012,ApJ,752,13
		Jin C., et al.,	arXiv:1504.06903
Positron Excess	DM	Bergström, et al.,	2008,PRD,78,3520
		Barger, et al.	2009,PLB,672,141,....
	Pulsar SNRs(pp) SNRs(γ p)	Yüksel, et al,	2009,PRL,103,1101,....
		Blasi	2009,PRL,103,1104,....
		Hu H.B., et al.	2009, ApJ, 700,170
IceCube Neutrino	GC	Razzaque	2013, PRD,88,130
	Fermi Bubbles	Ahlers, et al.	2013, PRD, 90, 23010
	Point Sources	Fox, et al.	2013, ApJ,774,74,....
	Galactic Halo	Taylor,et al.	2014,PRD,89,3003
	Fresh CRs	Guo, et al	2014,arXiv:1412.8590
	Extra-Galaxy	Liu, et al.	2014,PRD,89,3004,....

是否存在“普适”模型解释
所有(或者尽量多)超出？

双Halo模型中宇宙线能谱



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

银盘成分

Halo 成分

双Halo模型解释原初宇宙线变硬 (Tomassetti, 2012, ApJ, 752,13)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 752:L13 (5pp), 2012 June 10

TOMASSETTI

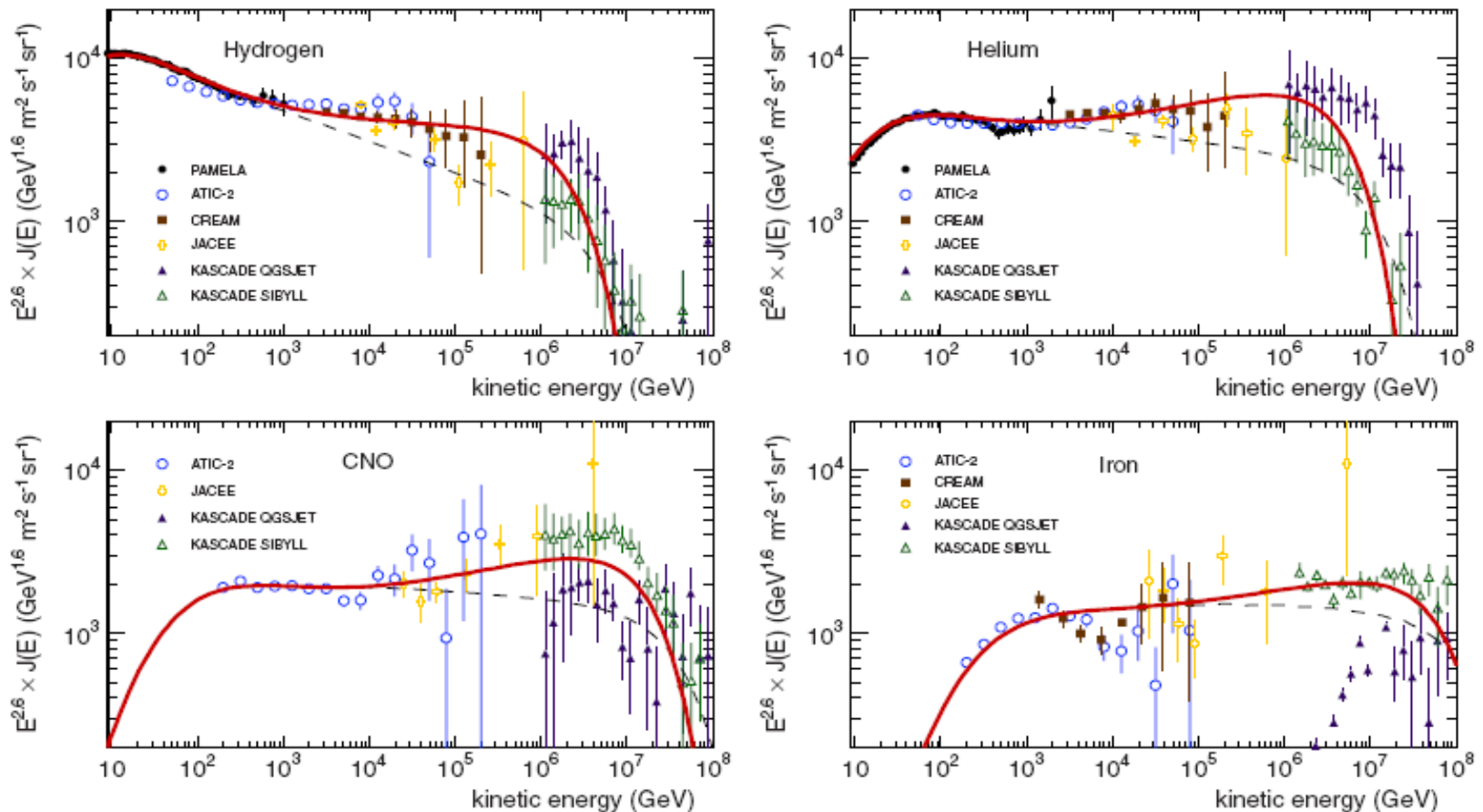
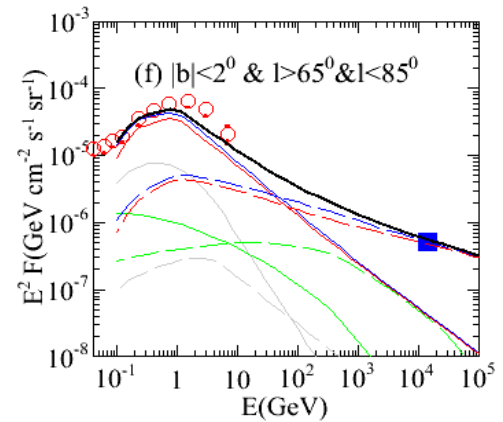
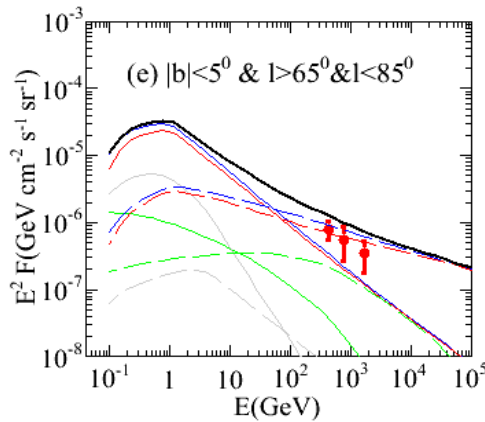
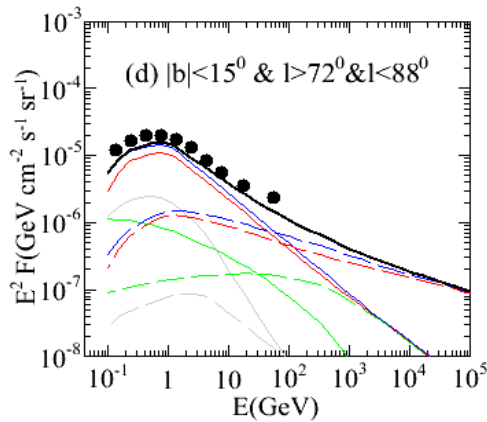
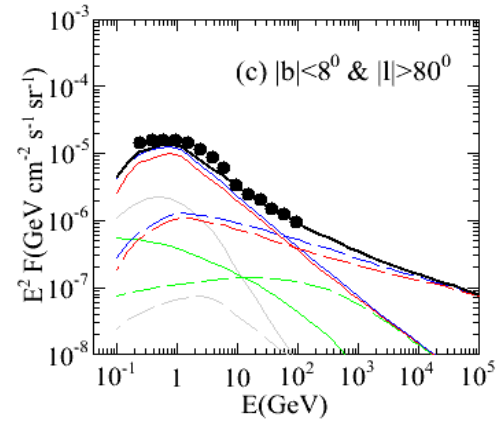
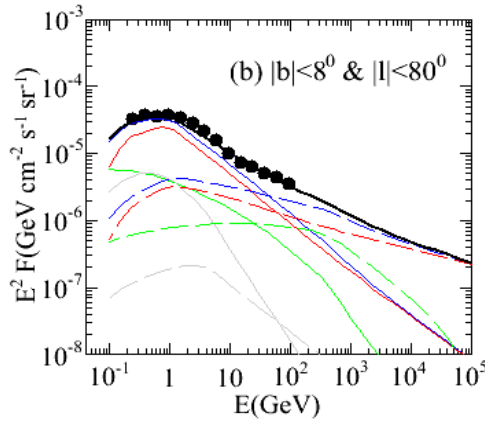
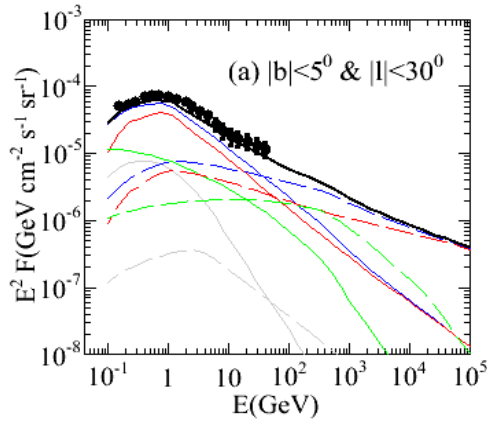


Figure 1. CR spectra for H, He, CNO, and Fe from our calculations and data as function of kinetic energy. The data are from *PAMELA* (Adriani et al. 2011), *ATIC-2* (Panov et al. 2009), *CREAM* (Ahn et al. 2010; Yoon et al. 2011), *JACEE* (Asakimori et al. 1998), and *KASCADE* (Antoni et al. 2005).

(A color version of this figure is available in the online journal.)

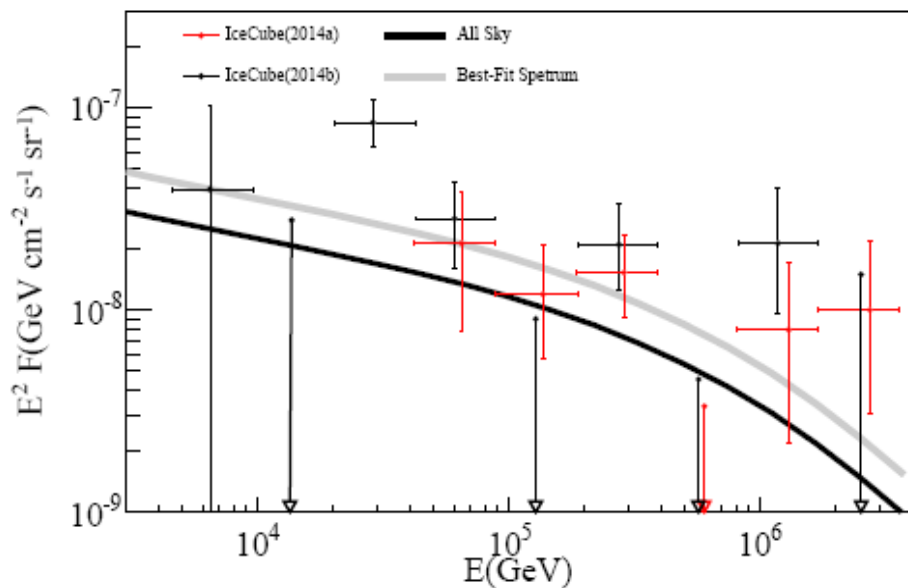
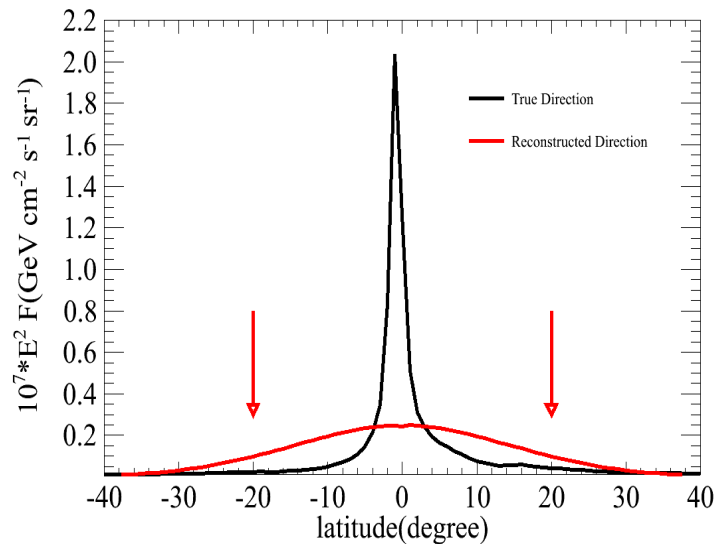
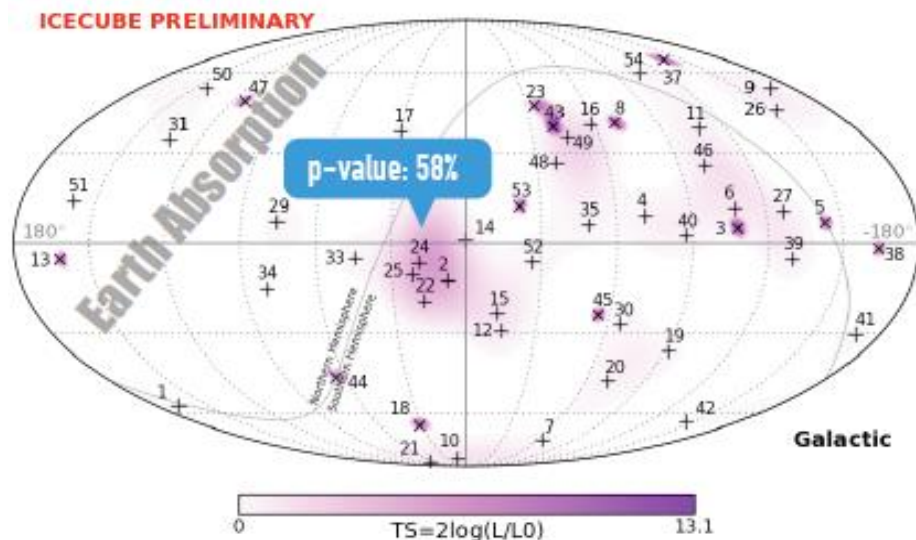
3. 银盘硬成分宇宙线对 次级粒子超出贡献

银盘弥散伽马射线超出



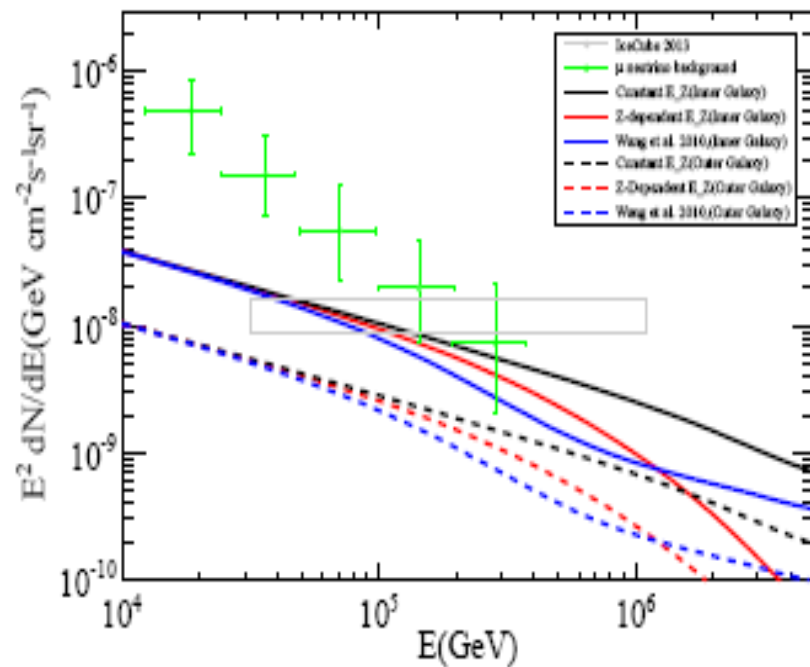
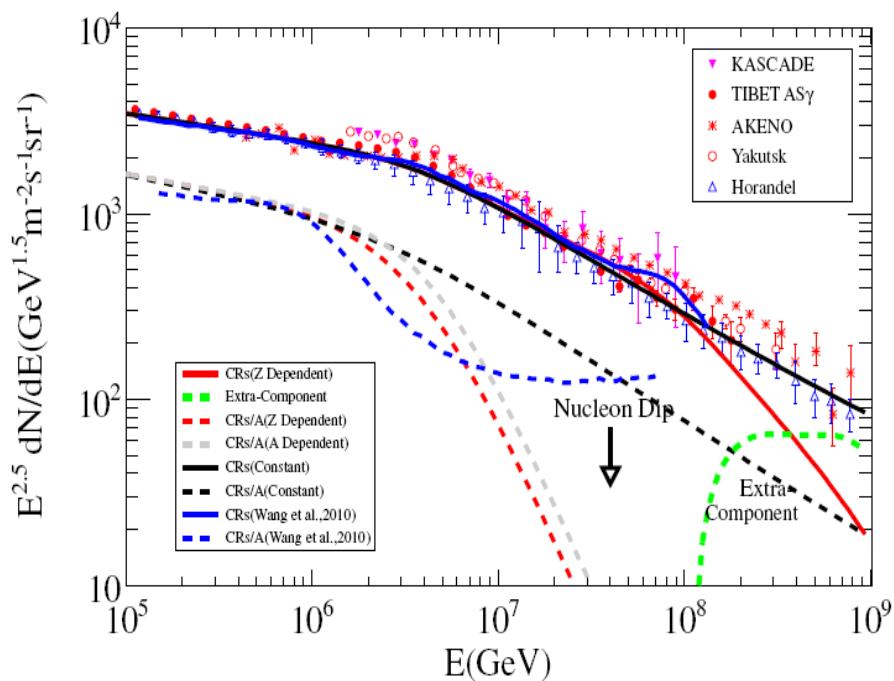
1. 银盘：模型与实验观测符合很好
2. CYGNUS区：比FermiLat低25%，与ARGO,MILAGO测量一致。

弥散中微子



- (1) 硬成分宇宙线贡献~60%
IceCube 中微子（依赖于我们能谱外推方法）
- (2) 能谱测量误差还较大
- (3) 河外贡献
- (4) LHAASO 将来观测能给出很好的限制。

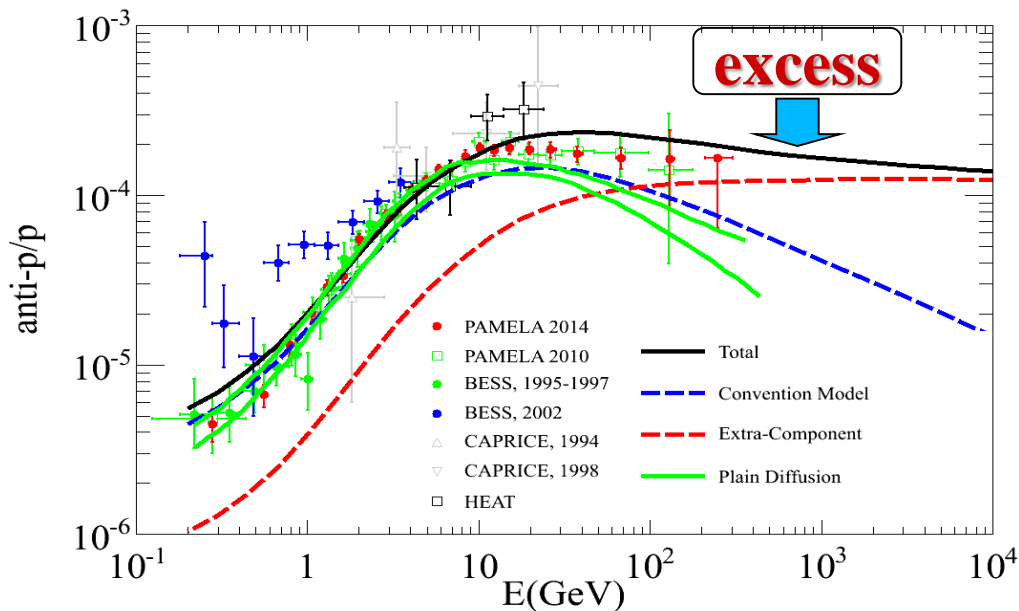
传统传播模型宇宙线相互作用产生中微子



传统传播模型宇宙线相互作用产生中微子贡献~10% → 银河宇宙线贡献IceCube中微子在10%--60%之间

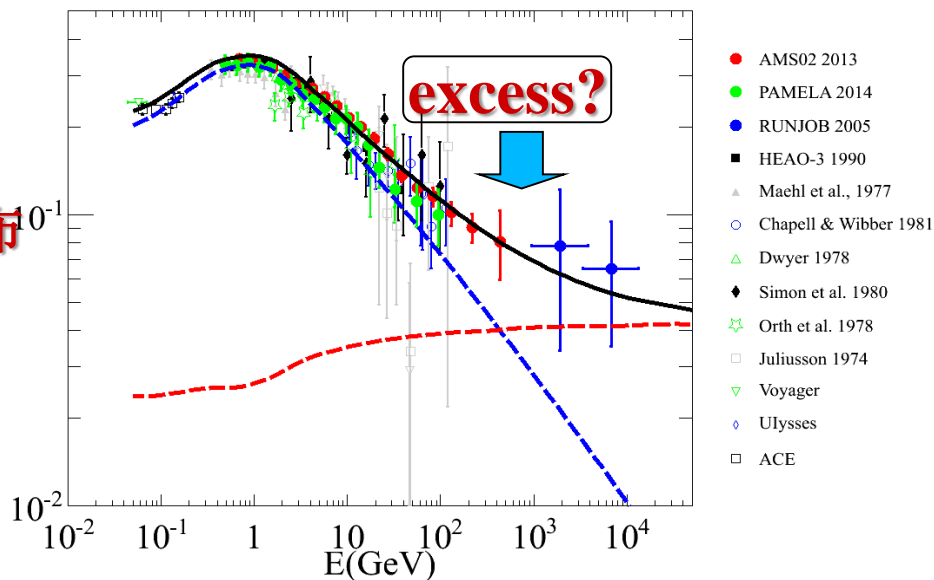
Guo Y.Q., Hu H.B., Yuan Q., et al., *ApJ*, 2014, 795, 100

正反质子 & B/C 比

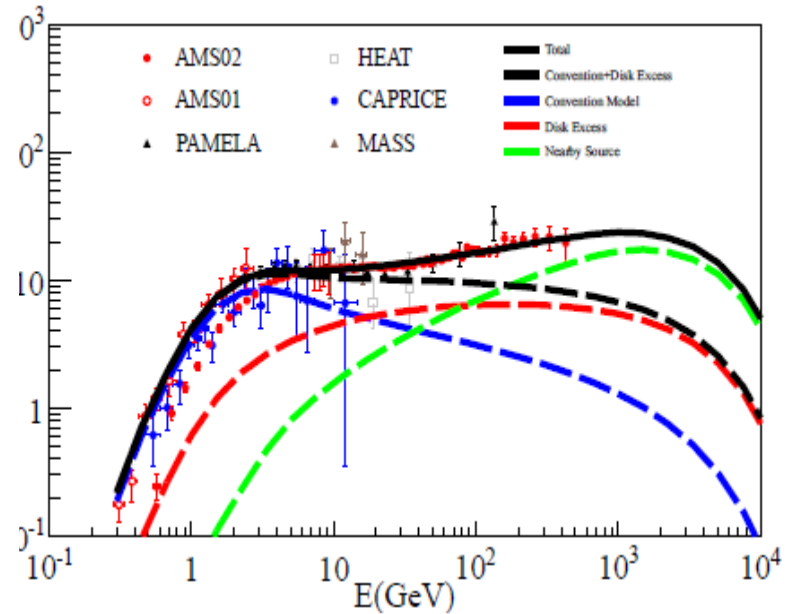
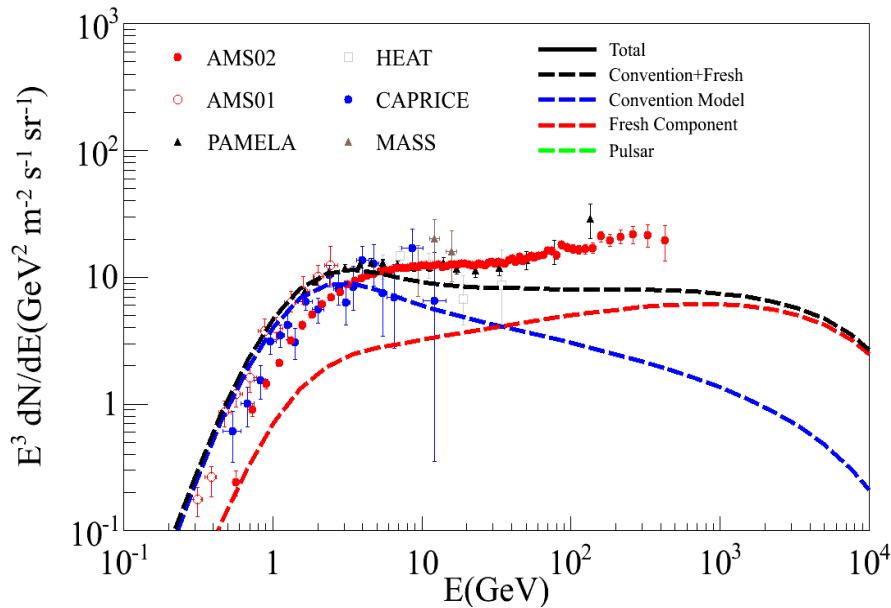


- (1) 传统模型正反质子比随能量快速下降。
- (2) “年轻”宇宙线:正反质子比随能量平直分布, 与AMS02最新测量结果一致! 期望TeV能区观测。

1. 传统模型: 不能出现拐折, 分布随能量快速下降
2. 硬成分宇宙线: 能产生拐折, 分布随能量平直变化。
3. 期待AMS02结果验证, 尤其是TeV能区。



正电子超出



1. 硬成分宇宙线贡献部分正电子，主要原因是电子能损，如果不考虑能损，很好解释正电子超出（有研究讨论了这个问题）
2. 临近源？
3. 进一步研究：硬成分宇宙线+双Halo模型中空间依赖传播→同时解释原初与次级粒子超出

4. “硬成分”宇宙线来源

→ 空间依赖的传播

空间依赖的宇宙线传播

(Jin C., et al., arXiv:1504.06903)

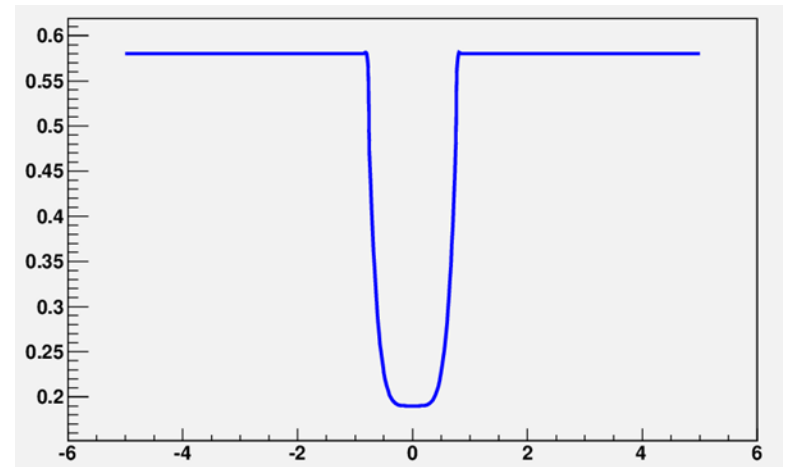
(1) 传统传播模型:

$$D_{xx} = \beta D_0 (\rho / \rho_0)^\delta$$

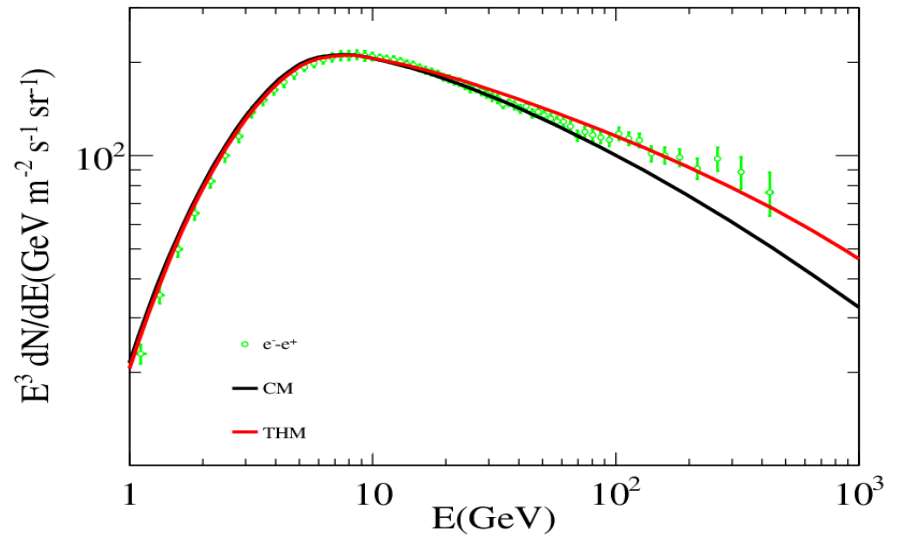
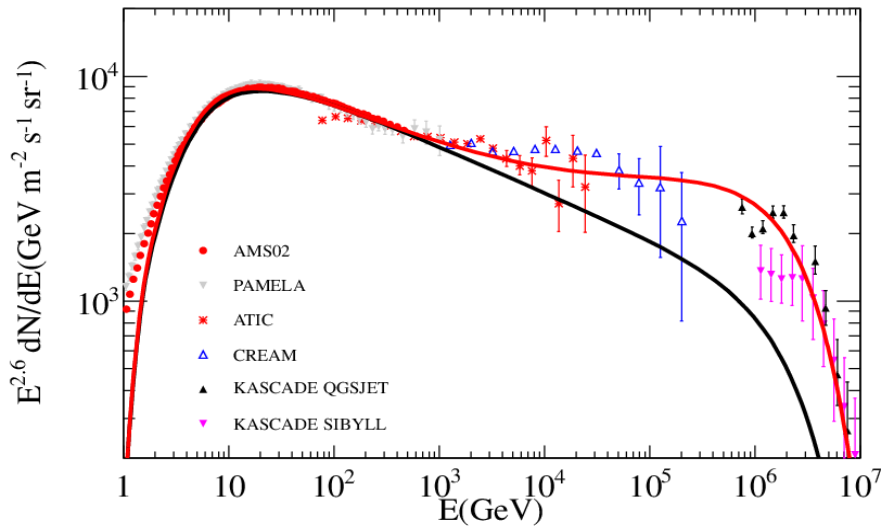
(2) 双Halo模型:

$$D_{xx} = \beta D_0 (\rho / \rho_0)^{\delta(z)}$$

$$\delta(z) = \begin{cases} \delta_0 + \Delta \left(\frac{z}{\xi L}\right)^n & \text{for } |z| < \xi L \text{ (inner halo)} \\ \delta_0 + \Delta & \text{for } |z| > \xi L \text{ (outer halo)} \end{cases}$$

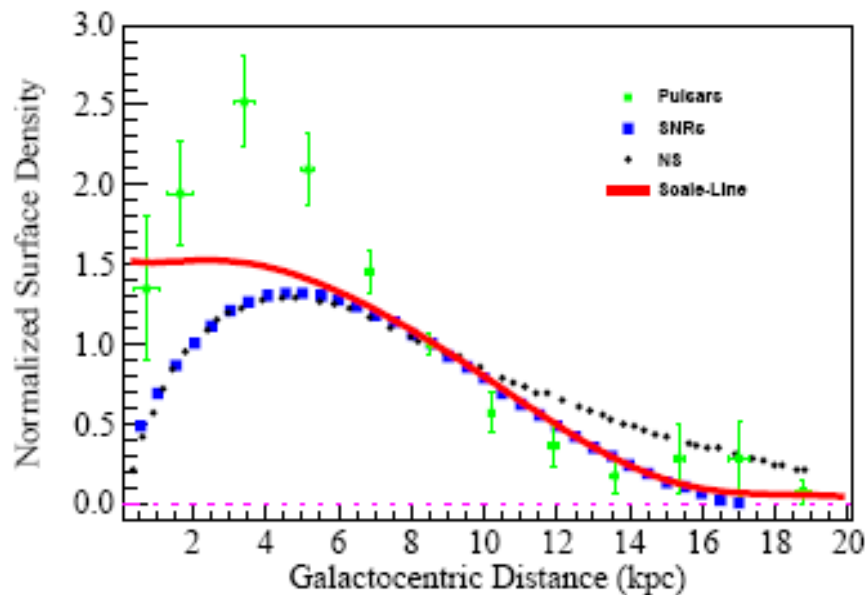


空间依赖传播模型同时解释原初强子与电子能谱变硬

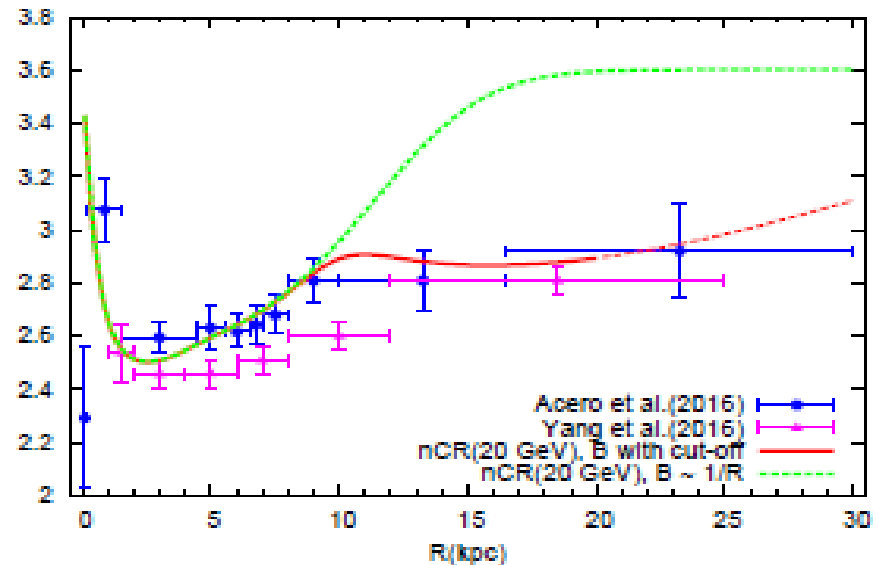


进一步工作：根据源分布 研究传播系数

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



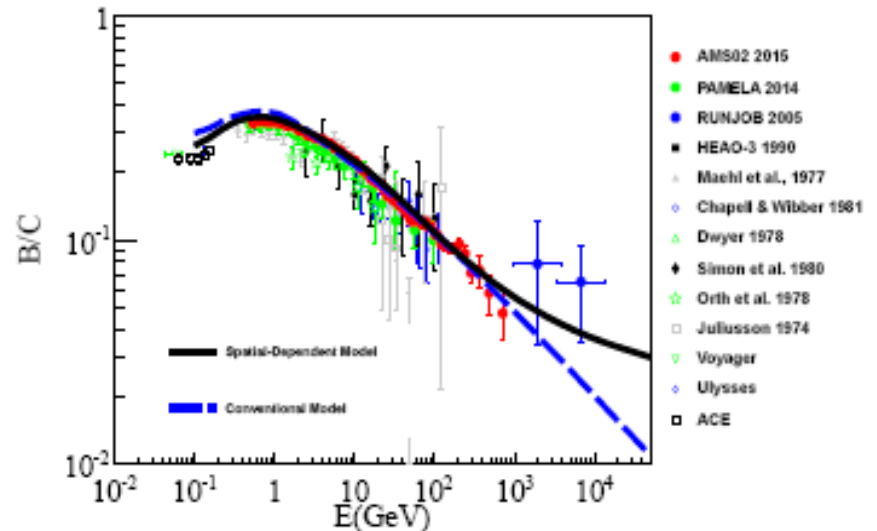
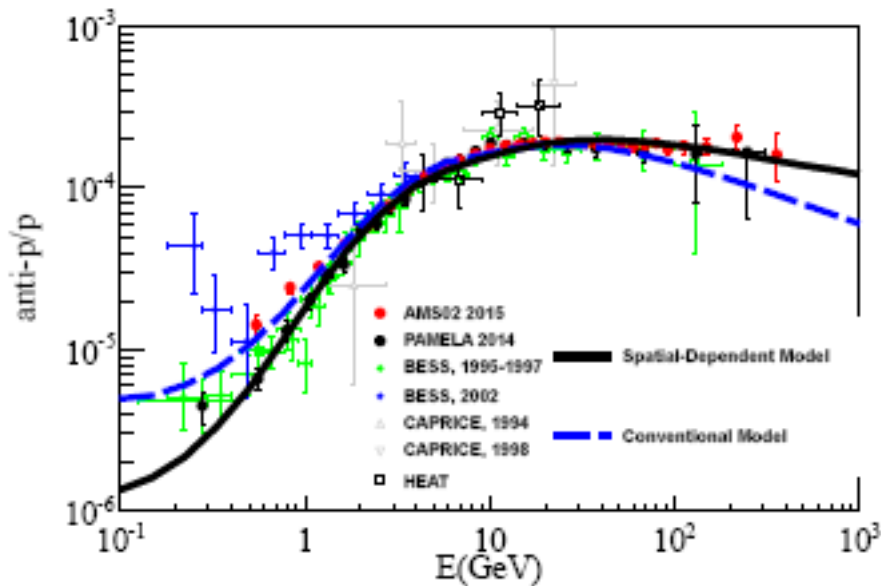
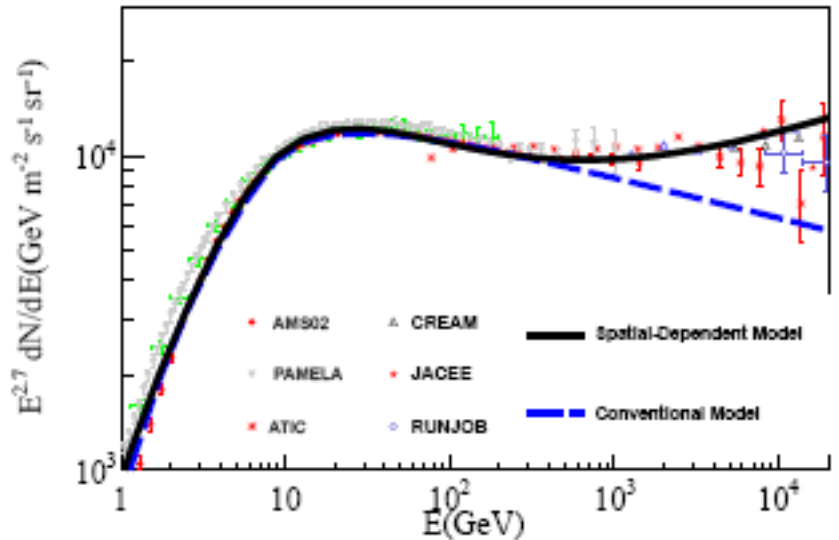
**(Guo Y.Q., Tian Z., Jin C.,
2016, ApJ, 819,54)**



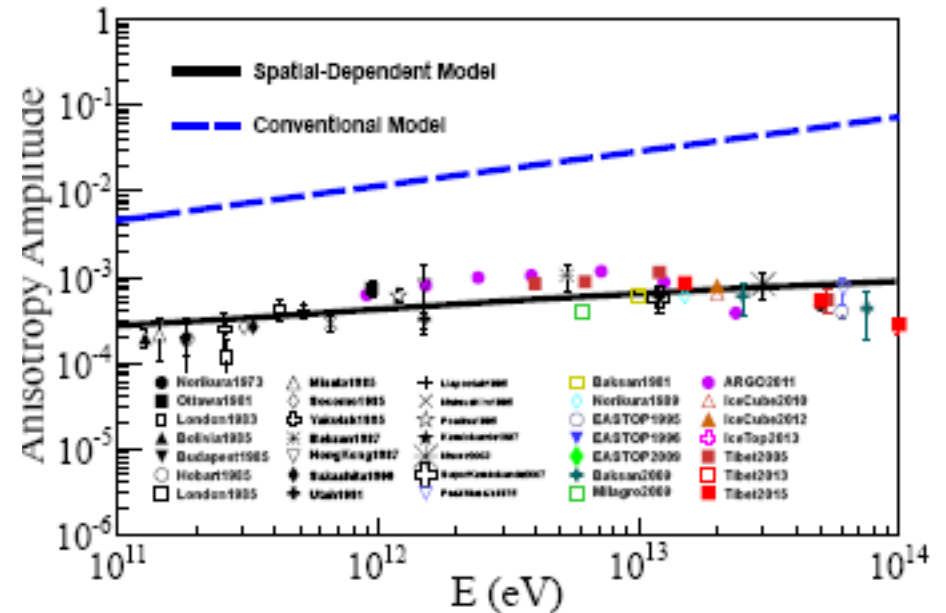
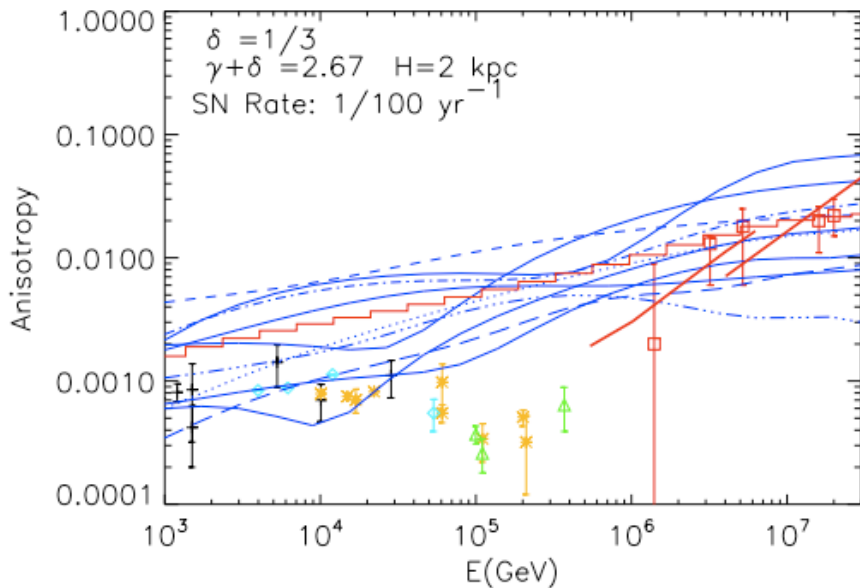
**Yang R.Z., 2016,PRD, 93,123007
Recchia & Molino,arxiv:1604.07682**

空间依赖的宇宙线传播(II)

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。



宇宙线各向异性问题



(Blasi, et al., 2012, JCAP, 752,1,1)

我们的结果

总 结

1. 宇宙线能谱变硬，银盘宇宙线存在硬成分，可以解释次级粒子超出。
2. 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。
3. 空间依赖的传播可以更好的描述宇宙线的各向异性的幅度。
4. 对正电子需要考虑旋臂结构及含时传播
5. 目前高能部分伽马射线观测有限，未来 **LHAASO** 高能观测能够很好的限制传播参数。

谢谢大家！