

以新传播模型解释脉冲星晕 LHAASO J0621+3755

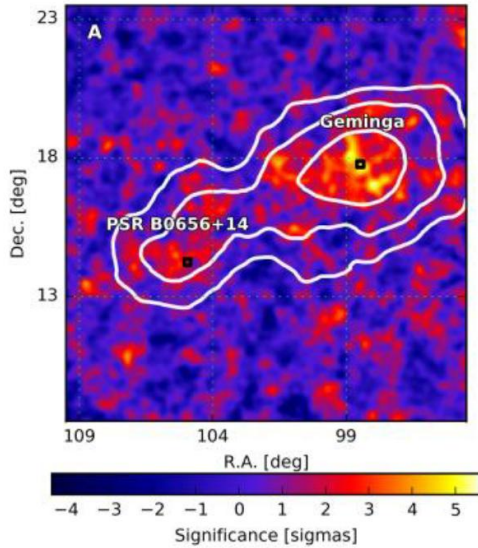
方堃 席绍强
毕效军

2021.10.13, 上海

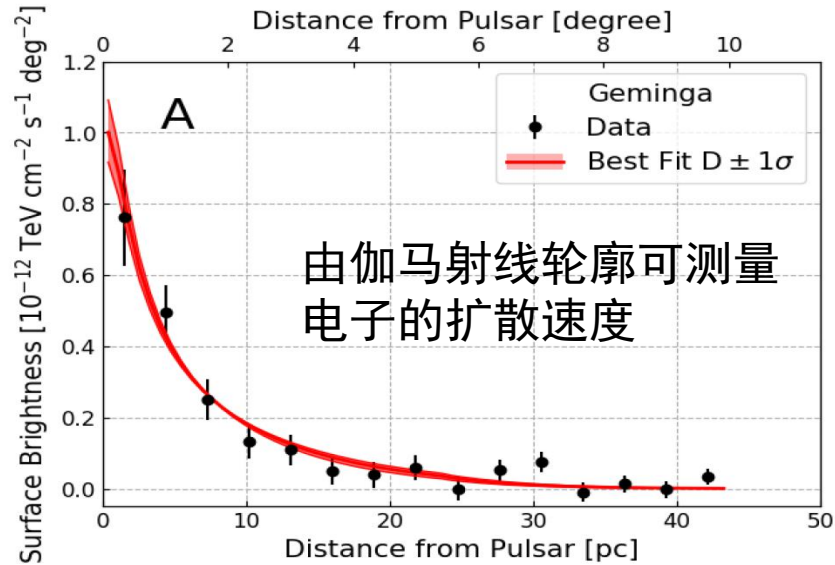


脉冲星晕

Geminga脉冲星晕



HAWC Collaboration 2017



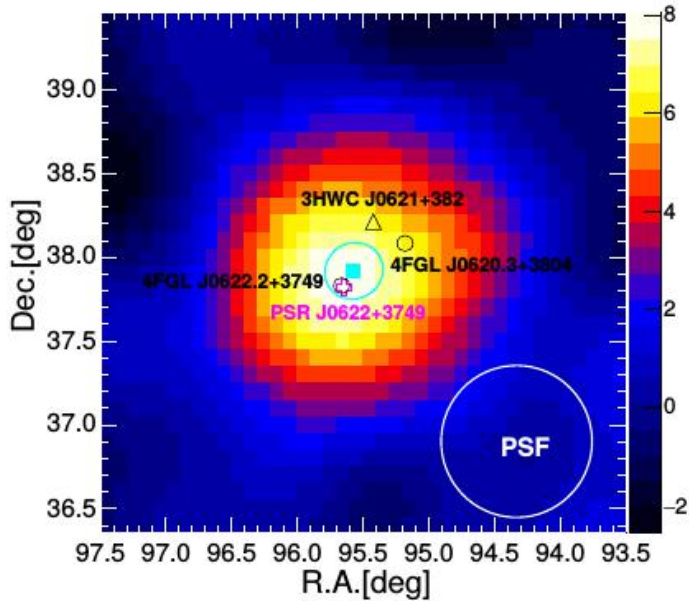
Geminga晕的轮廓

- 脉冲星晕：中年脉冲星周围的弥散伽马射线结构，来自电子ICS
- 伽马射线轮廓表明脉冲星晕的扩散系数比银河系平均值小至少数百倍
- 宇宙线在星际介质局部传播的“探测器”



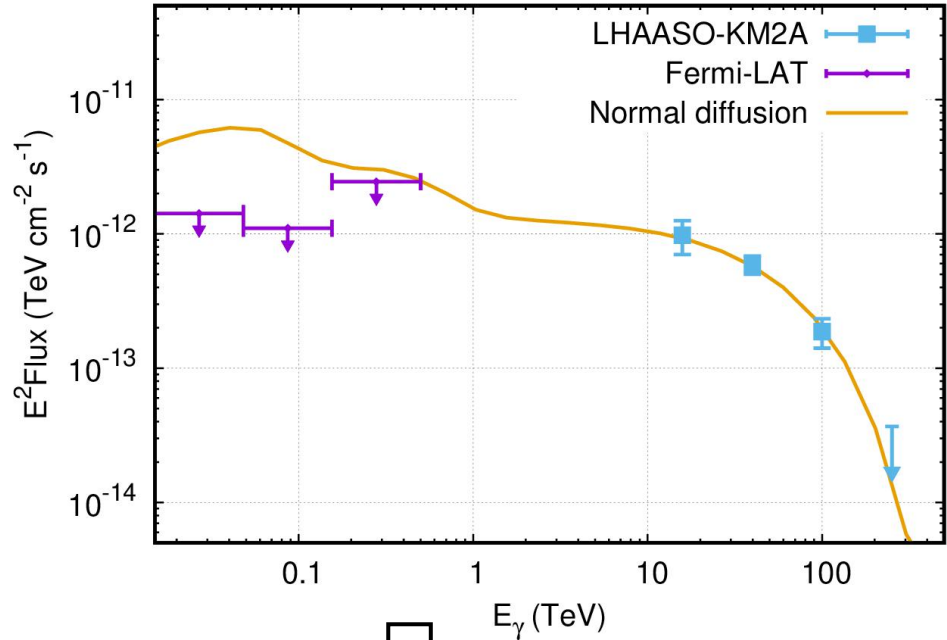
LHAASO J0621+3755

新的脉冲星晕

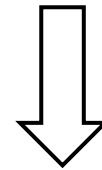


LHAASO Collaboration 2021

伽马射线能谱



Fang, Xi, Bi, 2021



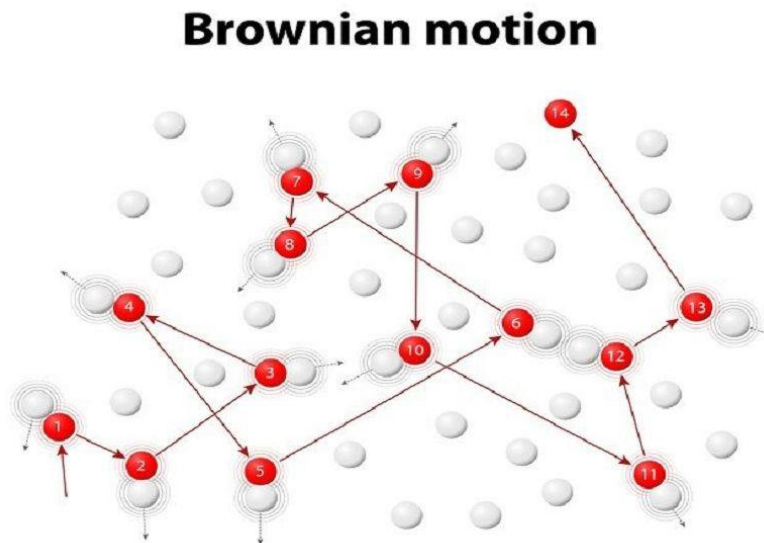
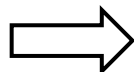
- 与PSR J0622+3749成协的脉冲星晕
- LHAASO高能的能谱和Fermi低能的上限无法同时得到解释
- 难以通过改变注入谱、扩散系数能量依赖、ISRF等条件解决
- 需要新的传播模型

不同传播模型

最常用的模型——普通扩散

$$\frac{\partial p(r,t)}{\partial t} = D \Delta p(r,t)$$

- 扩散系数D是位置无关的常数
- 微观上粒子的传播由布朗运动描述，步长遵从高斯分布
- 前提是均匀介质
- 星际介质可能存在各种尺度的不均匀

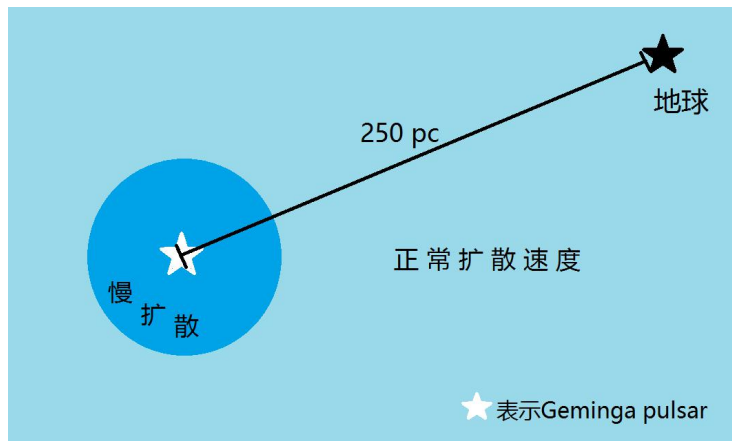


非均匀介质的传播

- 扩散系数D(r)是依赖空间位置的，微观仍由布朗运动描述
- 反常扩散，粒子微观运动不再是布朗运动，步长不遵从高斯分布



双区扩散和超扩散



双区扩散

- 属于空间依赖扩散
- 慢扩散只存在于脉冲星附近的某个区域，该区域外仍假设为银河系的平均扩散速度

Fang 2018

超扩散 $\frac{\partial p(r,t)}{\partial t} = -D(\alpha)(-\Delta)^{\alpha/2} p(r,t)$

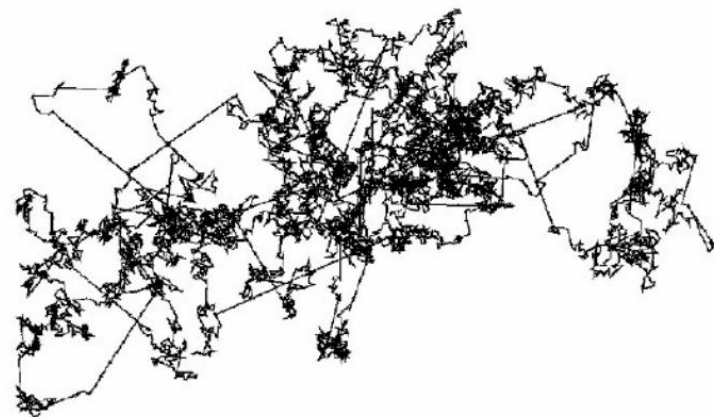
- 属于反常扩散，粒子微观运动由莱维飞行描述
- 假设星际介质是分形结构，模拟可能存在与各个尺度的不均匀

7000 steps

布朗运动
($\alpha=2.0$)



莱维飞行 ($\alpha=1.5$)

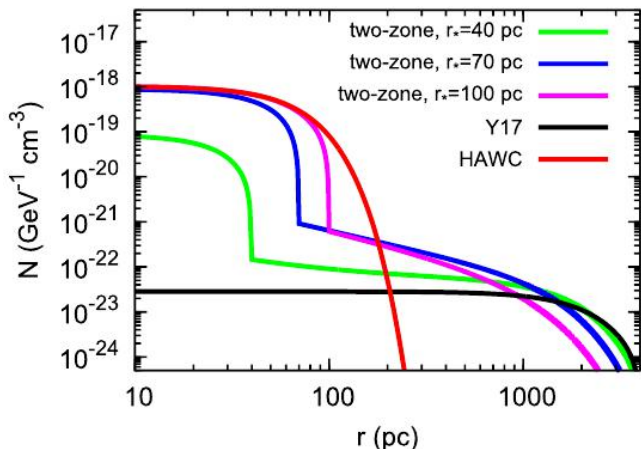


Metzler, Klafter 2000



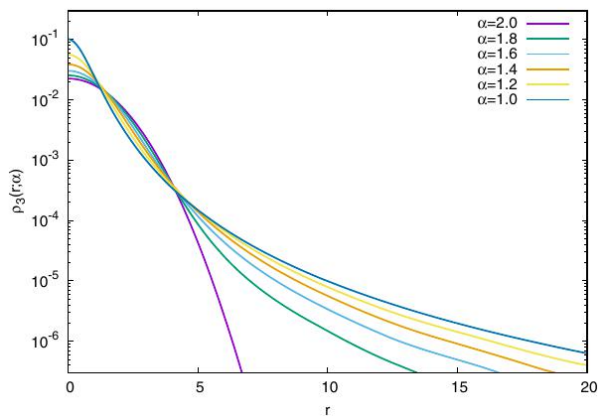
新传播模型的特点

双区扩散分布对比

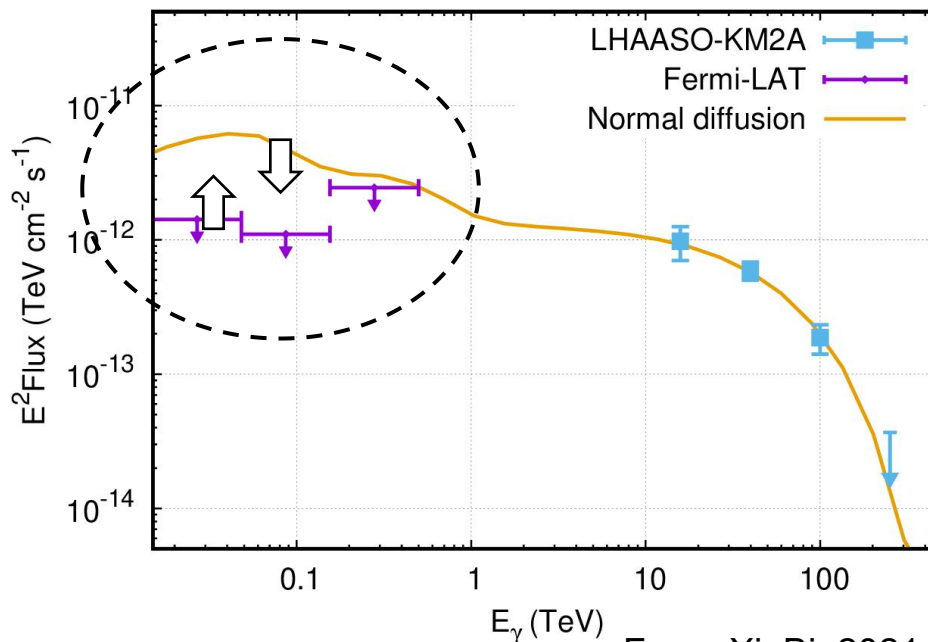


Fang, Bi, Yin, Yuan 2018

超扩散分布对比



Wang, Fang, Bi, Yin 2021



Fang, Xi, Bi, 2021

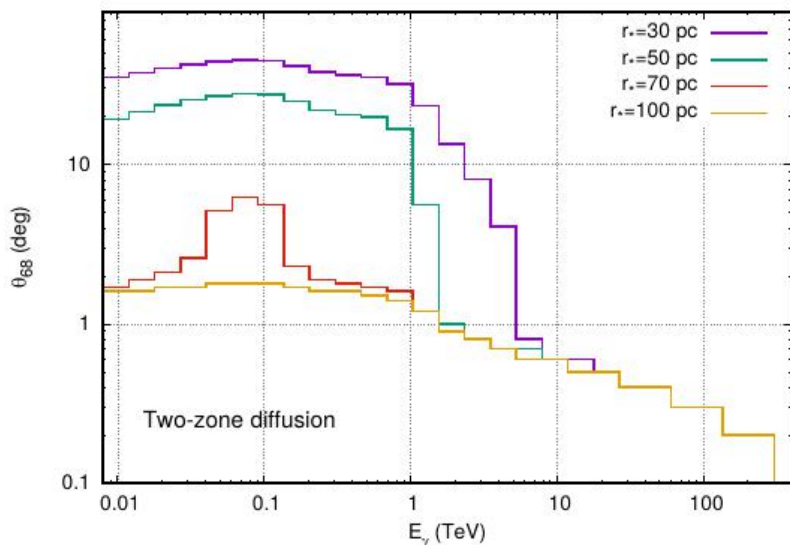
新扩散模型中

- 低能电子更容易逃逸到远处——降低流量
- 电子分布明显更为延展——提高Fermi上限
- 有助于解释Fermi-LAT上限和模型间的冲突

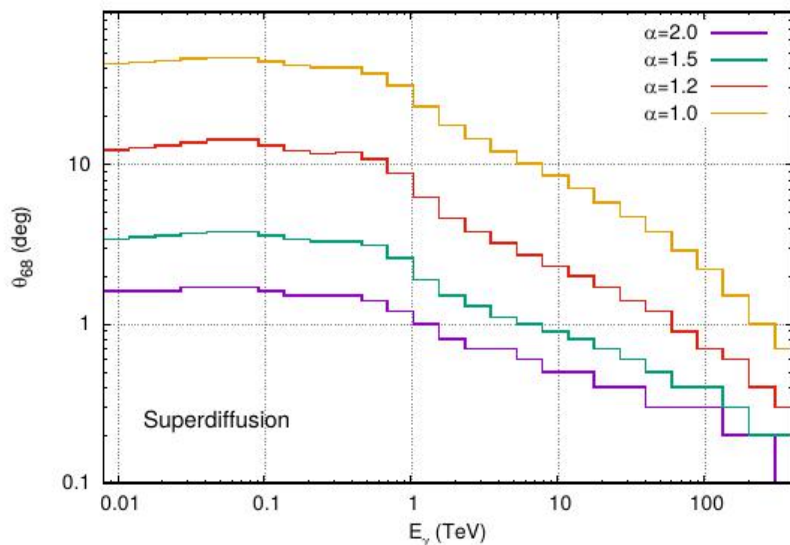


新传播模型的特点

伽马射线分布展宽 (68%)



双区扩散模型



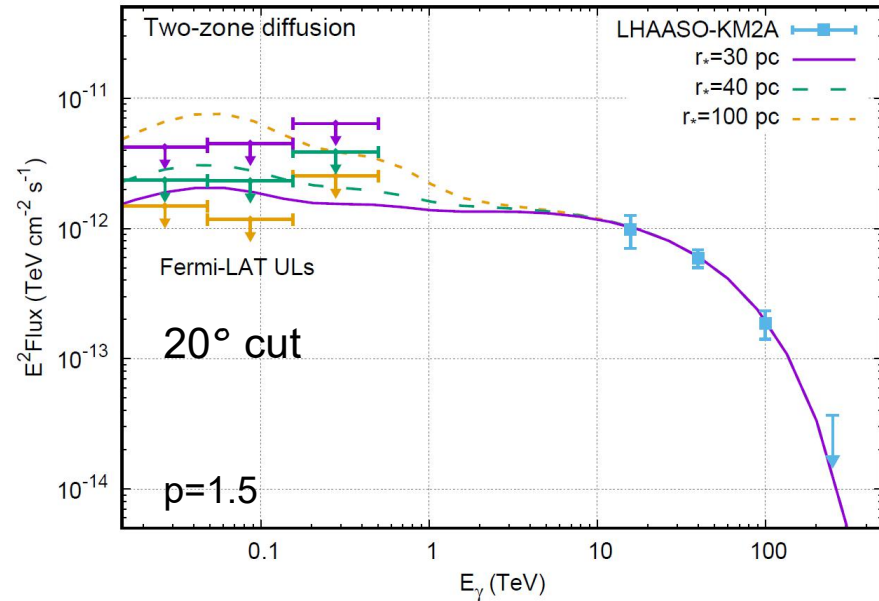
超扩散模型

Fang, Xi, Bi, 2021

- 双区扩散：高能电子寿命短，难以从慢扩散区逃逸，受影响极小；低能电子能够从慢扩散区逃逸，展宽显著增加（流量减小）
- 超扩散：相比普通扩散，前期展宽增长较慢，后期展宽增长较快，因此对于寿命更短的高能电子，增长较慢的时间占比相对高，换言之，低能的展宽相比普通扩散的增加更显著



双区扩散解释观测



Fang, Xi, Bi, 2021

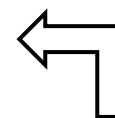
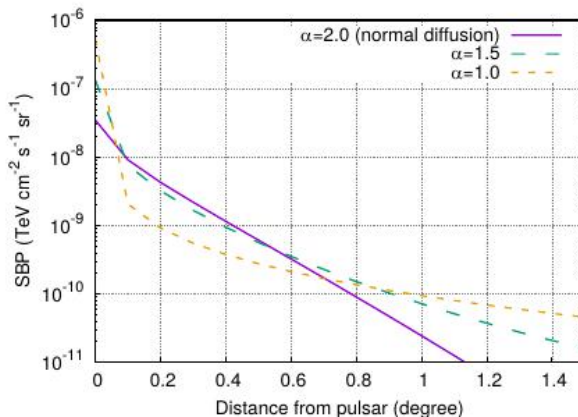
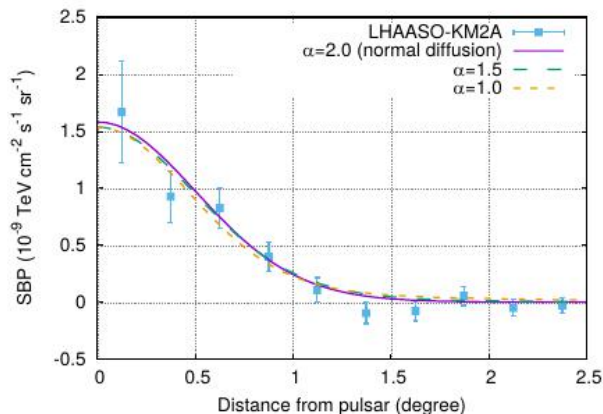
解释观测要求的慢扩散区尺度上限

p	1.2	1.35	1.5	1.65	1.8
$r_{s,max}$ (pc)	40 – 50	40 – 50	30 – 40	30 – 40	20 – 30
E_c (TeV)	232	249	265	284	307
η	0.30	0.34	0.40	0.51	0.74

- 同时解释LHAASO-KM2A和Fermi-LAT的观测要求慢扩散区尺度不能大于50pc
- 该要求与慢扩散的可能产生机制一致
 - 若来自SNR提供的湍流能量，50pc对于SNR是合理的尺度（Fang 2019）
 - 若来自自激发机制，慢扩散显著的尺度可能为20-40pc（Evoli 2018）

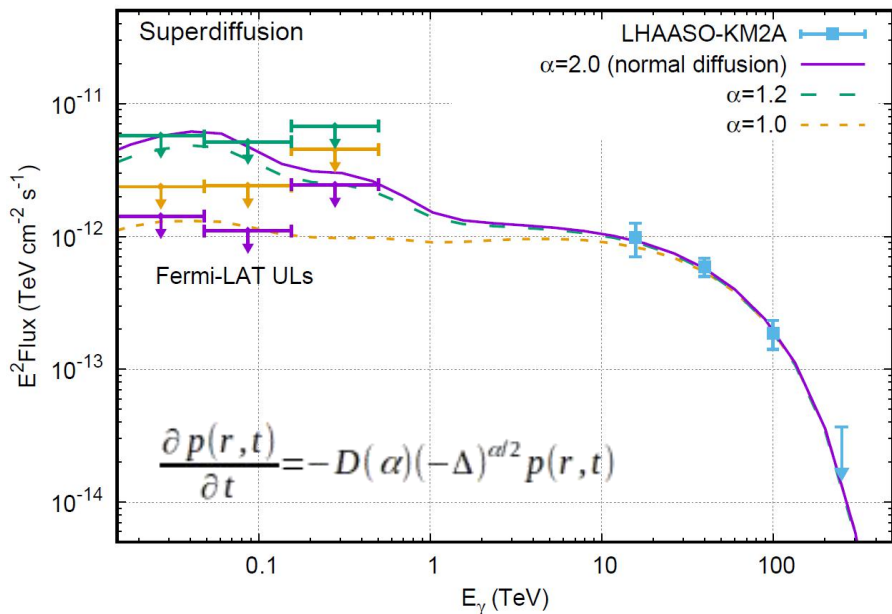


超扩散解释观测



通过拟合伽马射线晕的分布
获得超扩散模型的扩散系数
 $D(\alpha)$

Fang, Xi, Bi, 2021



Fang, Xi, Bi, 2021

同时解释LHAASO和Fermi观测要求 $\alpha \leq 1.2$

- 远离SNR激波的ISM: $\alpha \approx 1.5$
(Perri, Amato, Zimbardo 2016)
- 太阳系行星际介质中: $1.18 < \alpha < 1.96$
(Perri, Zimbardo 2009)
- 后发座星系团: $\alpha \sim 1.5$
(Ragot, Kirk 1997)
- Geminga脉冲星晕: $\alpha > 1.32$
(Wang, Fang, Bi, Yin 2021)



总结与展望

- 解释LHAASO J0621+3755的宽波段伽马射线观测需要新的传播模型
- 双区扩散、超扩散是普通扩散的推广，可以对该脉冲星晕的伽马射线能谱做出统一解释
- 对于双区扩散要求慢扩散区尺度 $\leq 50\text{pc}$ ，对于超扩散要求 $\alpha \leq 1.2$

- WCDA在1-10TeV的观测可对新传播模型进行进一步的判断和限制
- 借鉴Geminga的观测结果对两个新传播模型进行区分
 - 两个传播模型在源附近的分布有所不同
 - Geminga晕的展宽更大，受角分辨的影响小
- 计划中的成像大气切伦科夫望远镜阵列（角分辨 0.06° ）可针对本脉冲星晕区分两个新传播模型



总结与展望

- 解释LHAASO J0621+3755的宽波段伽马射线观测需要新的传播模型
- 双区扩散、超扩散是普通扩散的推广，可以对该脉冲星晕的伽马射线能谱做出统一解释
- 对于双区扩散要求慢扩散区尺度 $\leq 50\text{pc}$ ，对于超扩散要求 $\alpha \leq 1.2$

- WCDA在1-10TeV的观测可对新传播模型进行进一步的判断和限制
- 借鉴Geminga的观测结果对两个新传播模型进行区分
 - 两个传播模型在源附近的分布有所不同
 - Geminga晕的展宽更大，受角分辨的影响小
- 计划中的成像大气切伦科夫望远镜阵列（角分辨 0.06° ）可针对本脉冲星晕区分两个新传播模型

谢谢！