

“利用高海拔宇宙线观测站研究宇宙线起源问题”重大项目中期会

课题三： 利用LHAASO延展伽马射线源 研究宇宙线传播

报告人： 周浩

承担单位： 上海交通大学、中国科学院高能物理研究所

2026年6月22日

课题三在项目中所起的作用

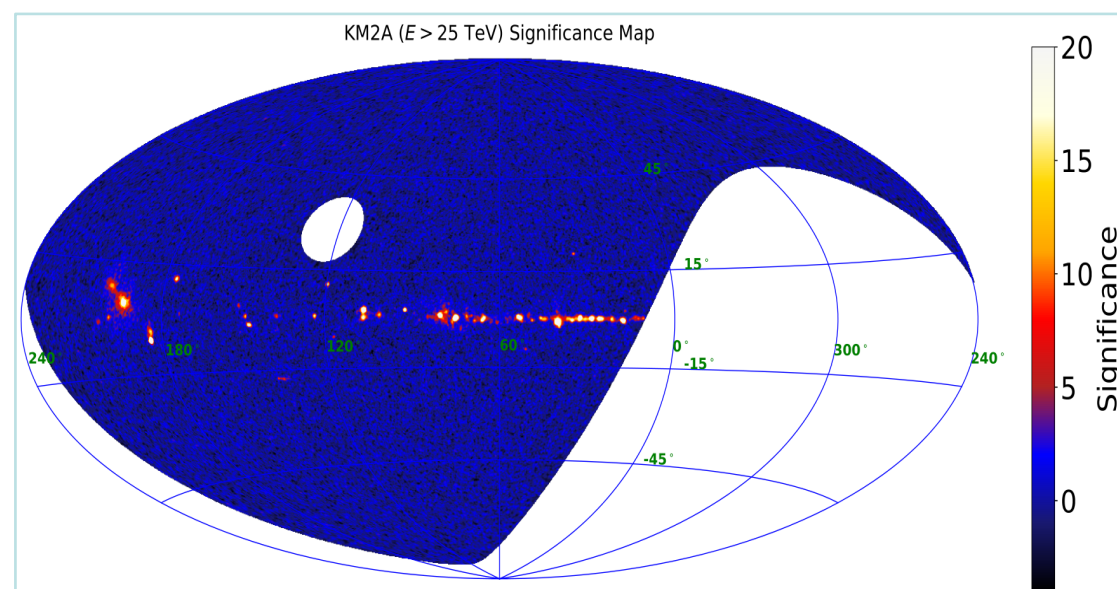
源区宇宙线起源和加速

临近源区宇宙线注入

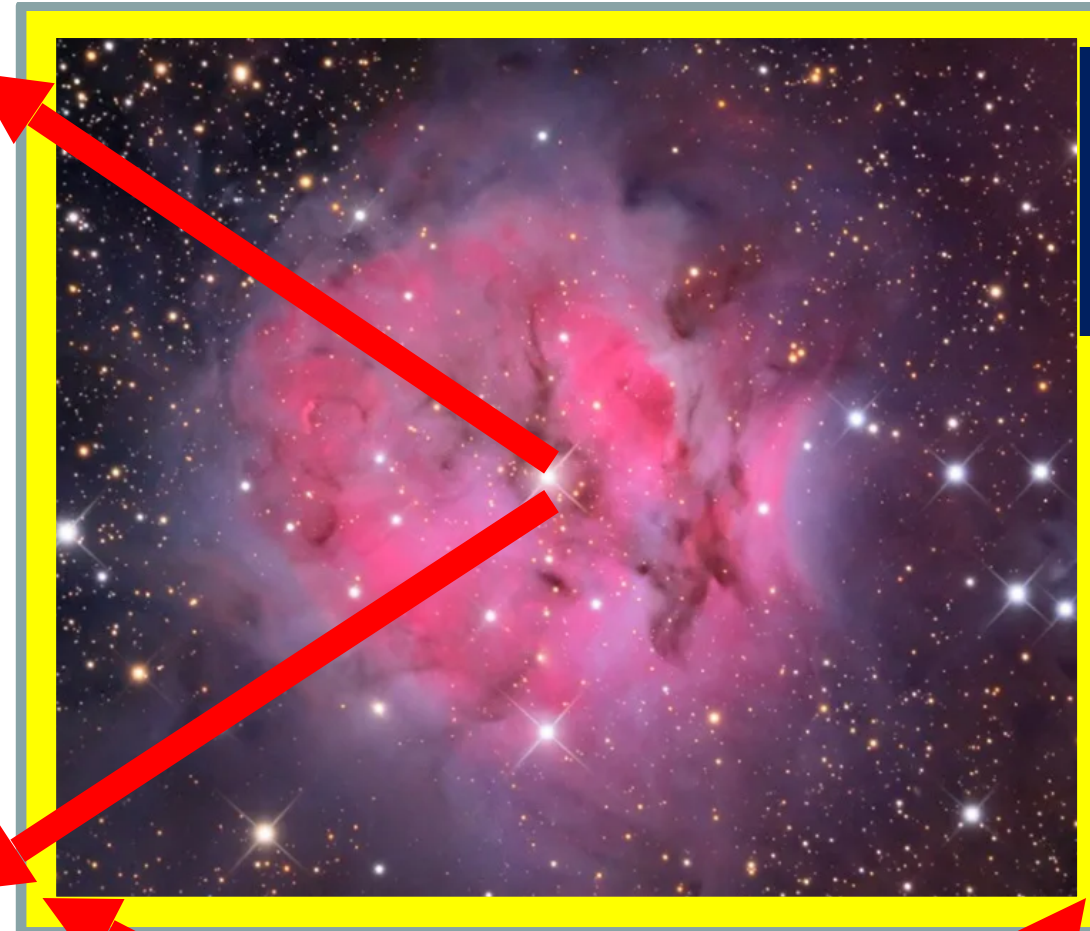
银河系内宇宙线传播



课题2: LHAASO 超高能伽马射线源的多波段研究



课题1: 超高能伽马源的搜寻与测量



课题3: 利用 LHAASO 延展伽马射线源研究宇宙线传播



课题4: 利用LHAASO弥散伽马射线观测研究银河系内宇宙线分布

课题三在项目中所起的作用

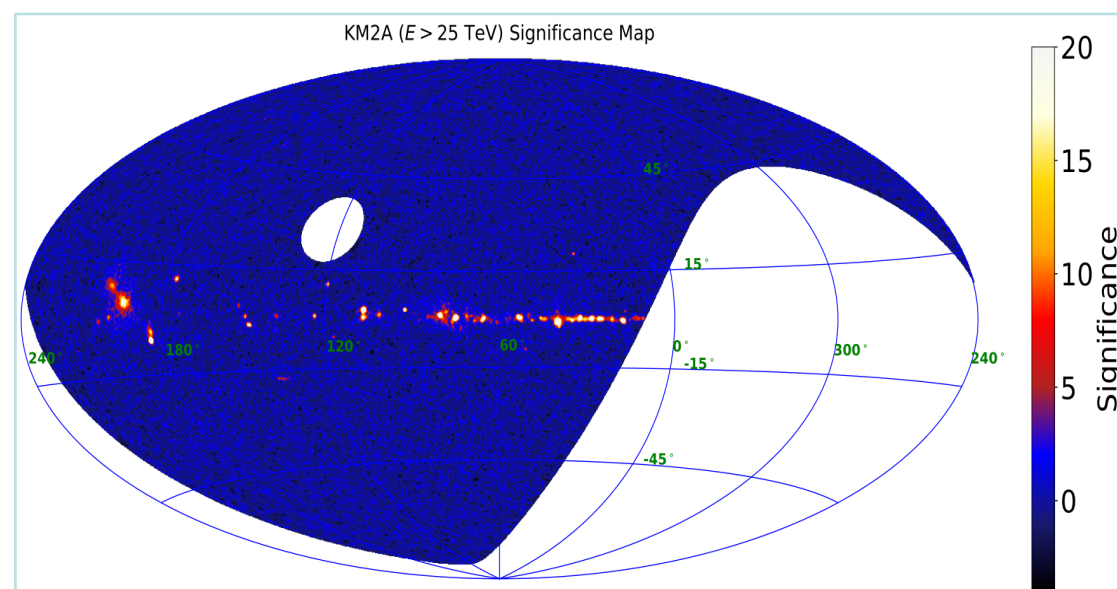
源区宇宙线起源和加速

临近源区宇宙线注入

银河系内宇宙线传播



课题2: LHAASO 超高能伽马射线源的多波段研究



课题1: 超高能伽马源的搜寻与测量

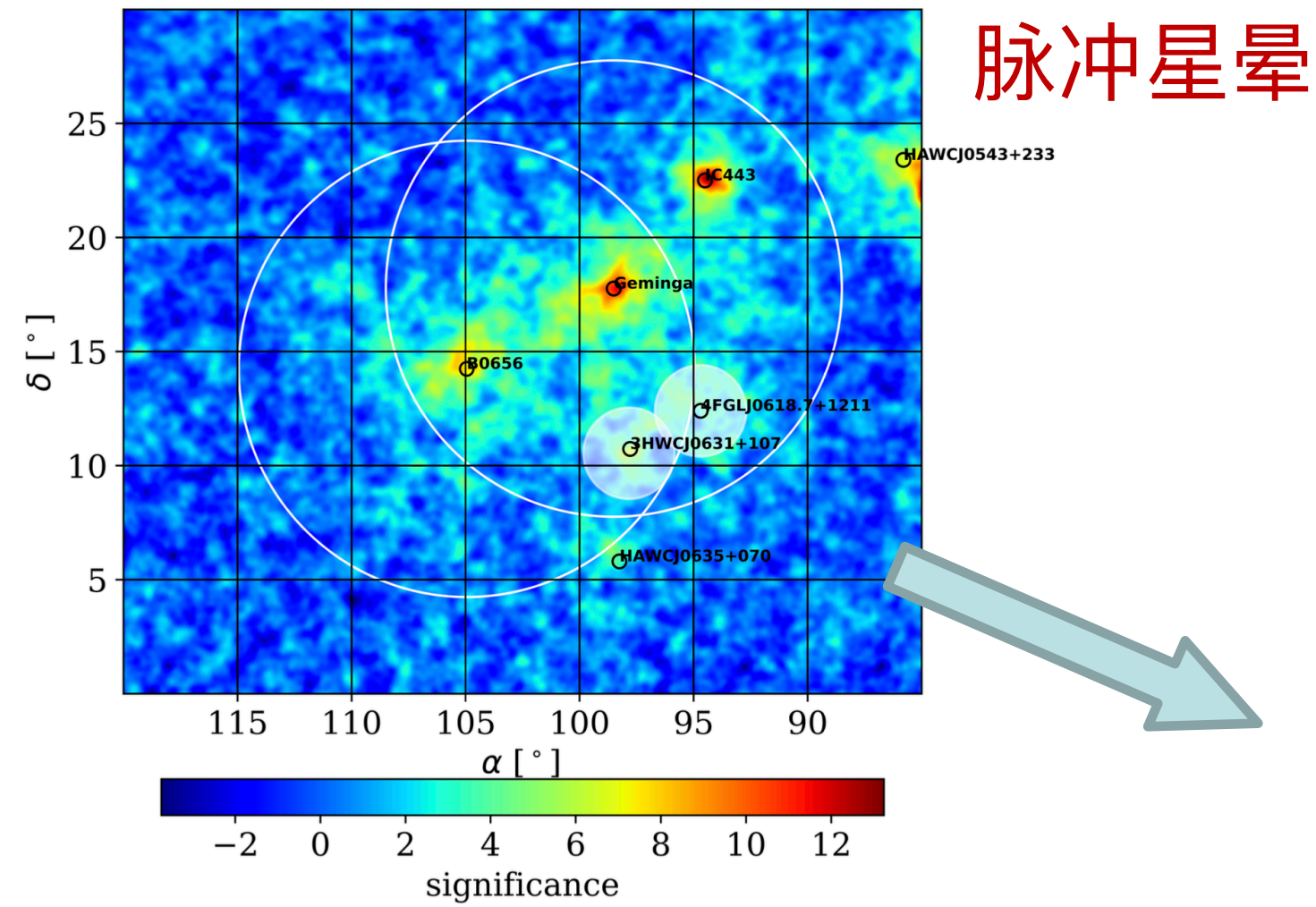


课题3: 利用 LHAASO 延展伽马射线源研究宇宙线传播

宇宙线被加速后, 如何注入到星际空间中?

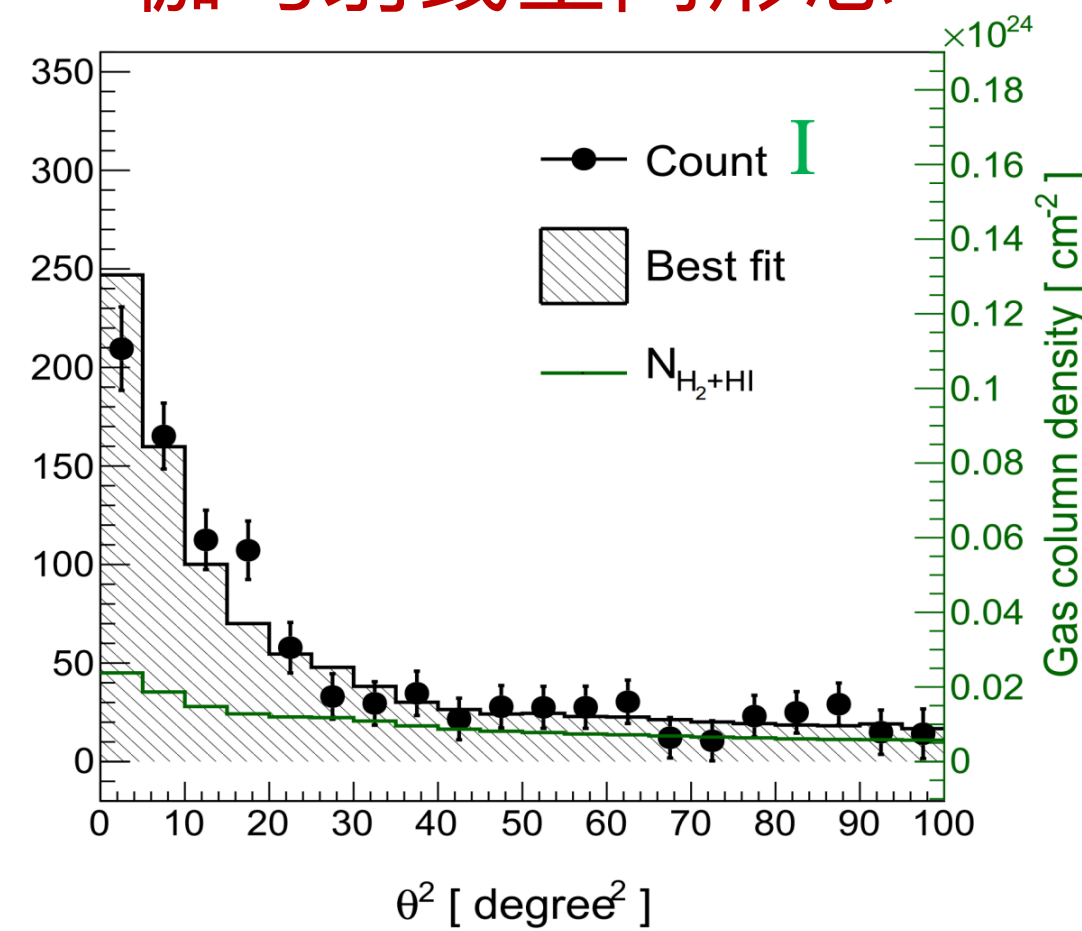
课题4: 利用LHAASO弥散伽马射线观测研究银河系内宇宙线分布

研究内容1：潜在宇宙线源附近延展伽马射线形态分析

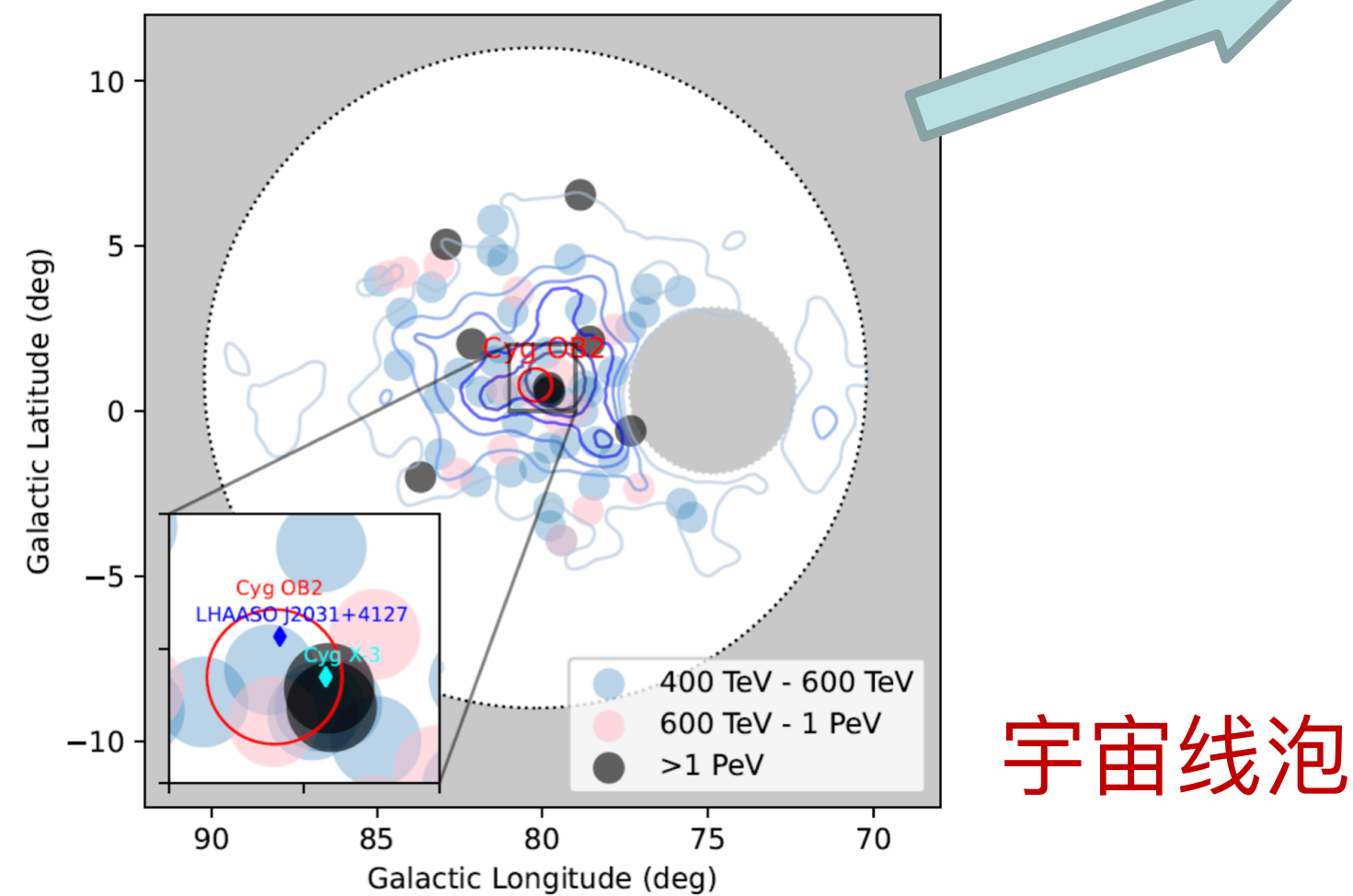
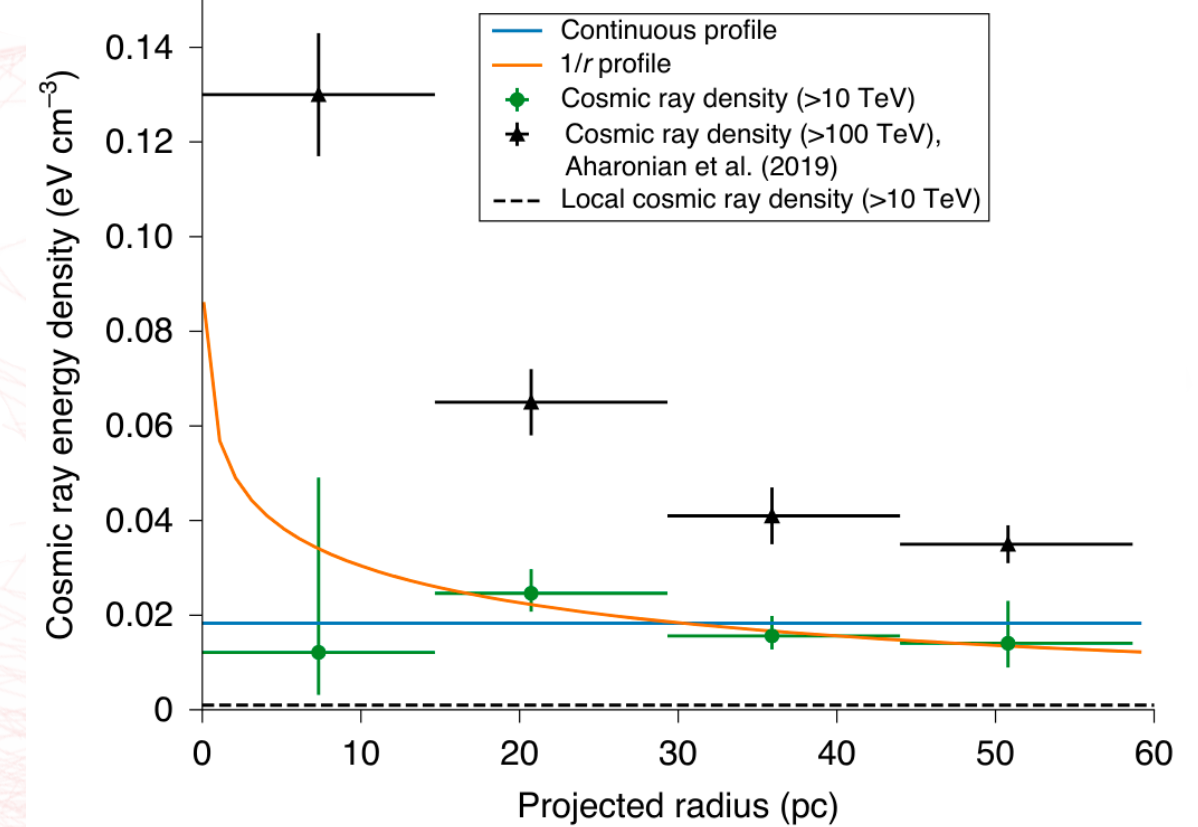


- 分析延展伽马射线辐射的空间形态
- 推导源附近宇宙线的空间分布和逃逸行为

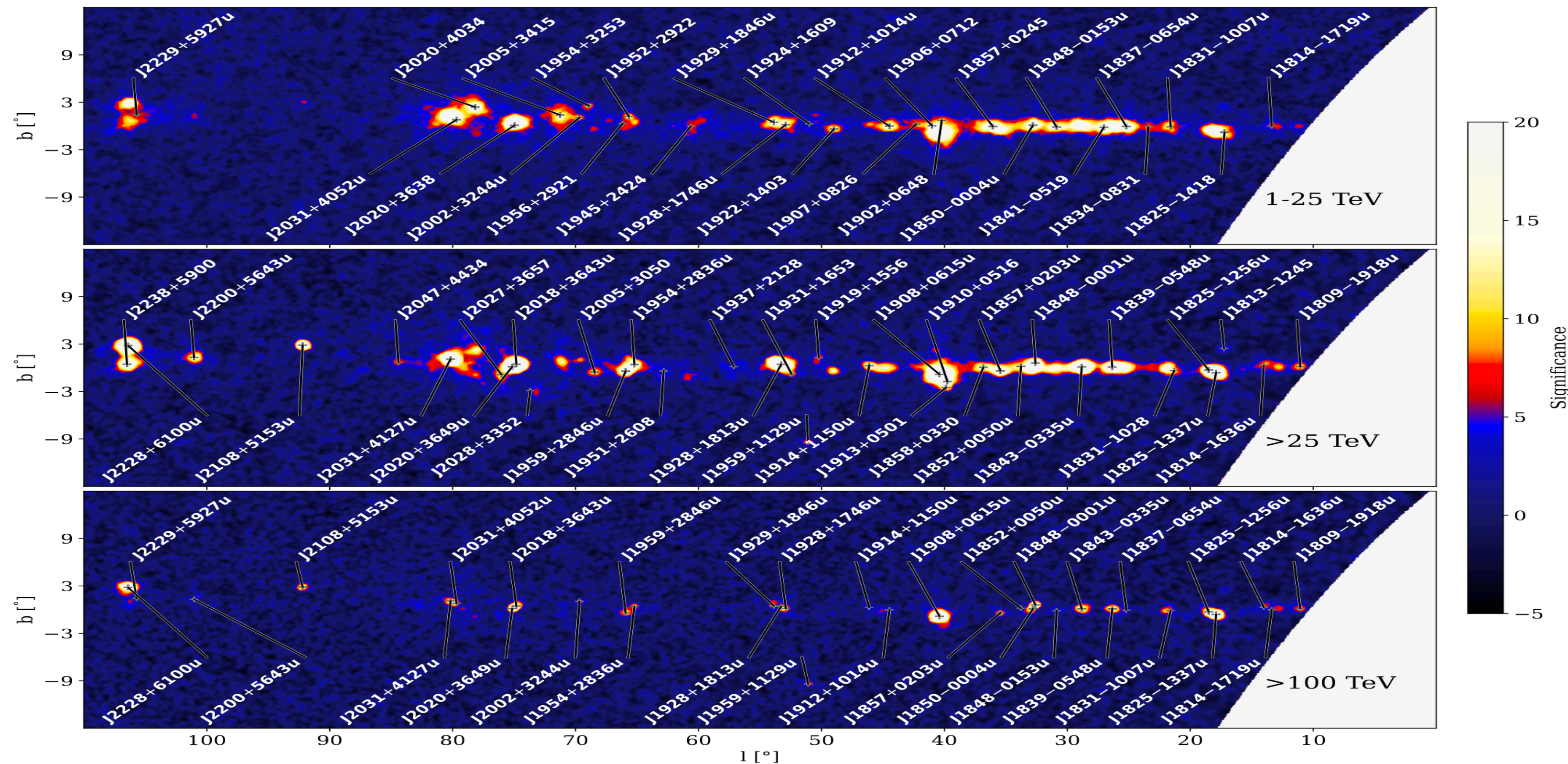
伽马射线空间形态



源附近宇宙线分布



研究内容2: LHAASO延展伽马射线源的统计研究

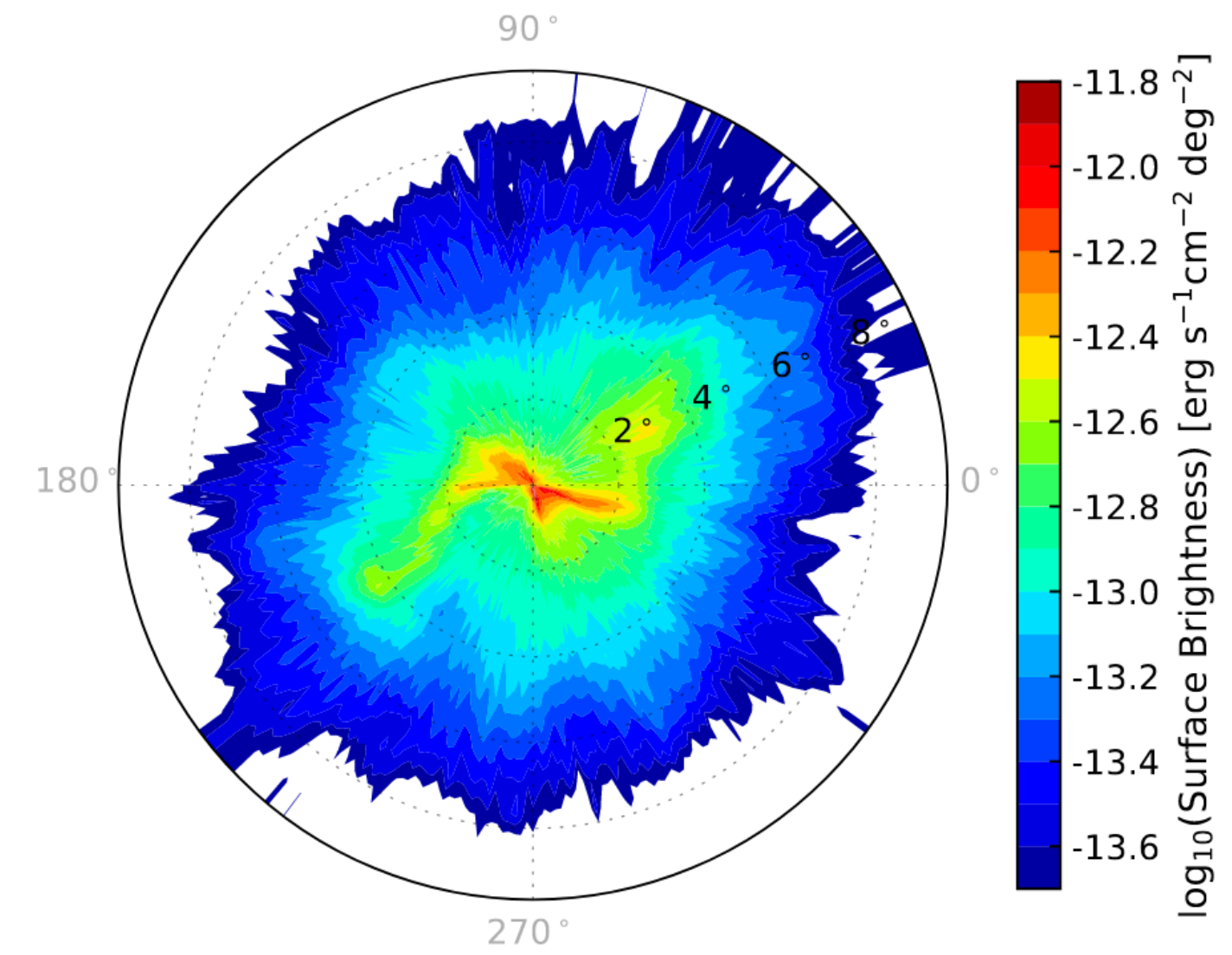


1 LHAASO星表中伽马射线源在银盘上的分布

- LHAASO 延展伽马射线源大样本分析, 结合多波段多信使观测进行分类
- 对不同类型延展源观测样本开展统计分析, 找出其在银河系中的分布和演化规律

研究内容3：宇宙线注入过程的数值模拟

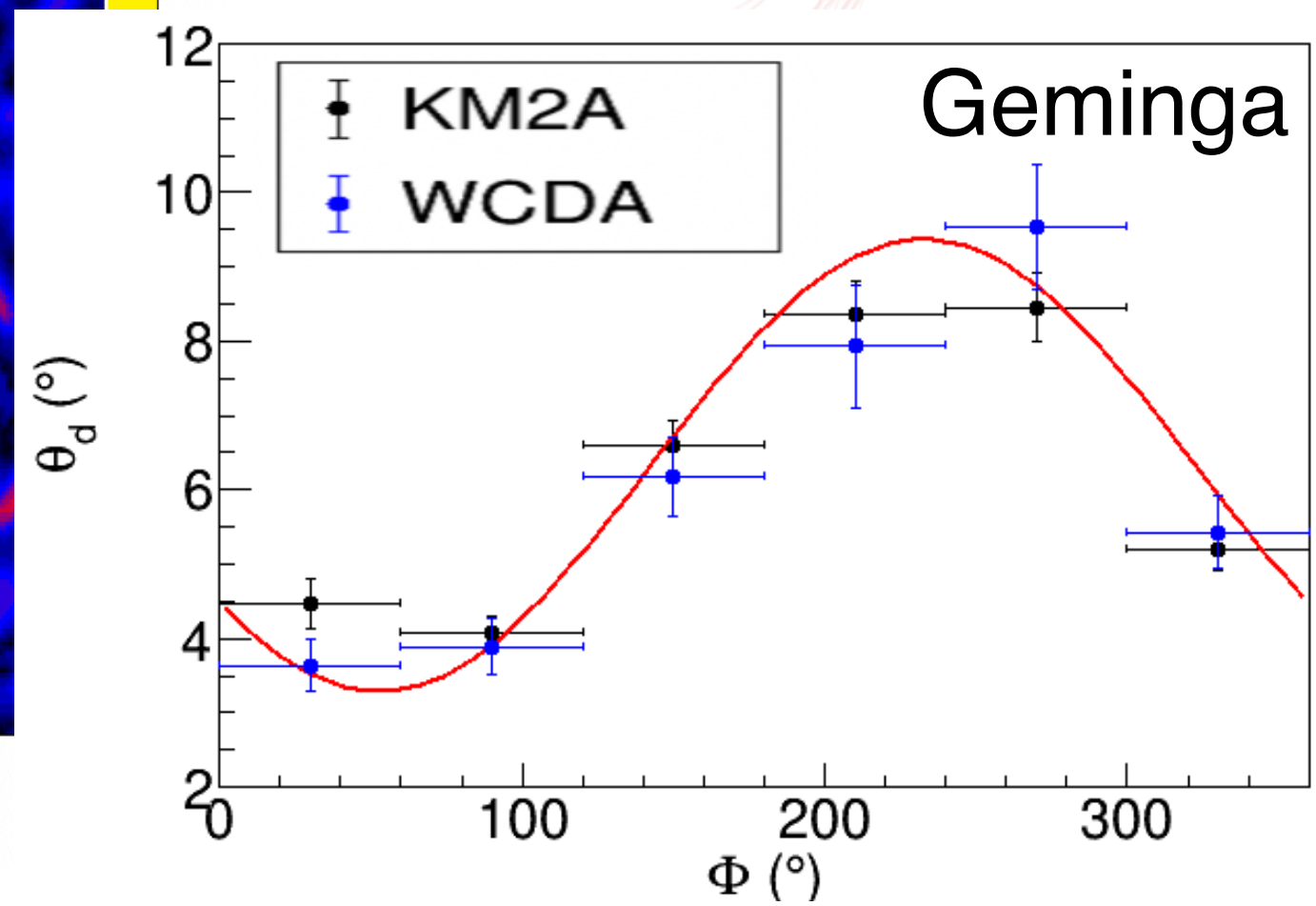
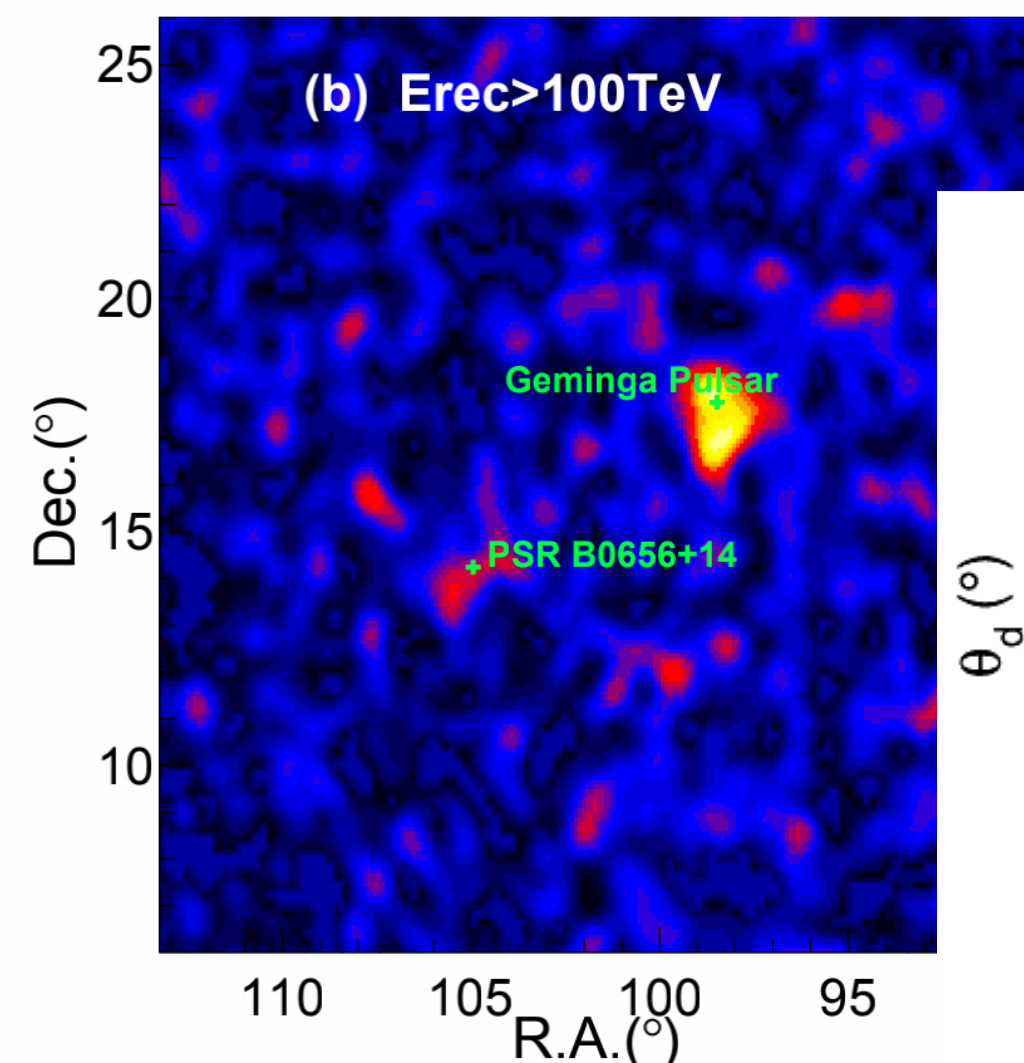
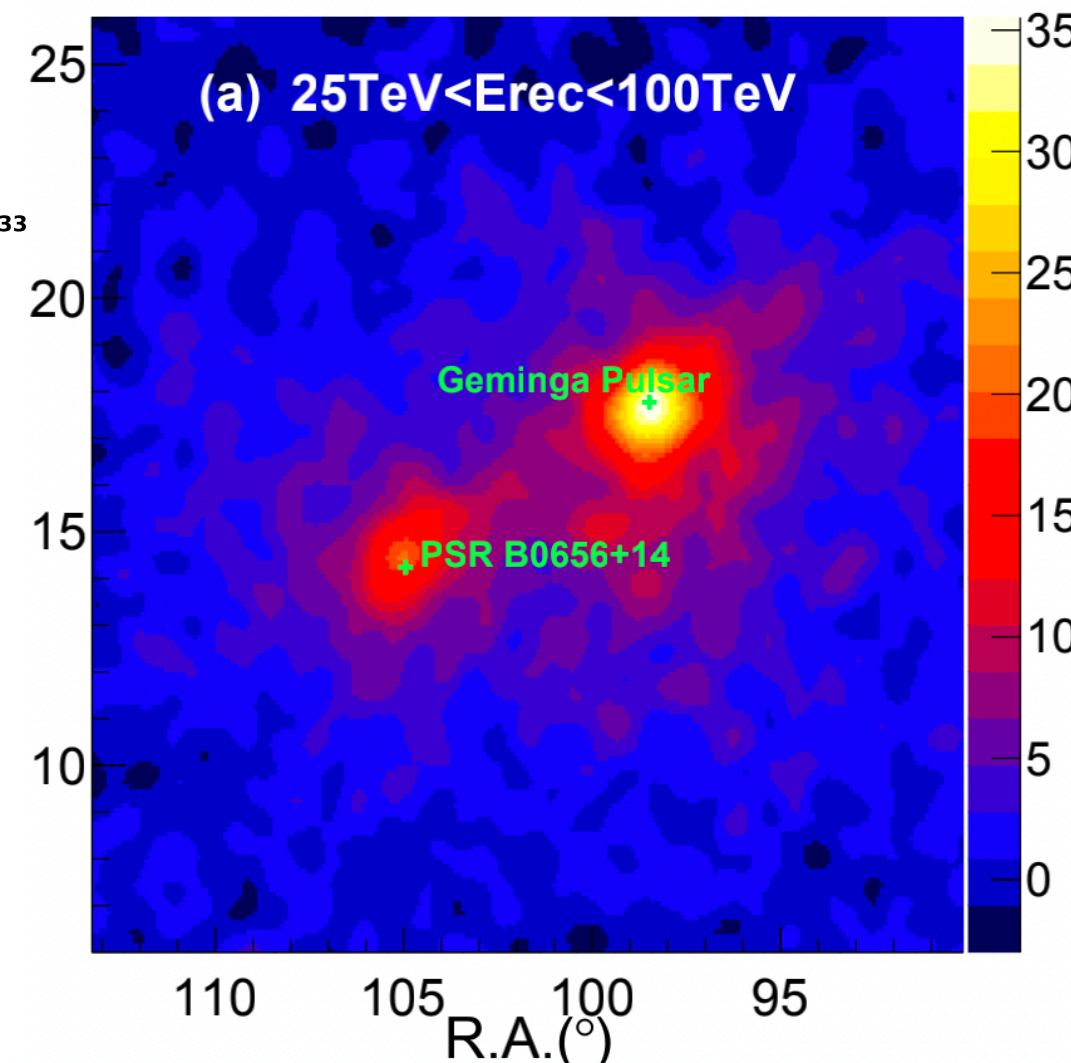
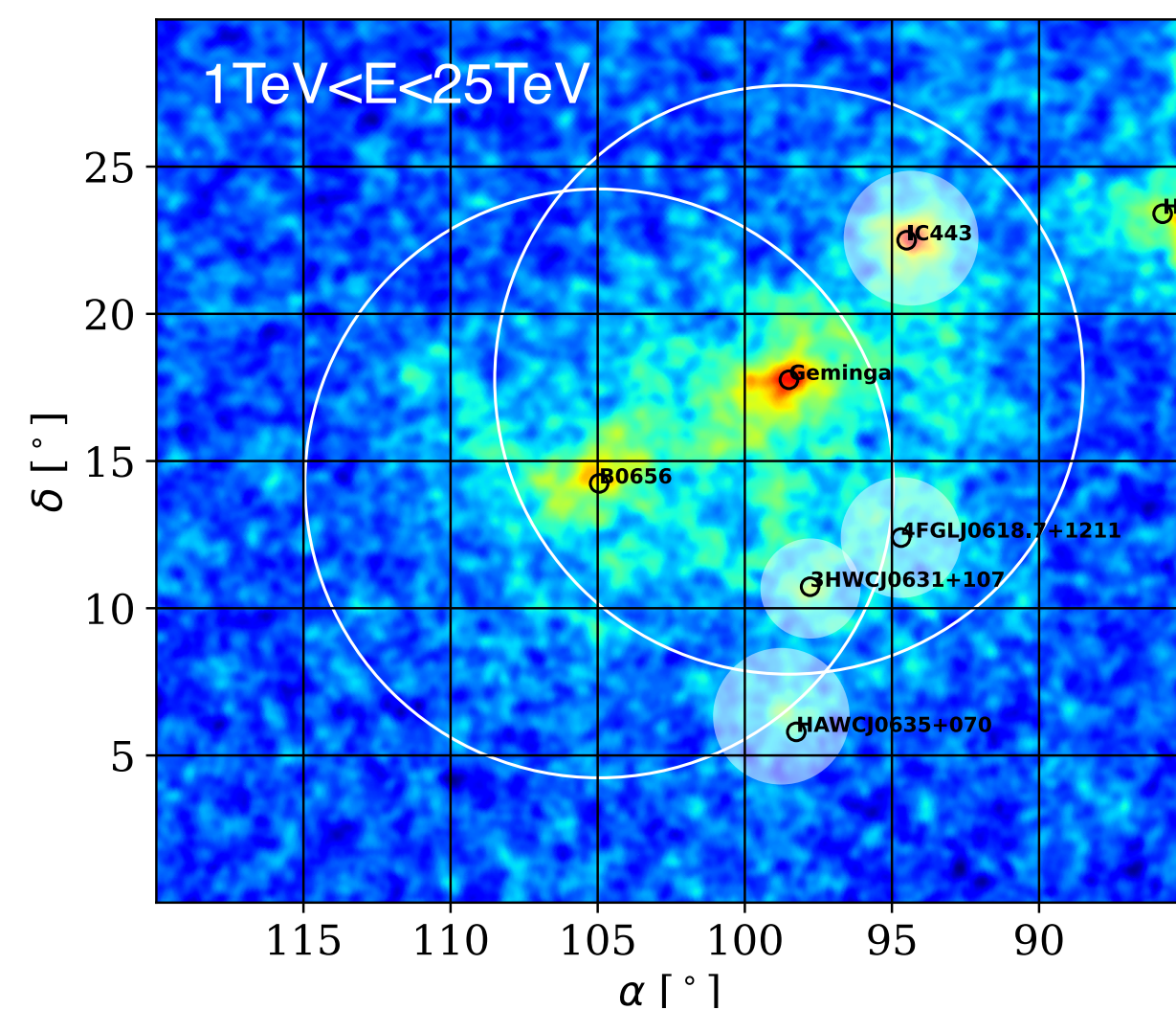
- 利用数值模拟分析宇宙线粒子在磁场中的运动
- 重现LHAASO观测，解释延展伽马射线源空间形态、能量依赖、位置偏移等
- 构建源区附近宇宙线注入的理论模型



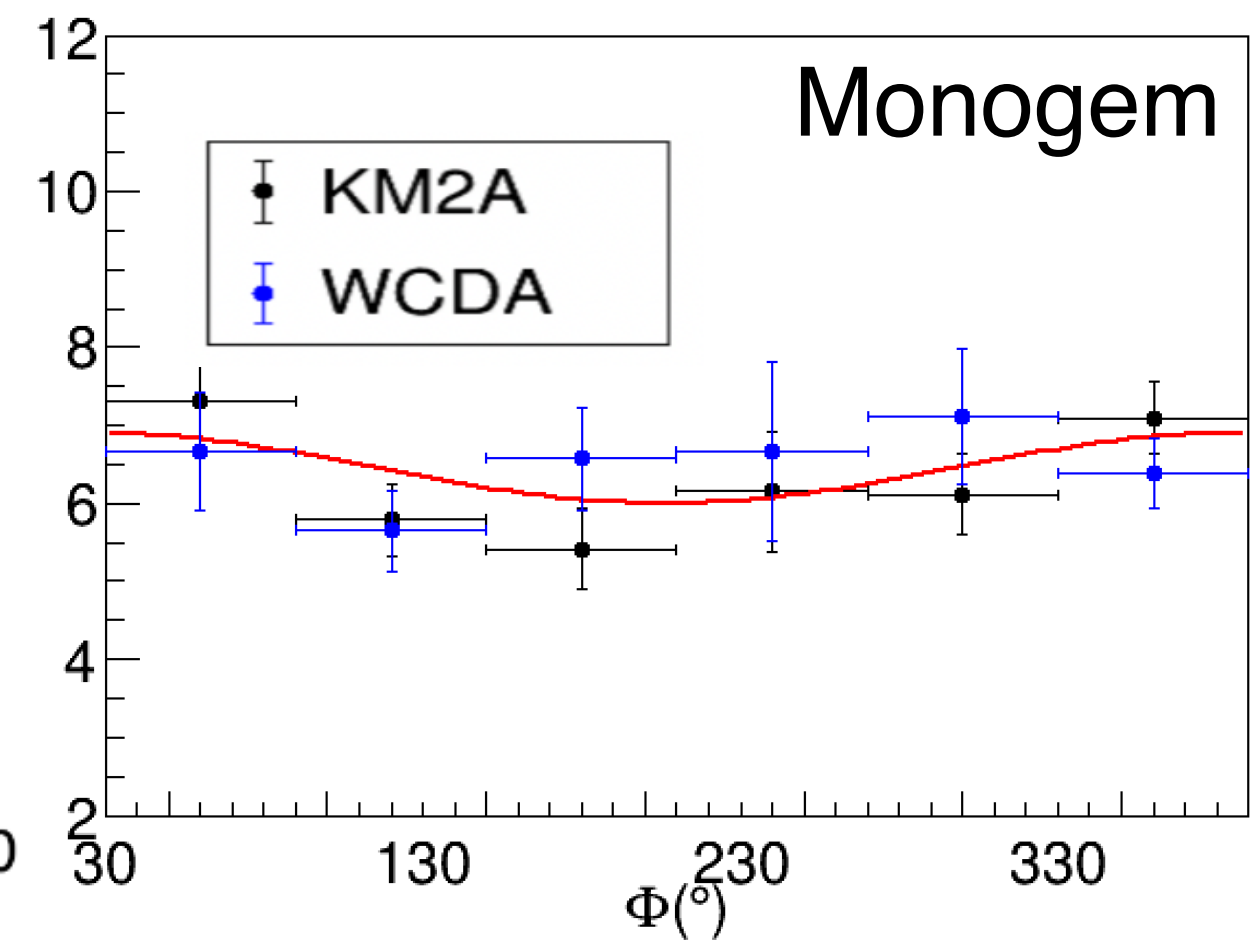
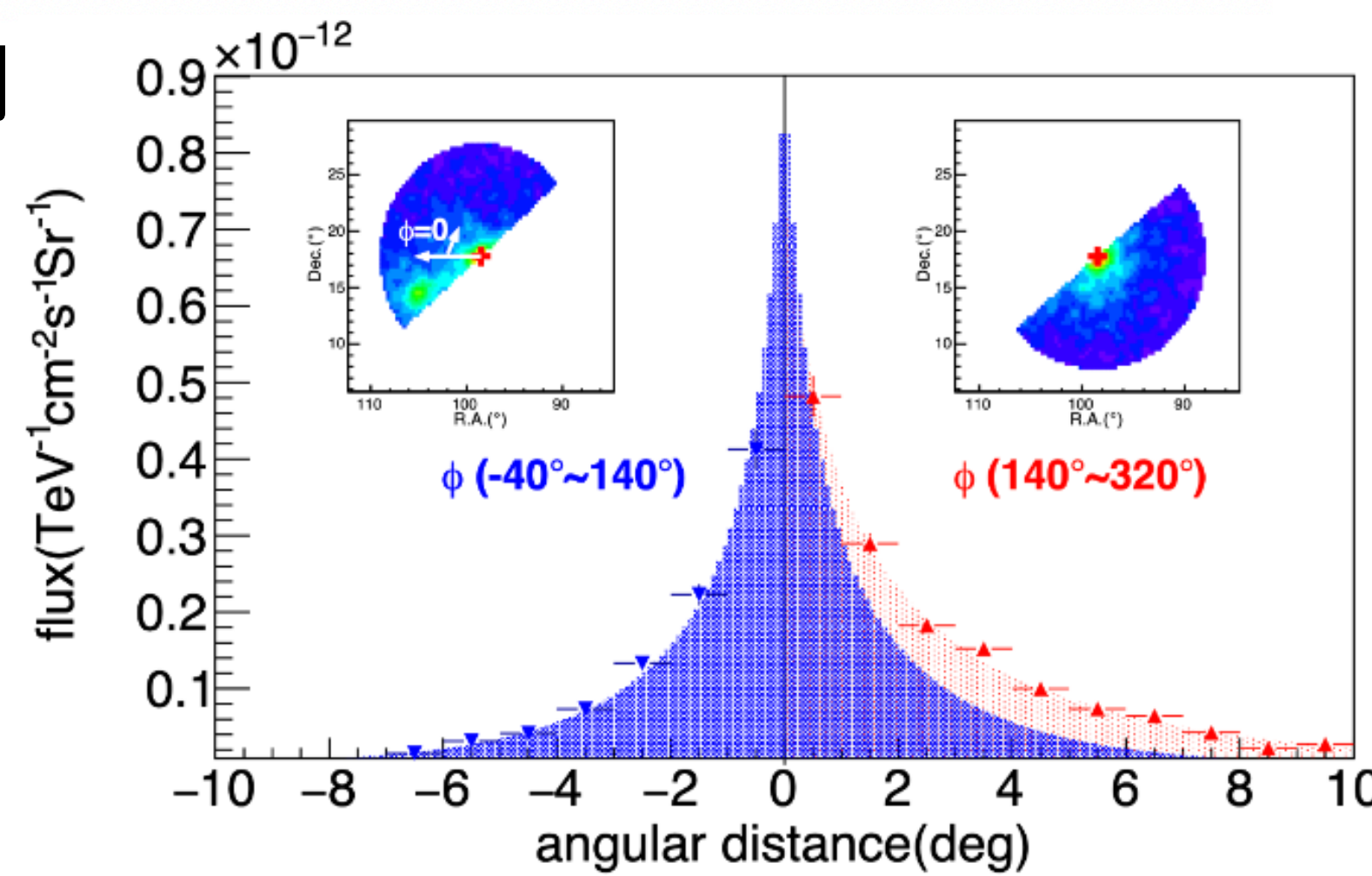
模拟磁场相干长度10pc
时，脉冲星晕的不对称性

研究内容1: Pulsar halo 中的粒子扩散

陈恩生's talk

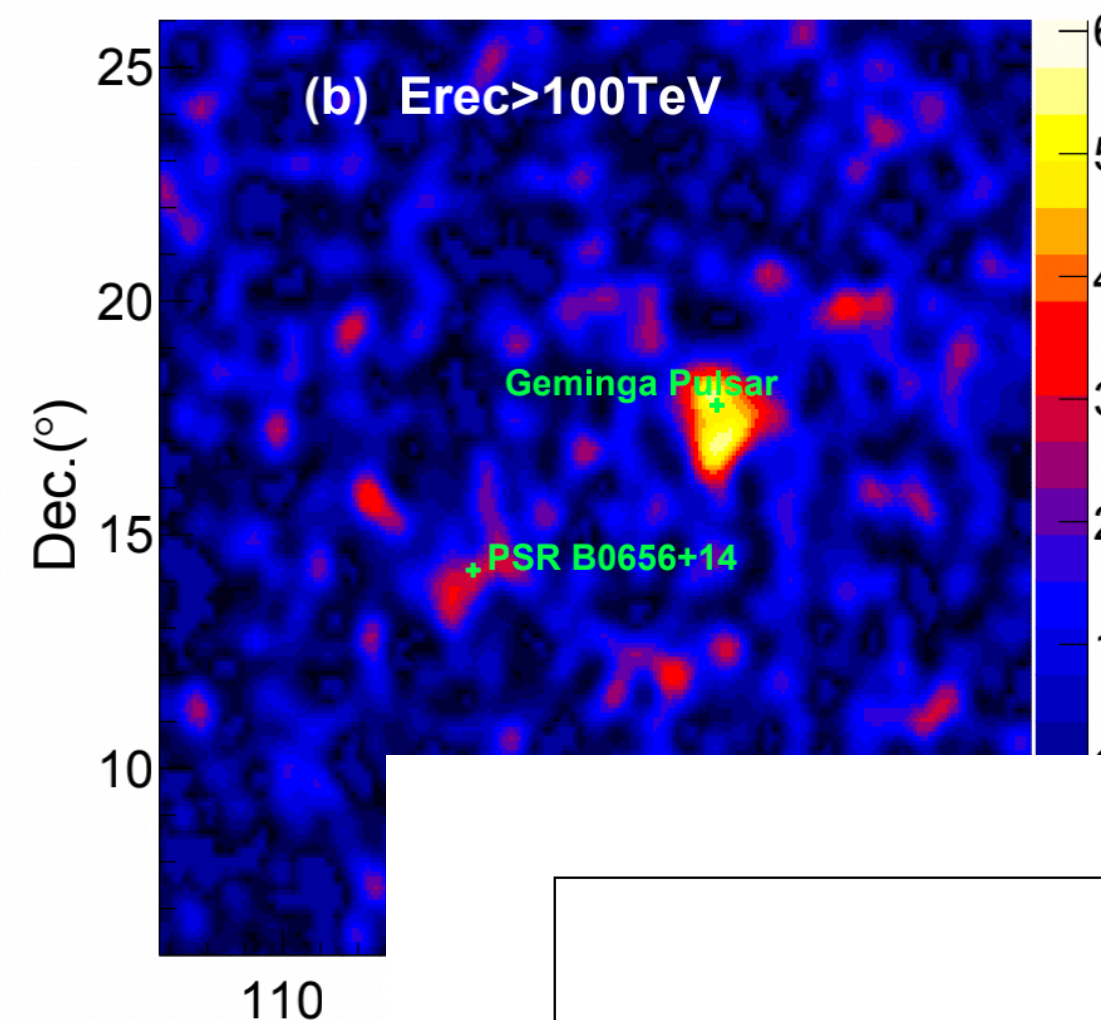
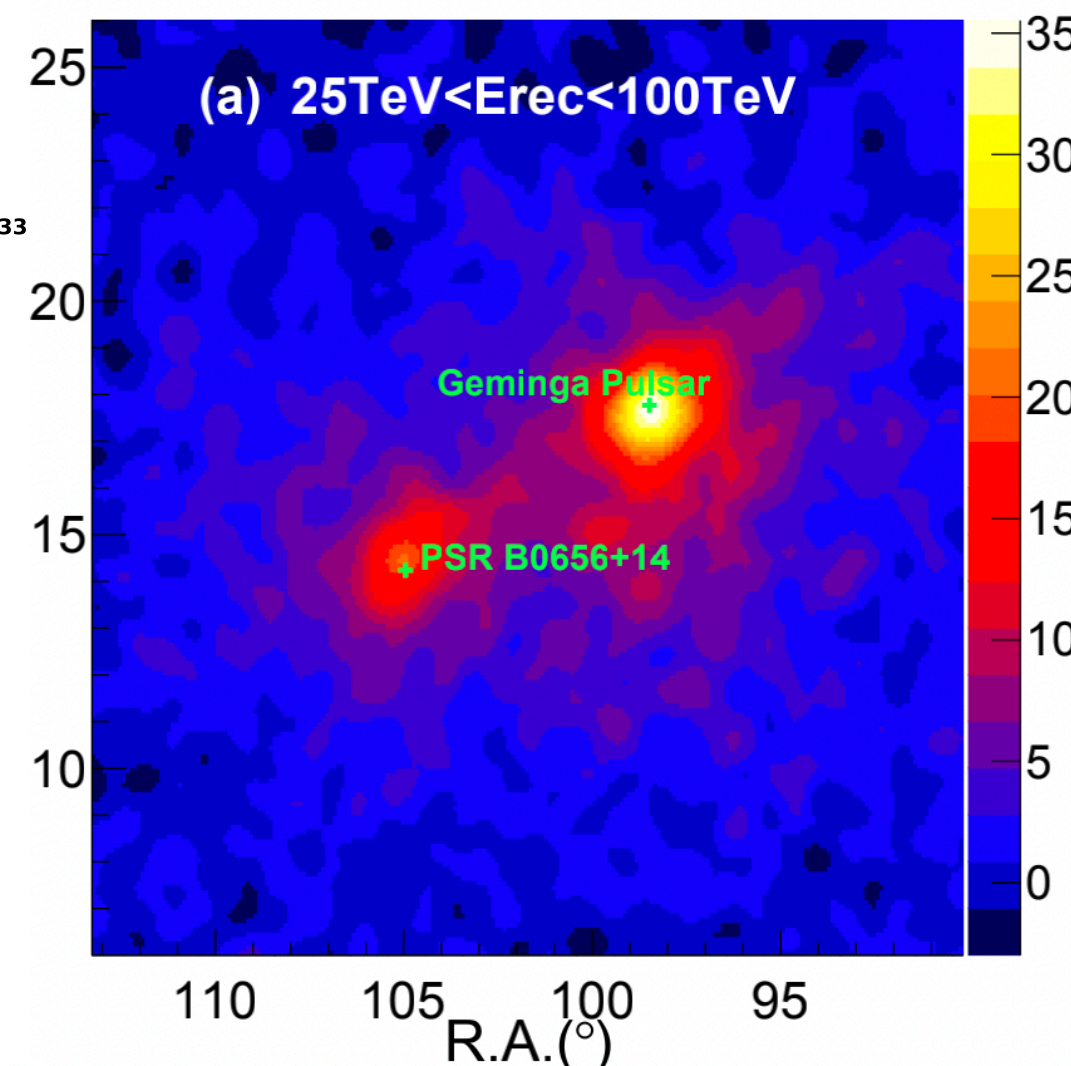
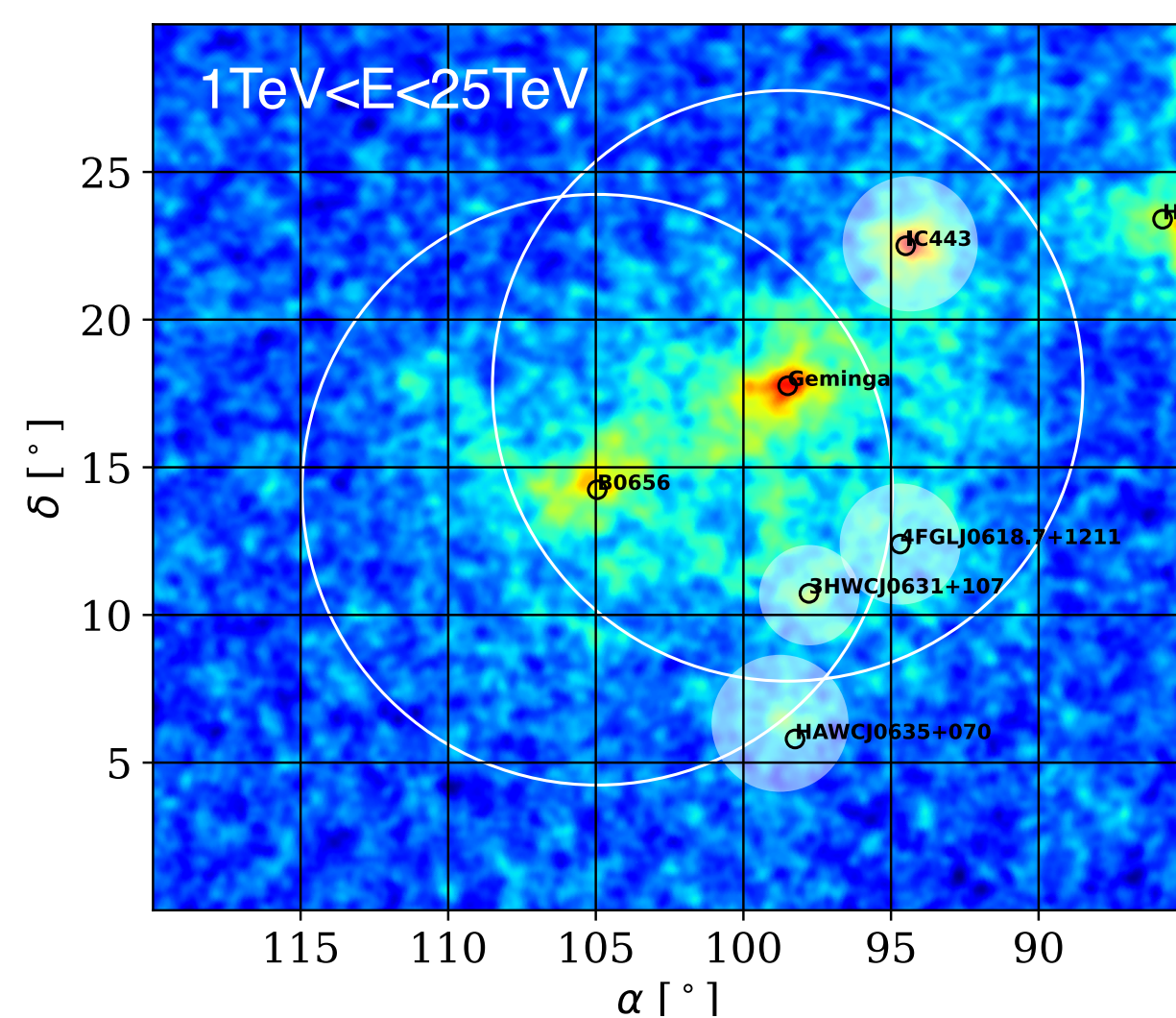


- 伽马射线在1TeV至超过100TeV范围内被观测到
- 呈现 2π 为周期的不对称性

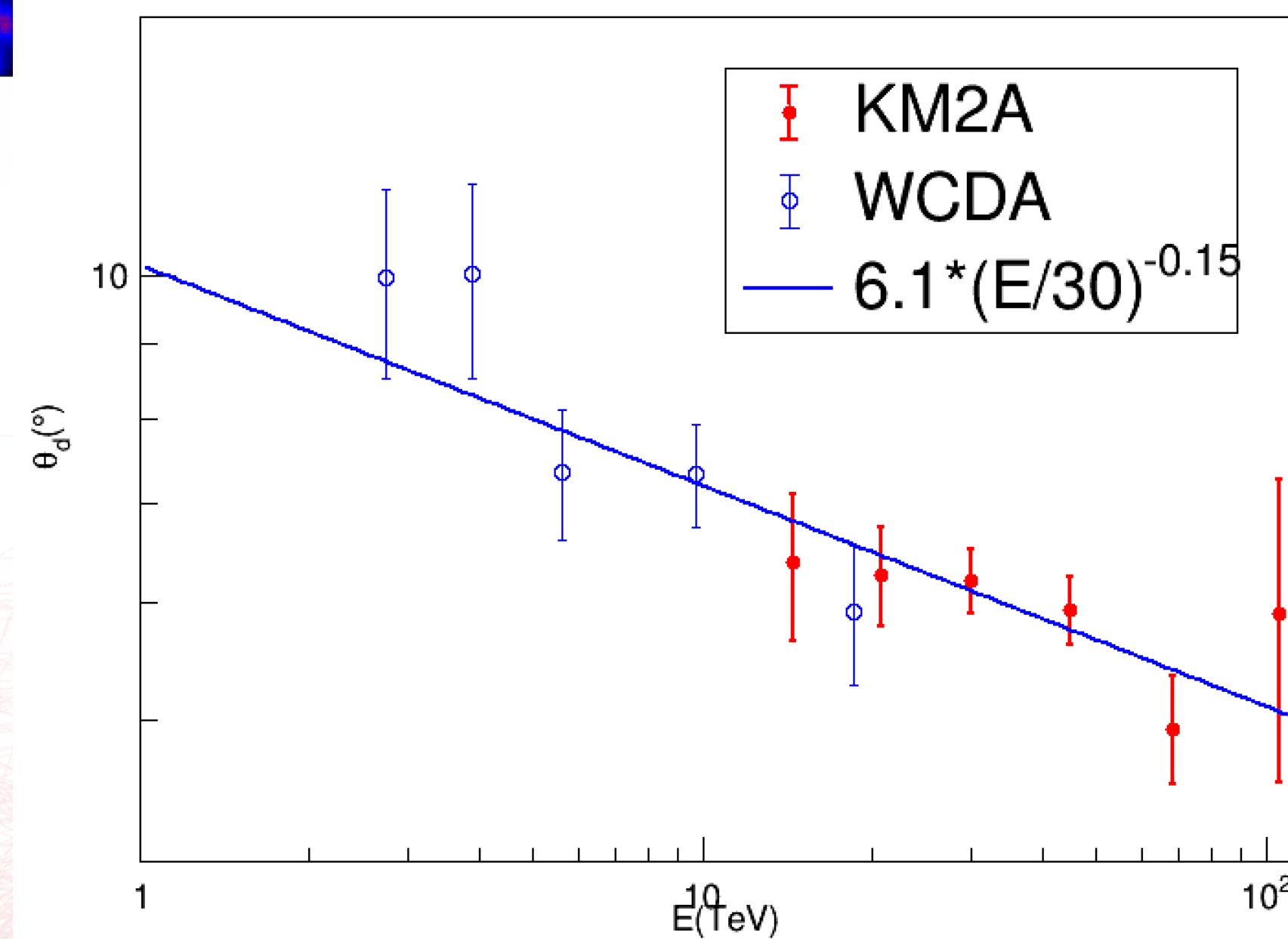


研究内容1: Pulsar halo 中的粒子扩散

陈恩生's talk

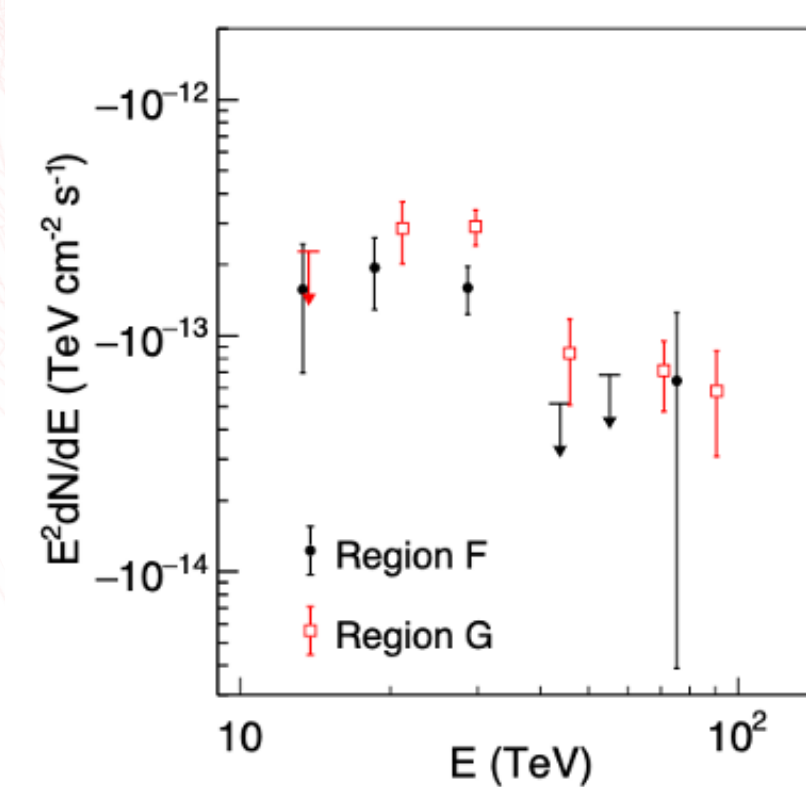
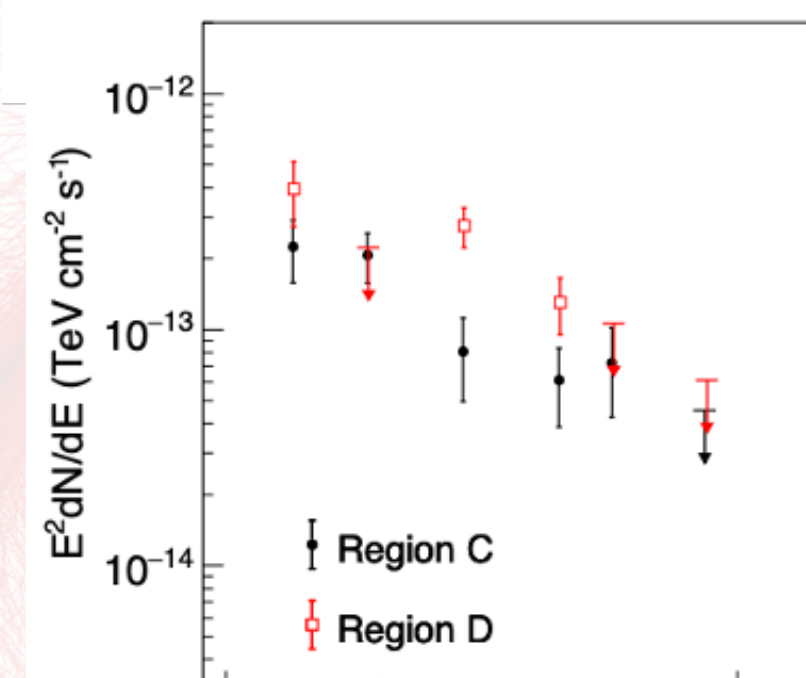
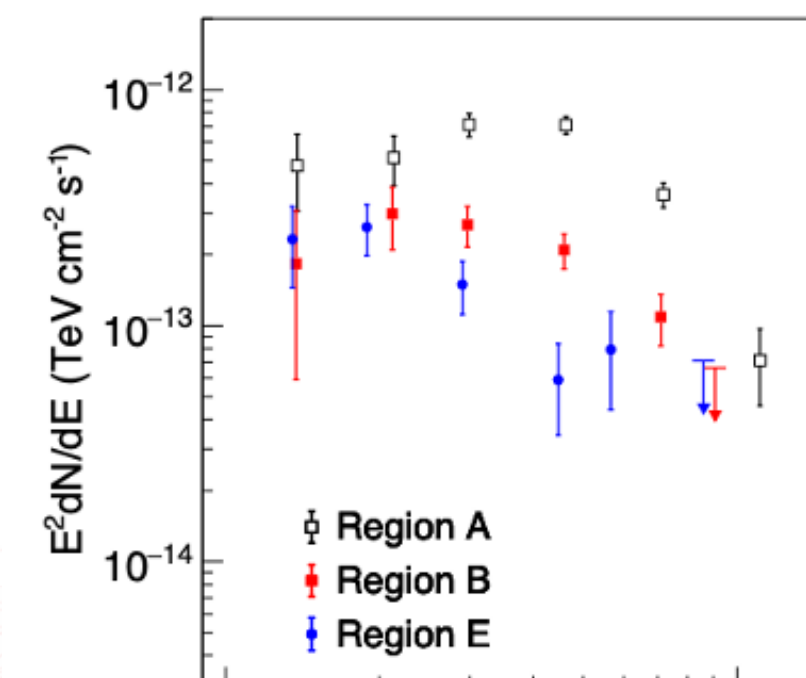
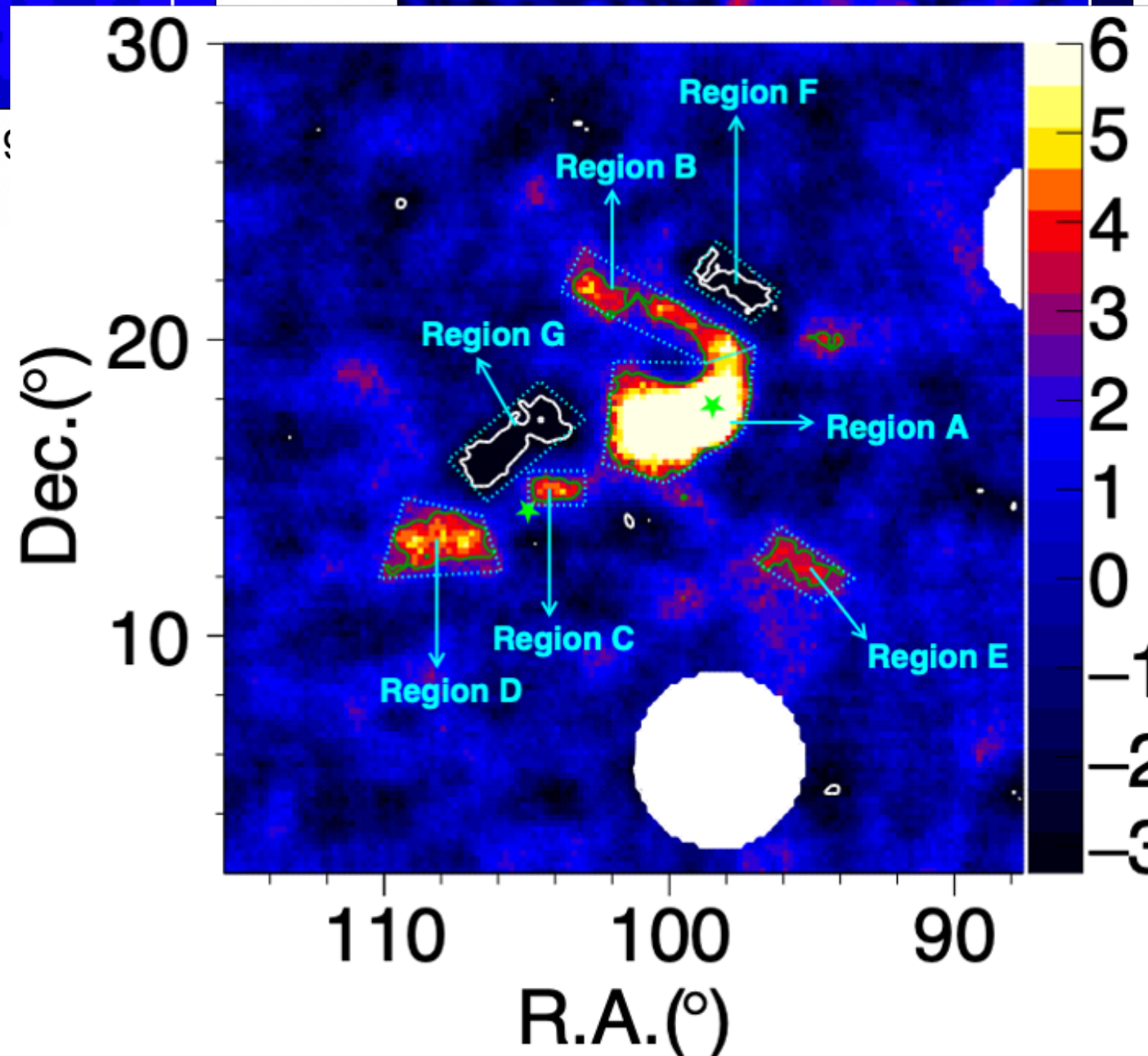
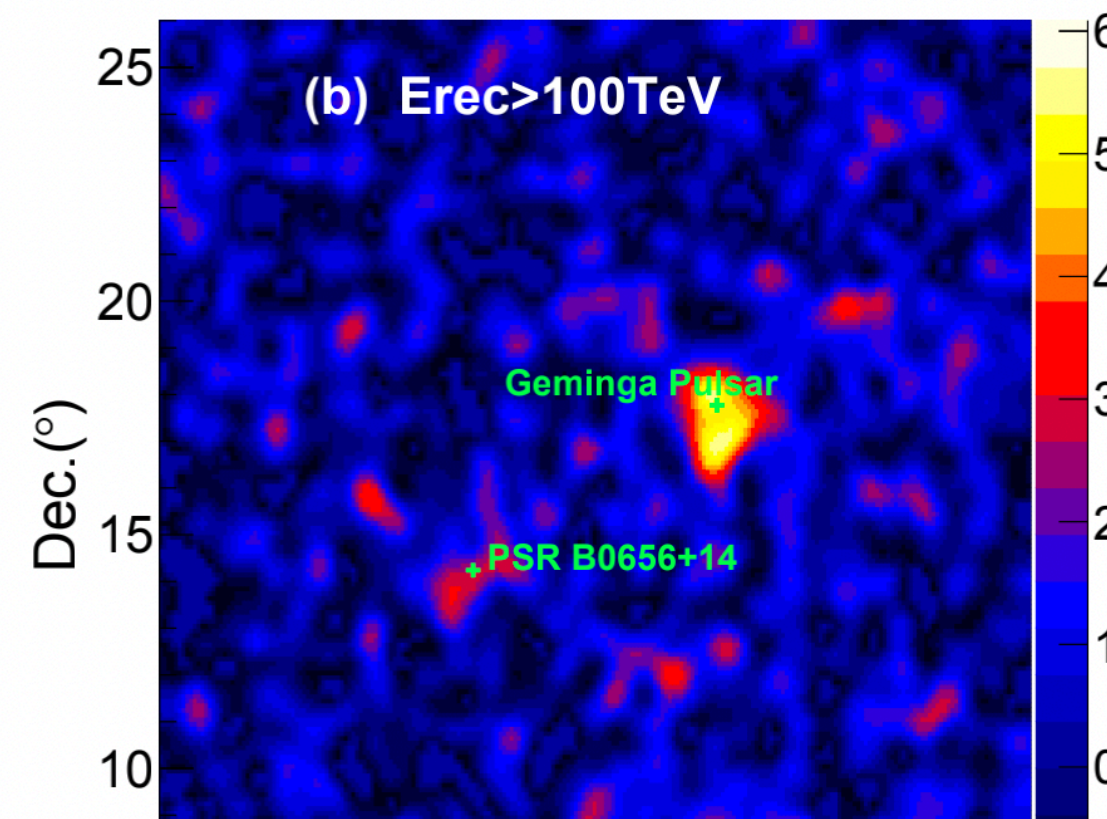
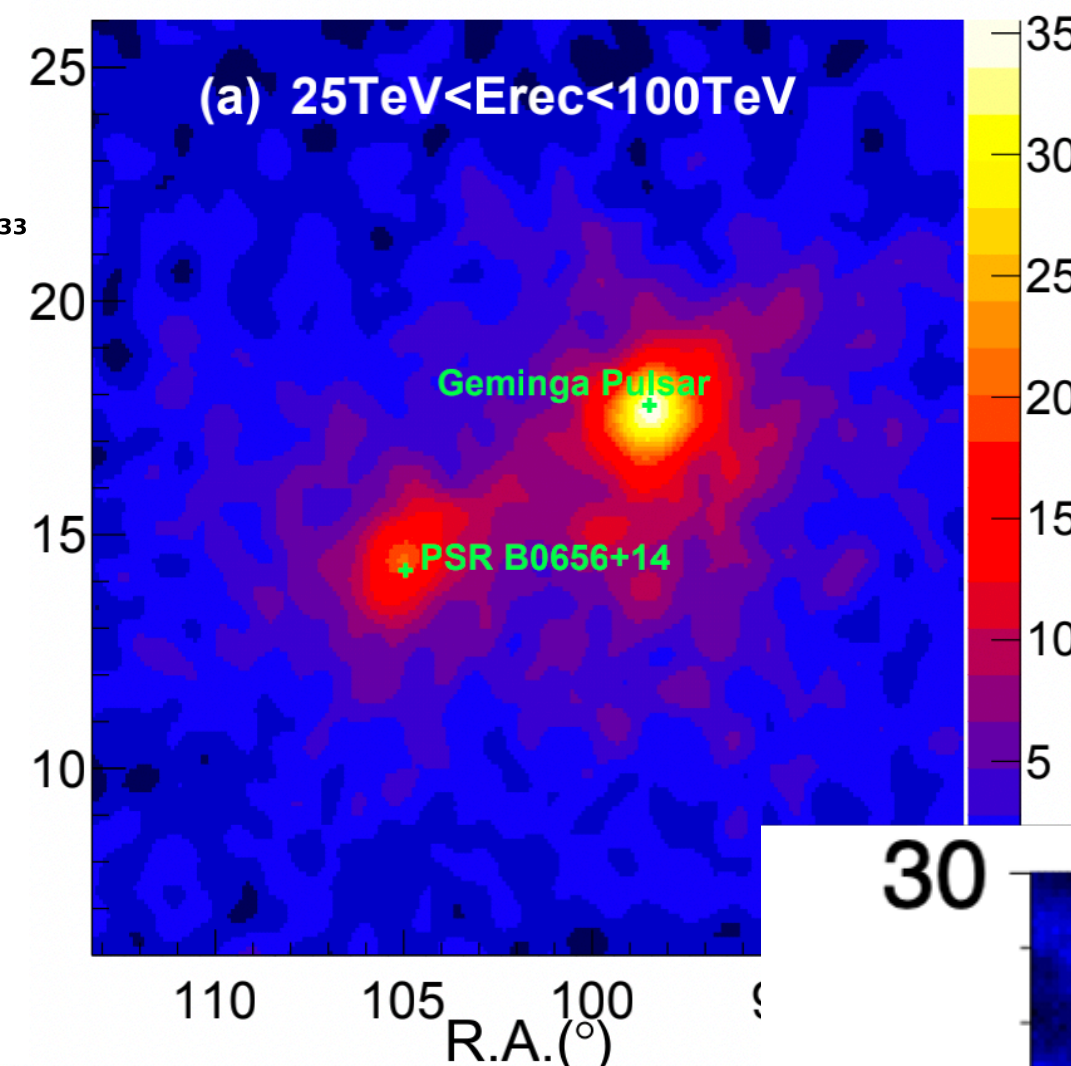
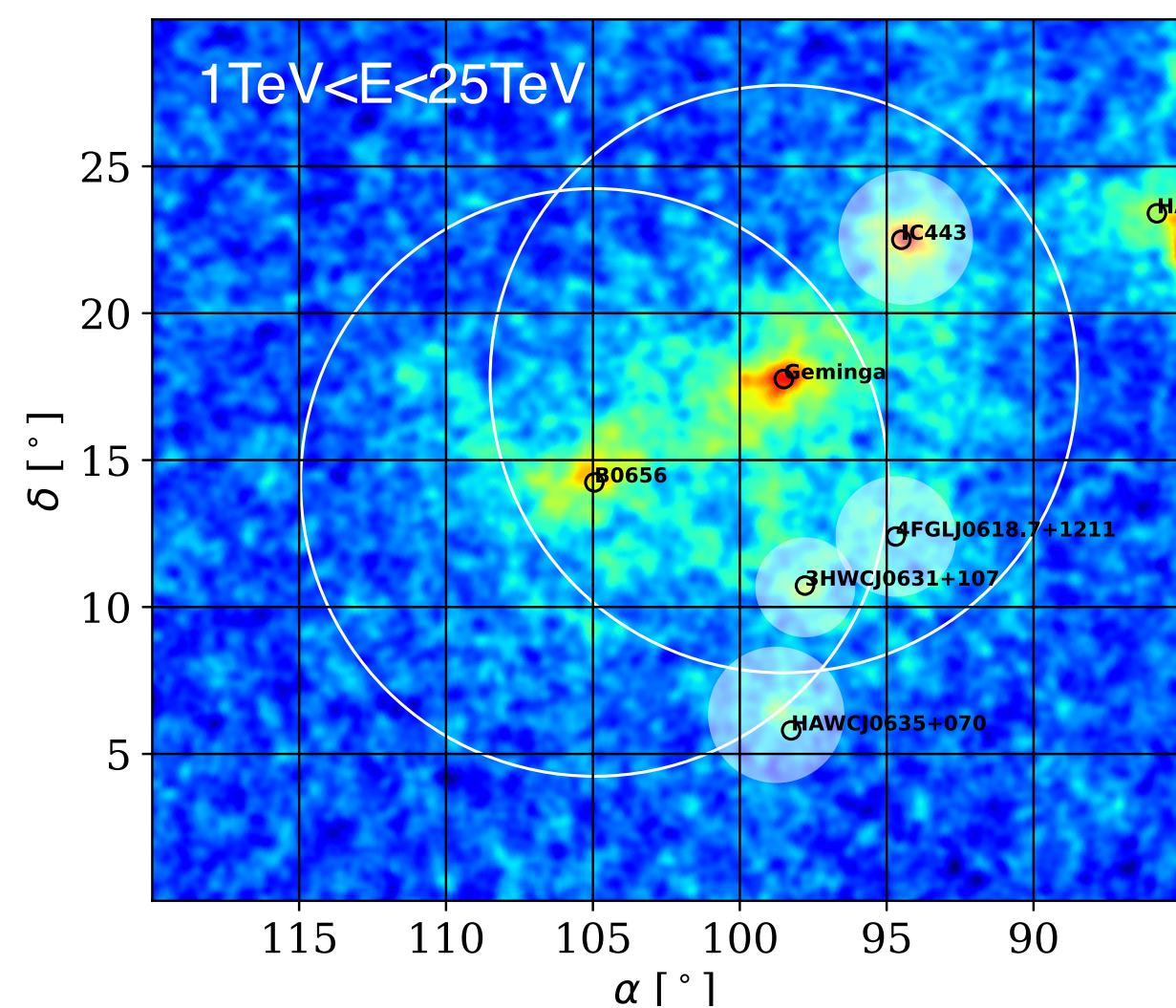


- 伽马射线在1TeV至超过100TeV范围内被观测到
- 呈现 2π 为周期的不对称性
- 能量依赖的扩展度



研究内容1: Pulsar halo 中的粒子扩散

陈恩生's talk

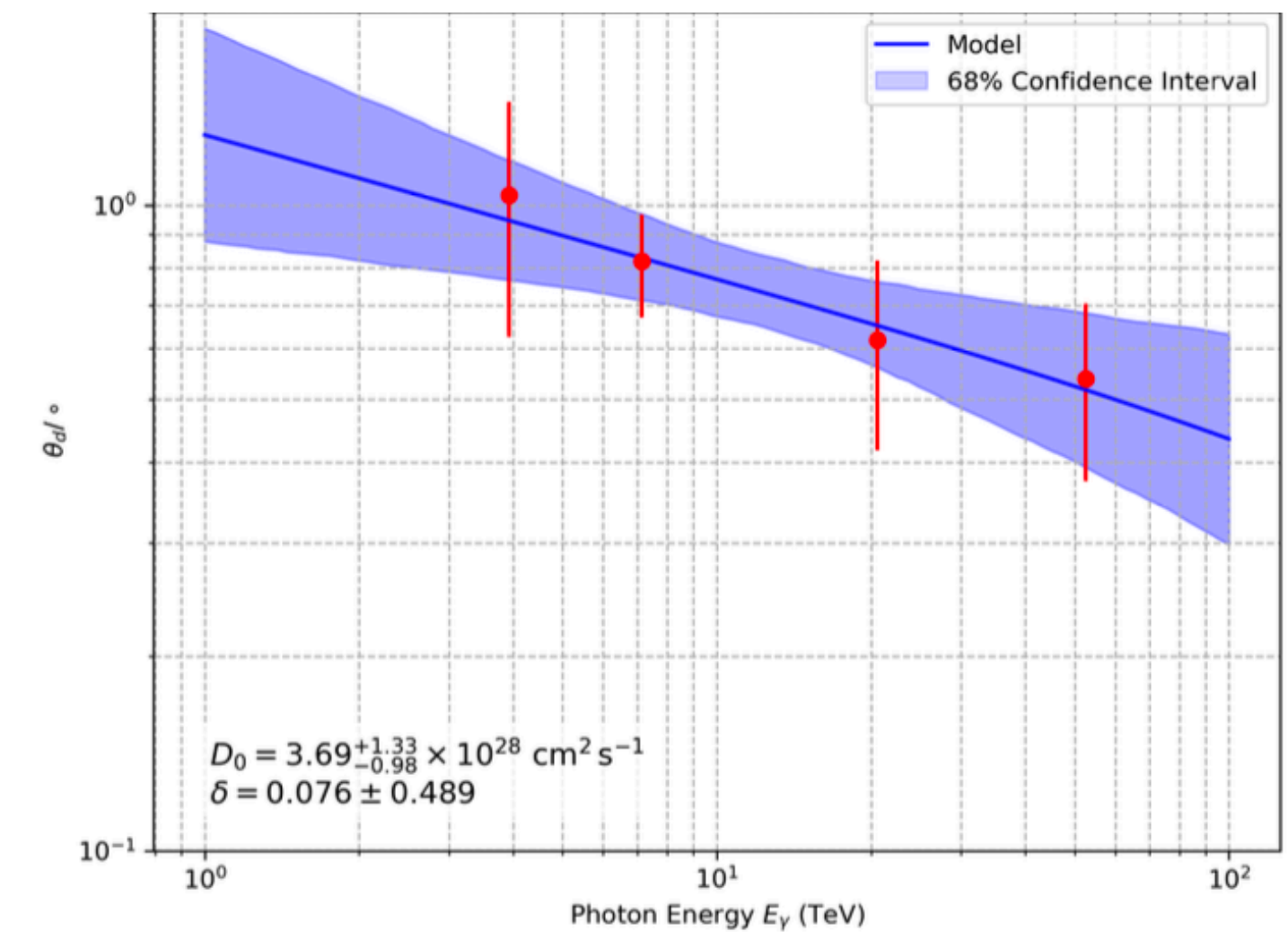
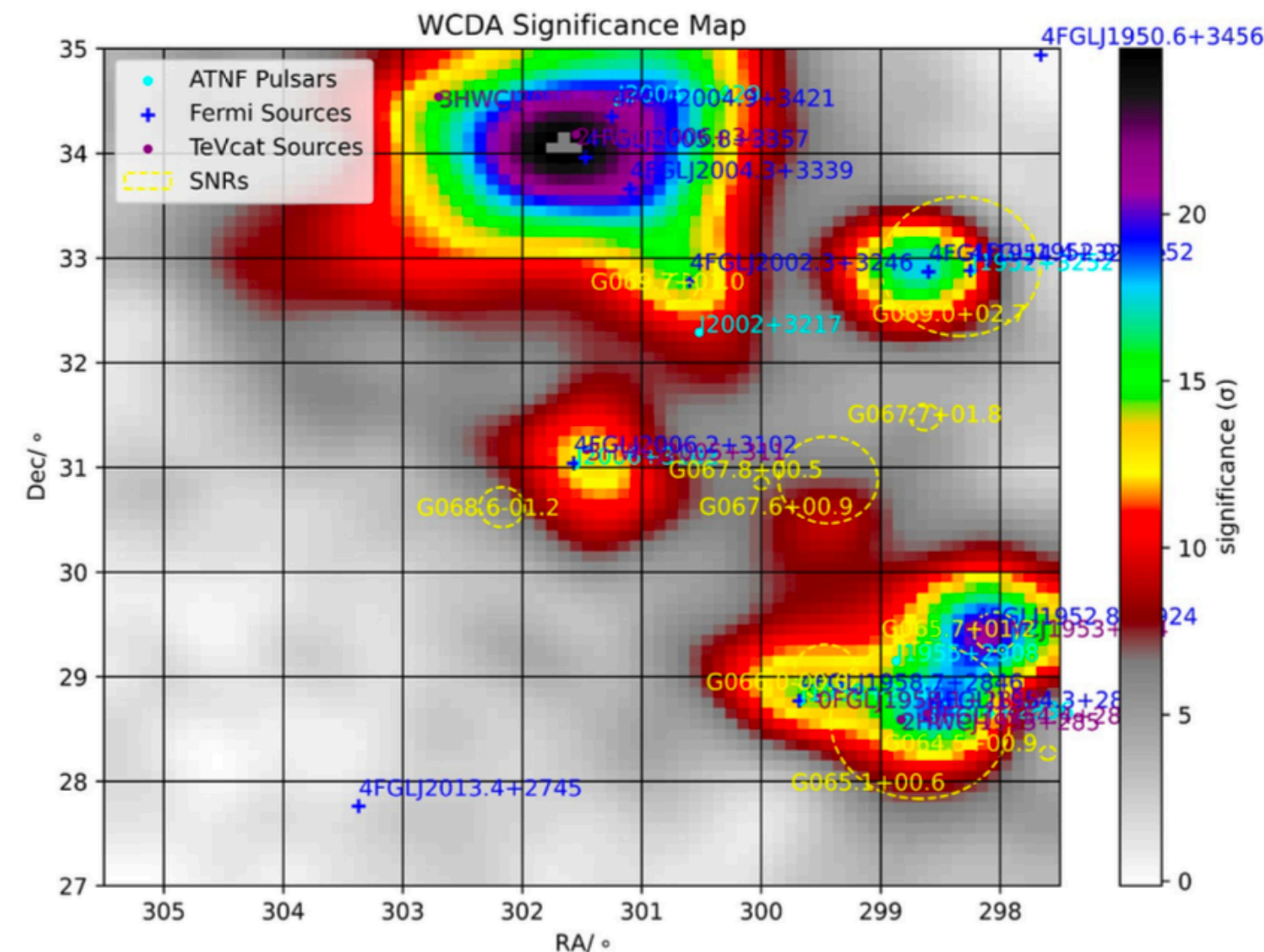
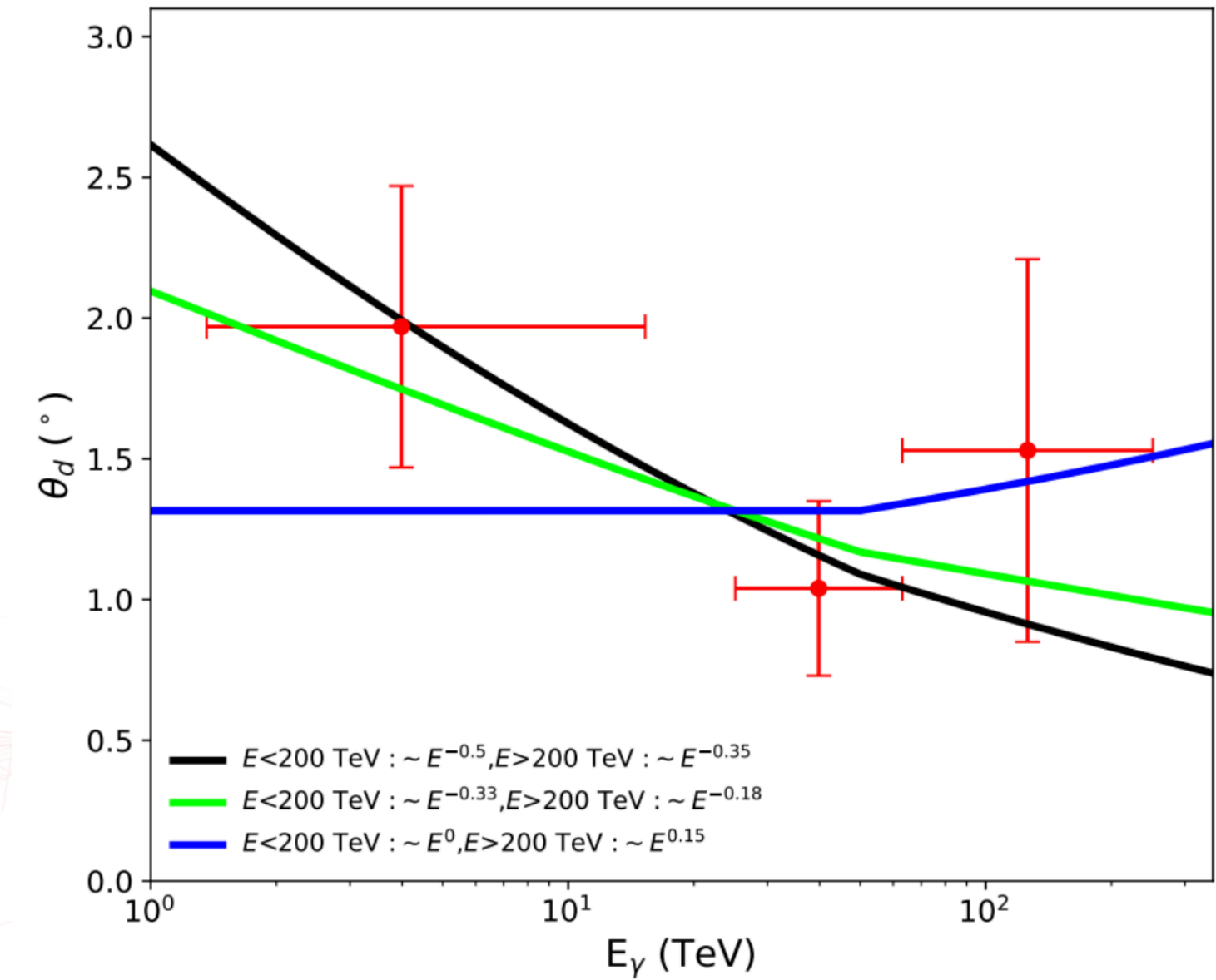


- 伽马射线在1 TeV至超过100 TeV范围内被观测到
- 呈现 2π 为周期的不对称性
- 能量依赖的扩展度
- 残差中的结构是真实的吗?

研究内容1: 更多Pulsar halo candidates

- PSR J0622+3749
- PSR J0248+6021
- PSR J2006+3102
- PSR J0633+0632
- PSR J2028+3332
- PSR J1952+2630
-

更多扩散系数及其能量依赖的测量



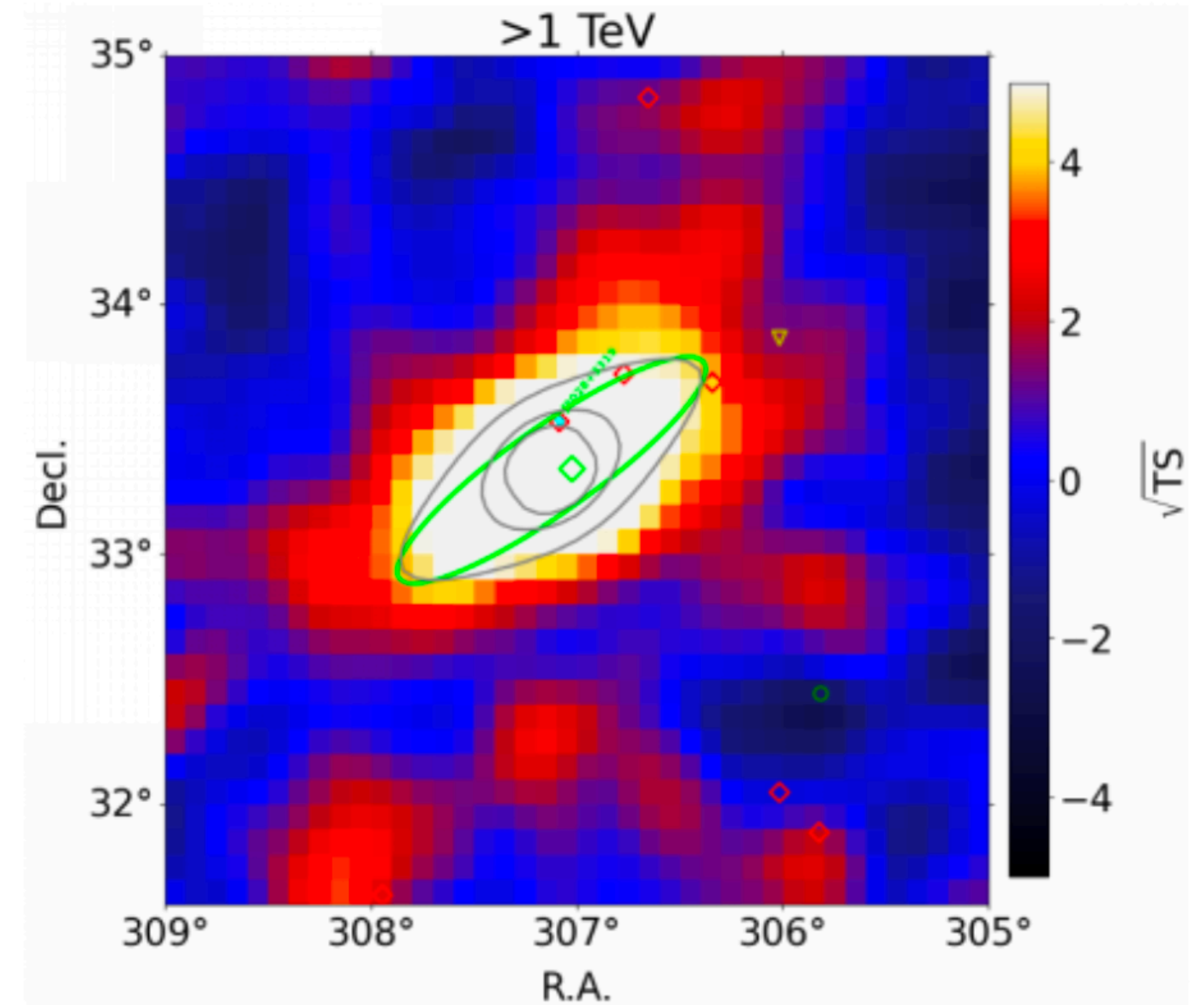
研究内容1：更多Pulsar halo candidates

- PSR J0622+3749
- PSR J0248+6021
- PSR J2006+3102
- PSR J0633+0632
- **PSR J2028+3332**
- PSR J1952+2630
-

更多非对称复杂形态的测量

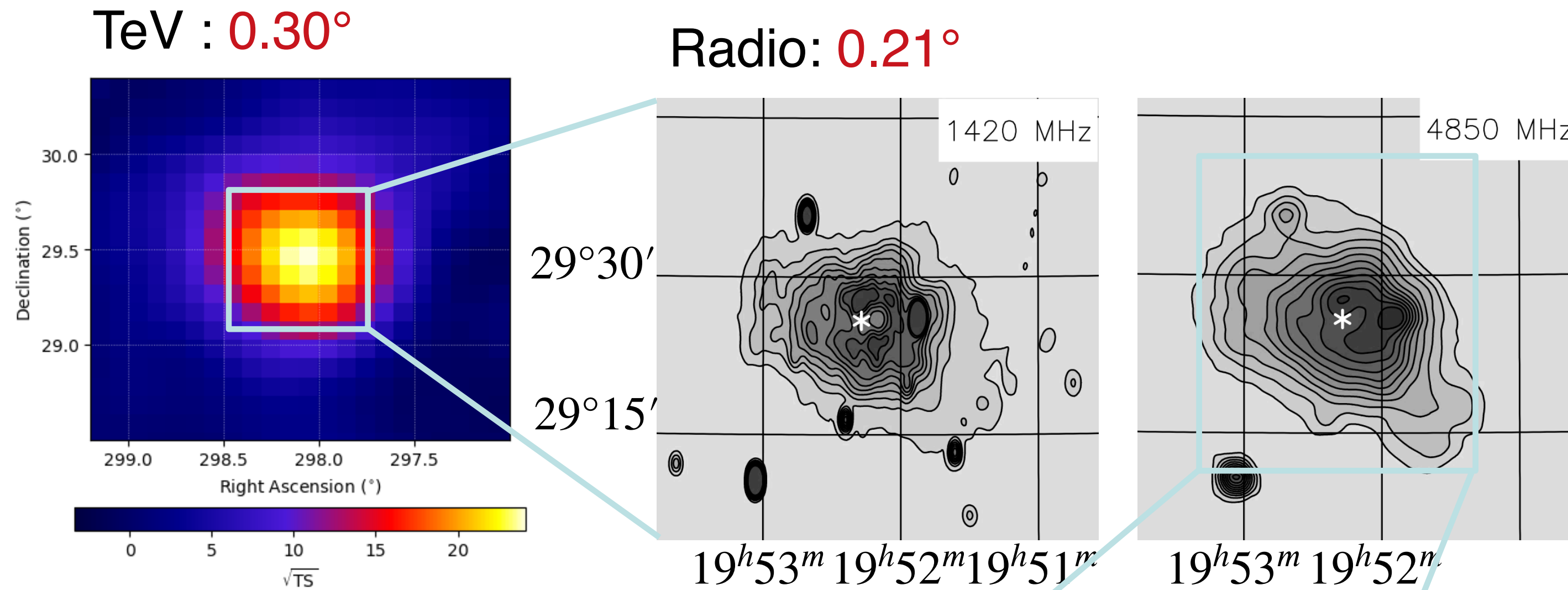
$$D_{\theta_d}(100\text{TeV}) = 8.53 \times 10^{27} \left(\frac{d}{0.76\text{kpc}}\right)^2 \text{cm}^2/\text{s}$$

$$D_{\theta_a}(100\text{TeV}) = 1.74 \times 10^{26} \left(\frac{d}{0.76\text{kpc}}\right)^2 \text{cm}^2/\text{s}$$



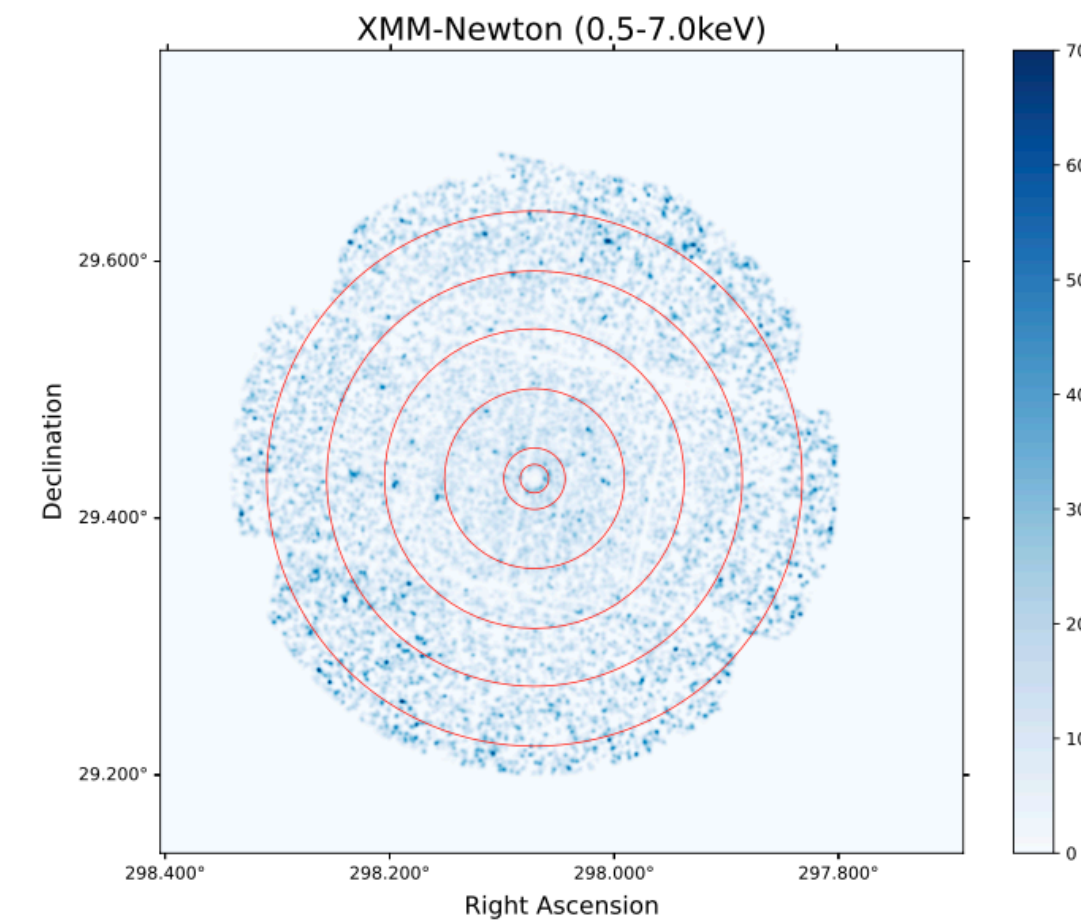
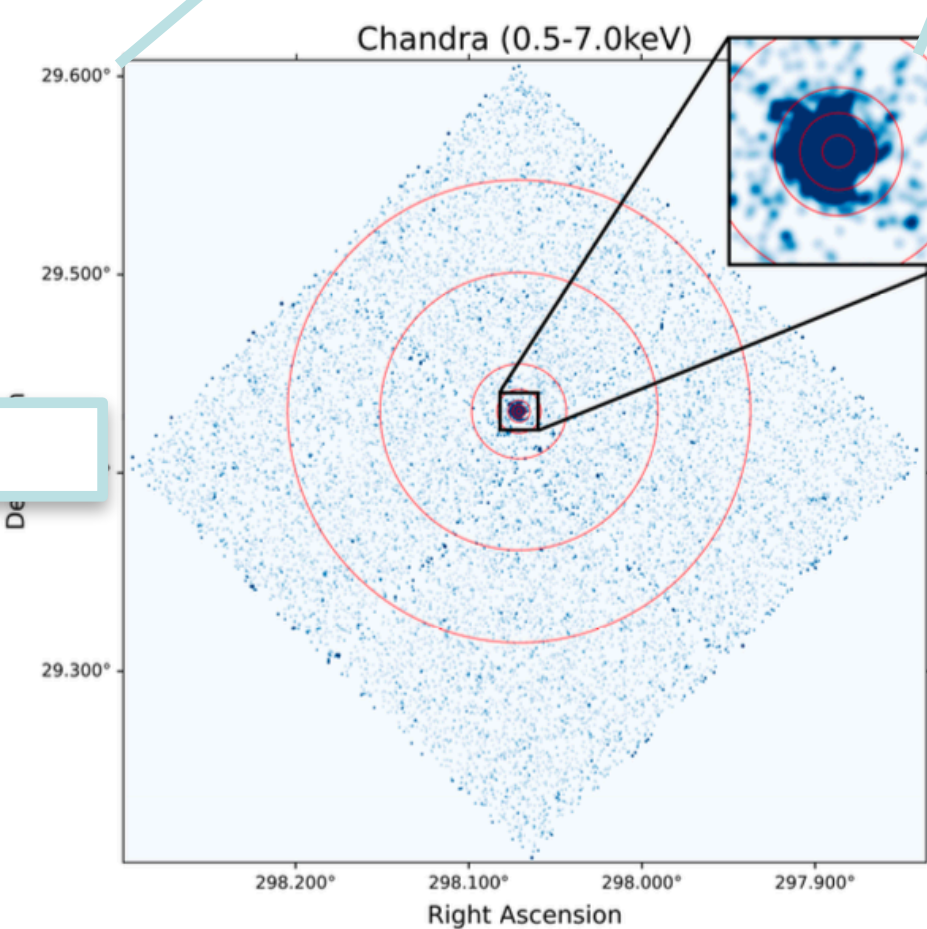
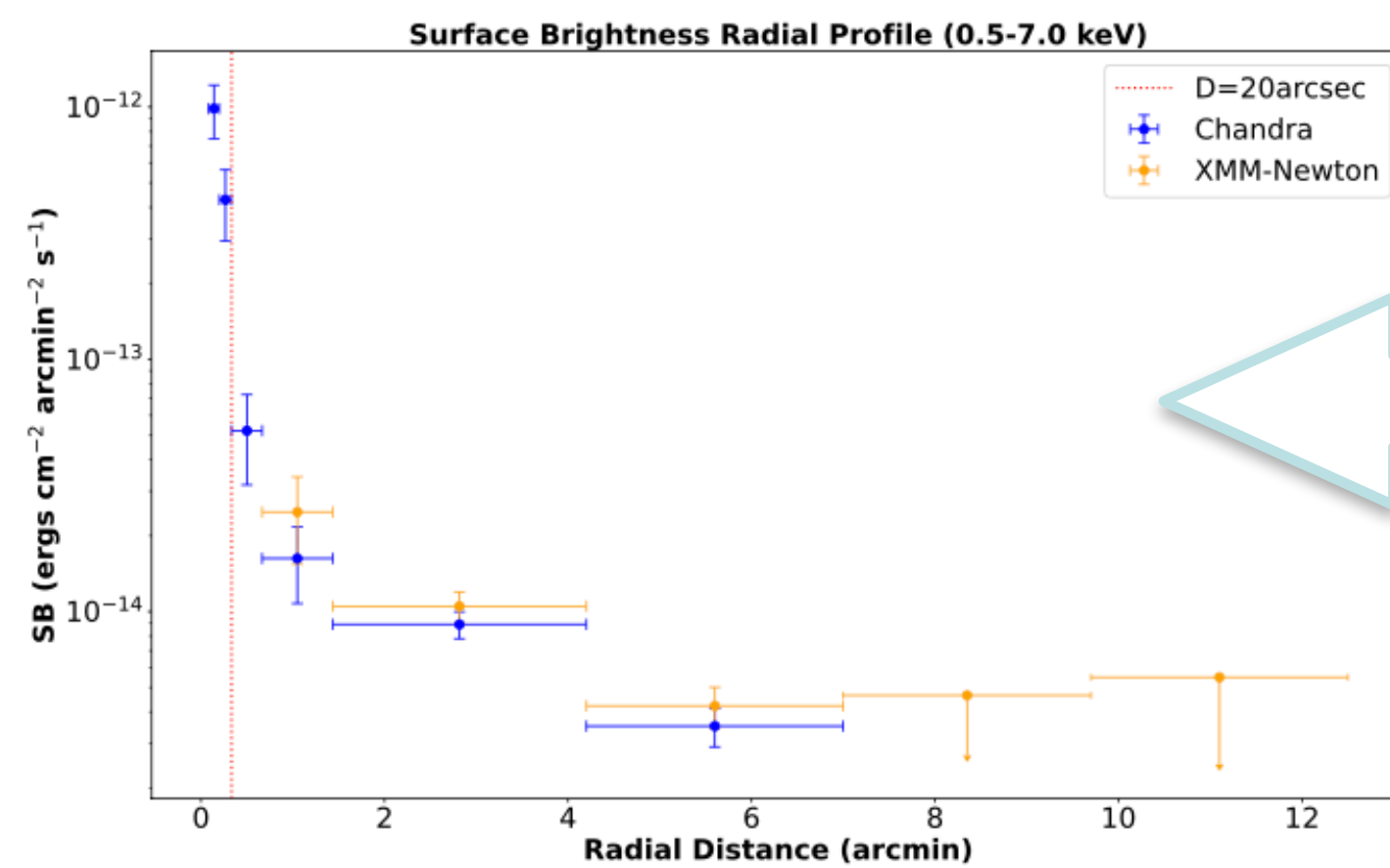
研究内容1: DA495中粒子的传输和逃逸

陈晓斌's talk



- 双区 (内区: 对流; 外区: 扩散)
- 能够解释X-ray和伽马形态
- PWN到pulsar halo的演化阶段?

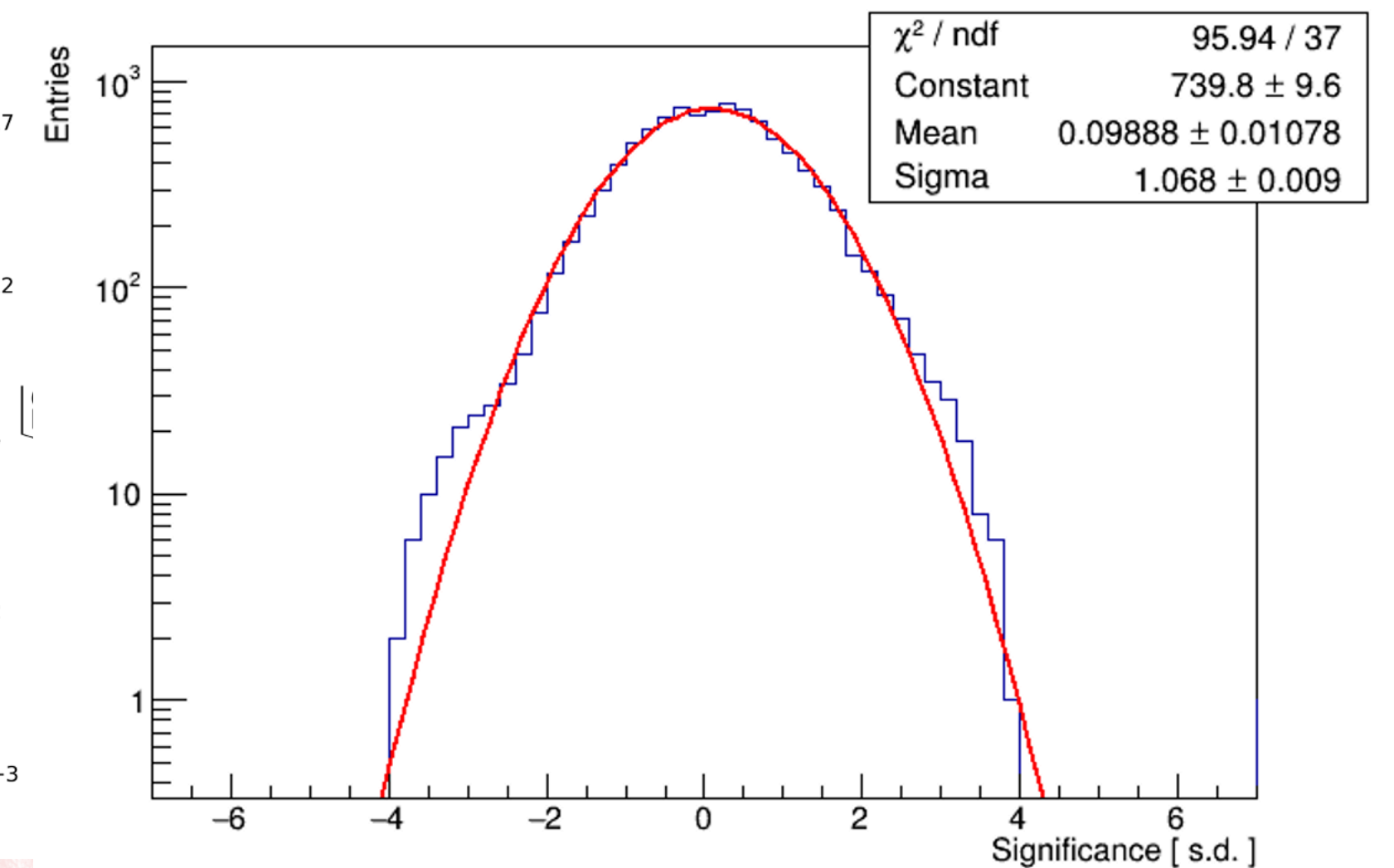
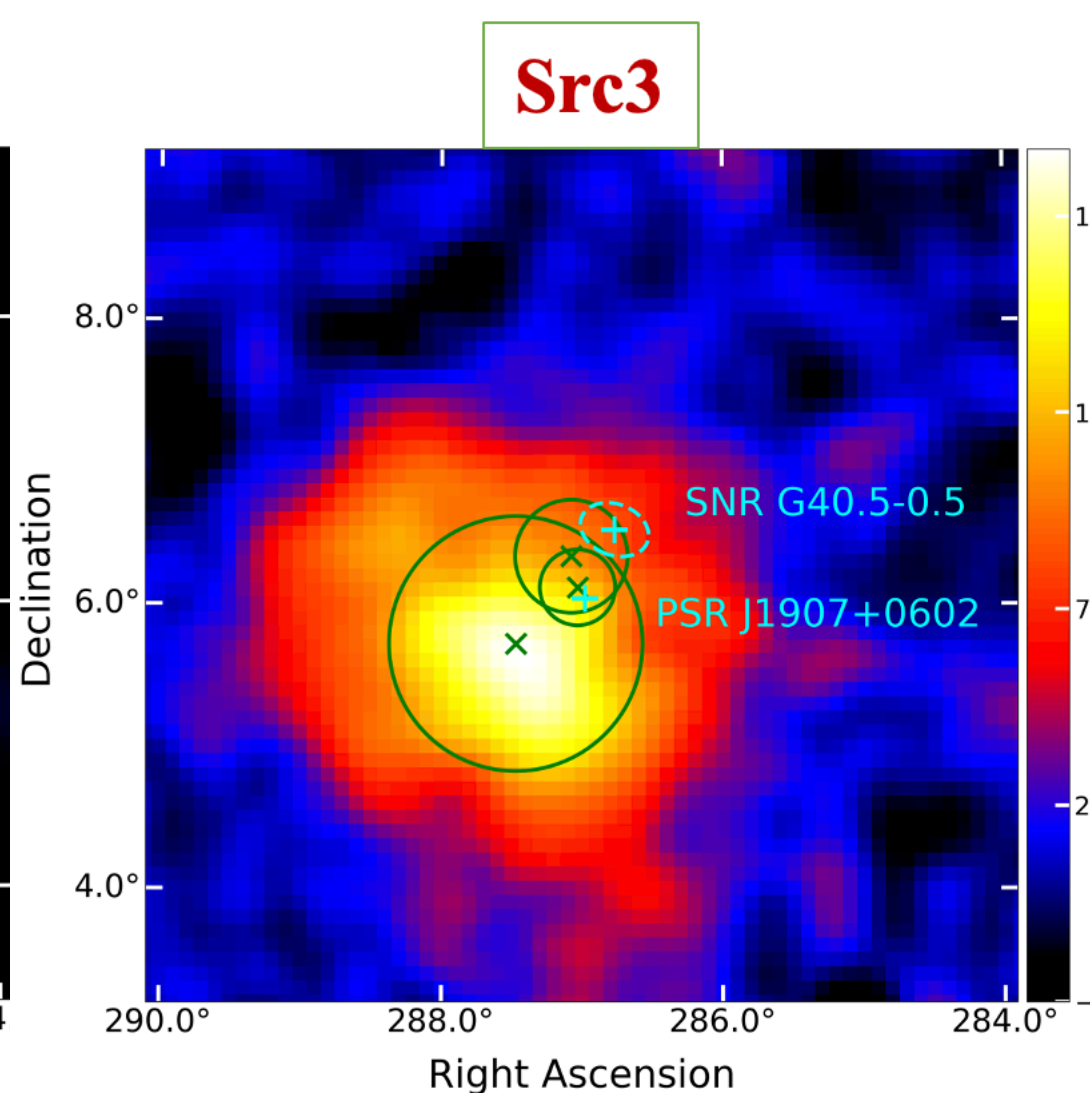
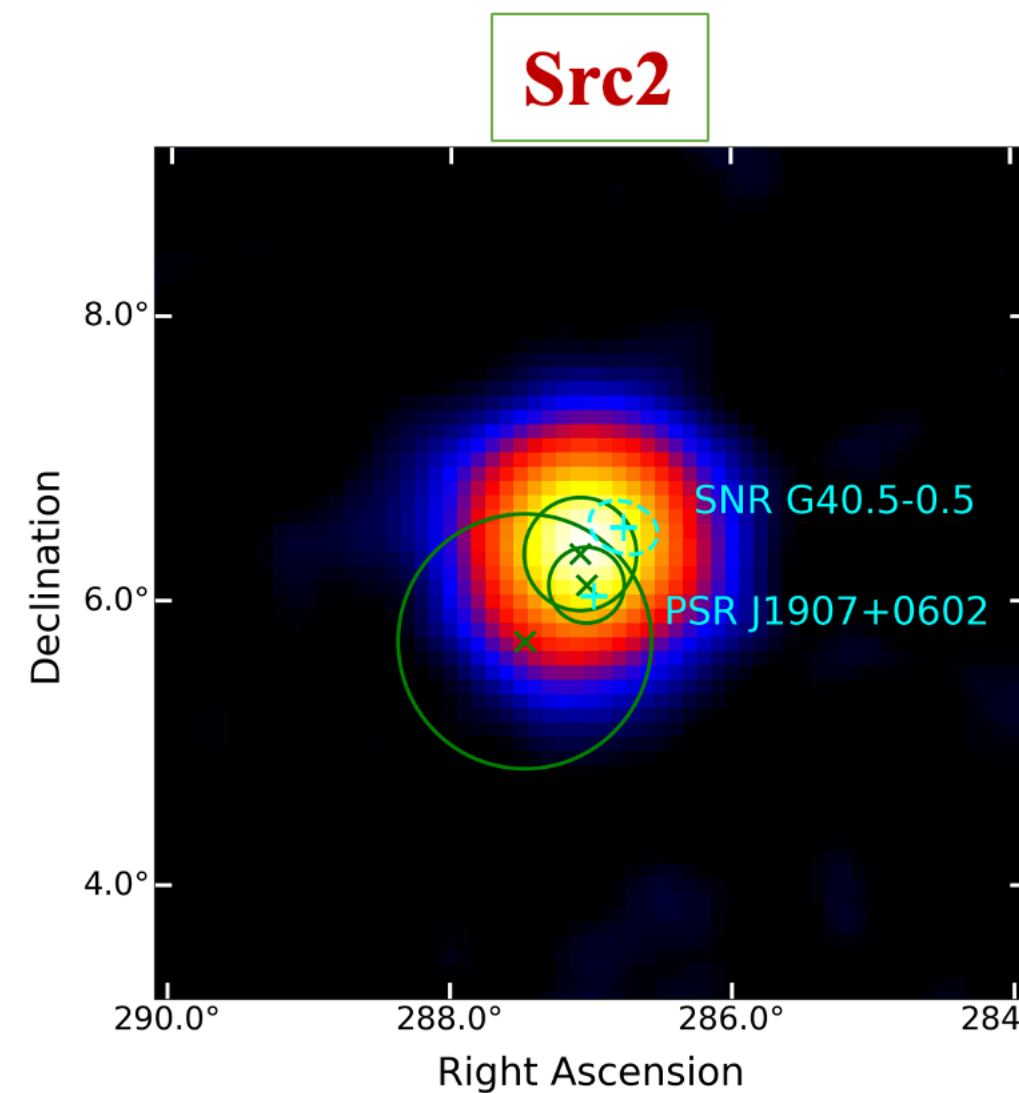
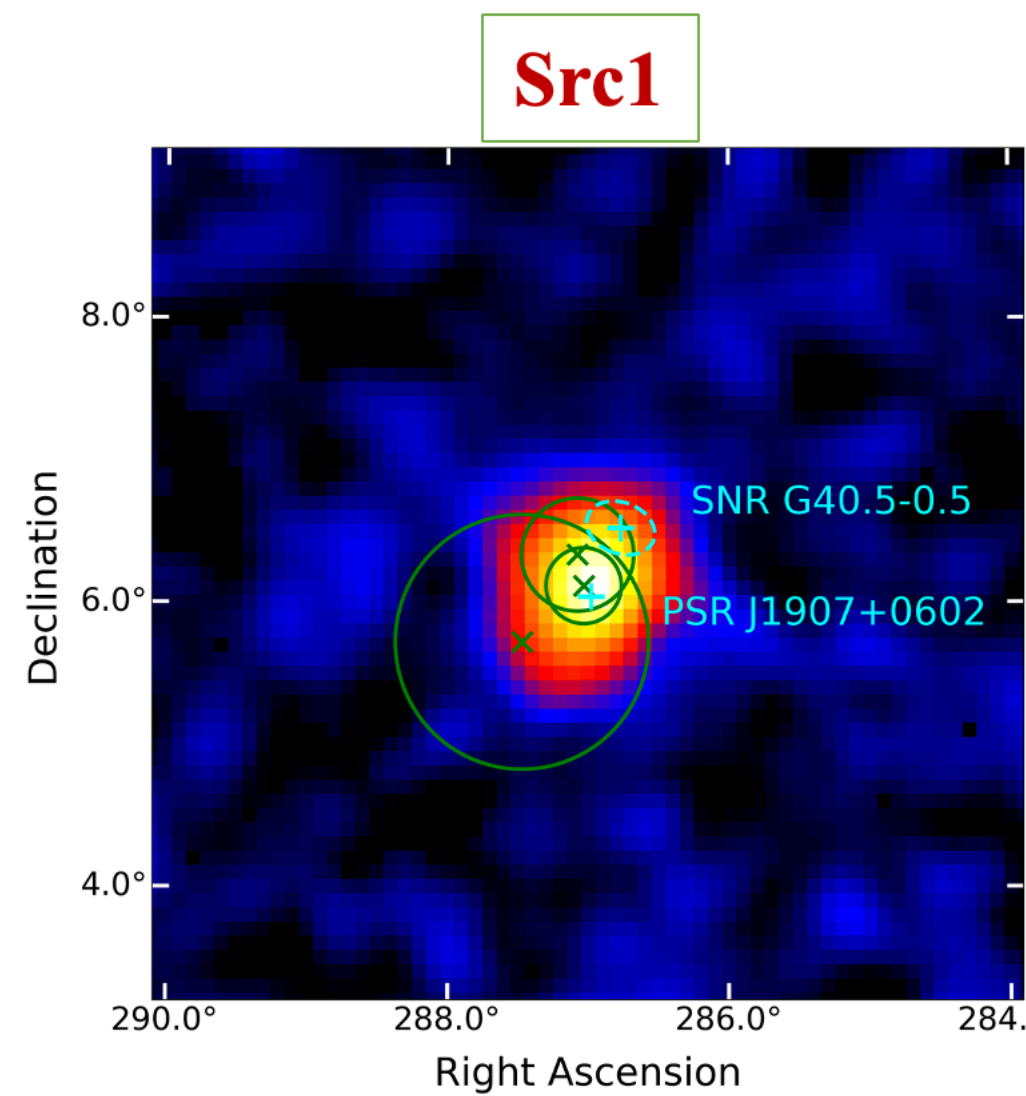
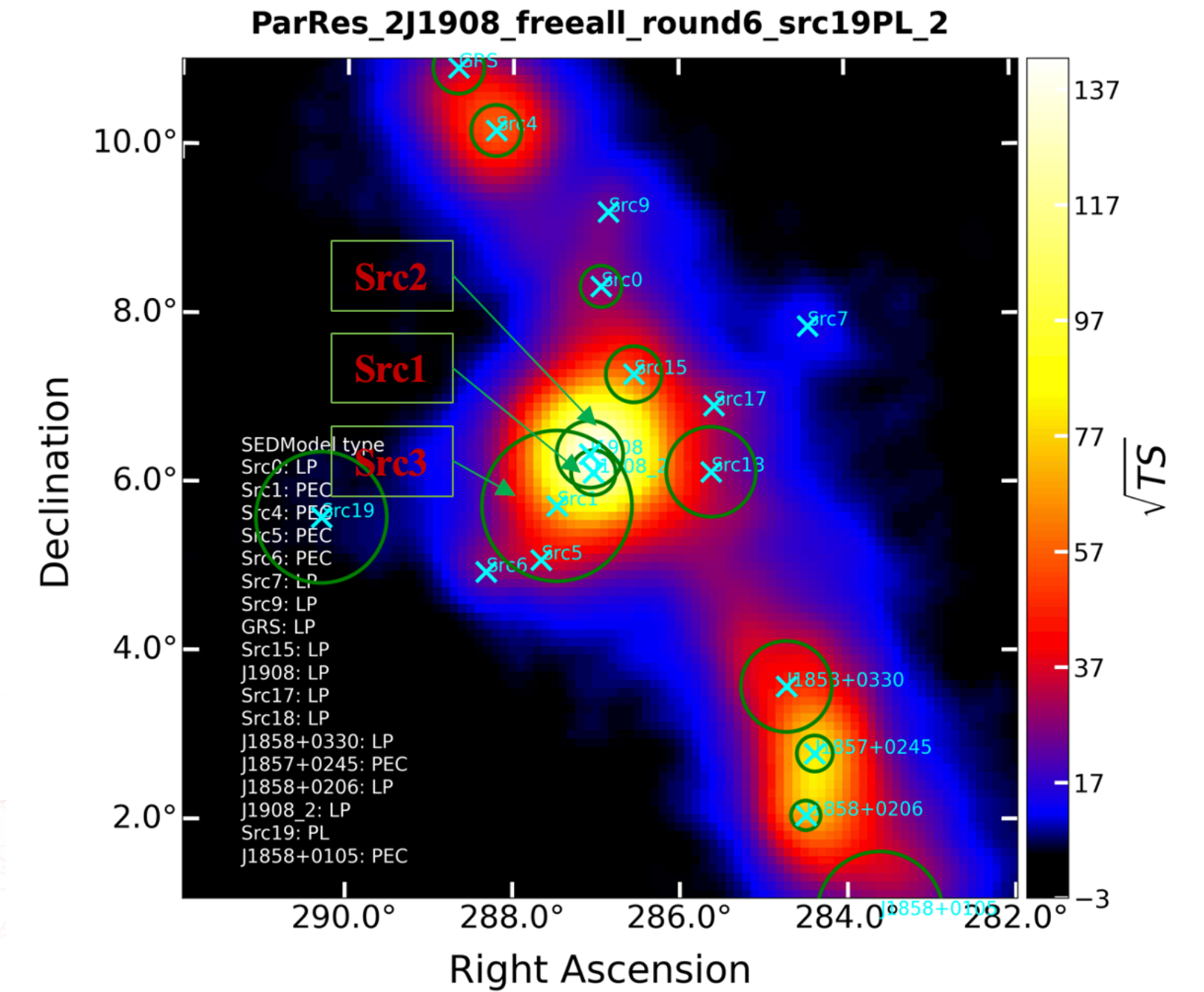
X-ray:
Compact object
+ $> 0.1^\circ$ ext src



研究内容1：强子源中的粒子逃逸

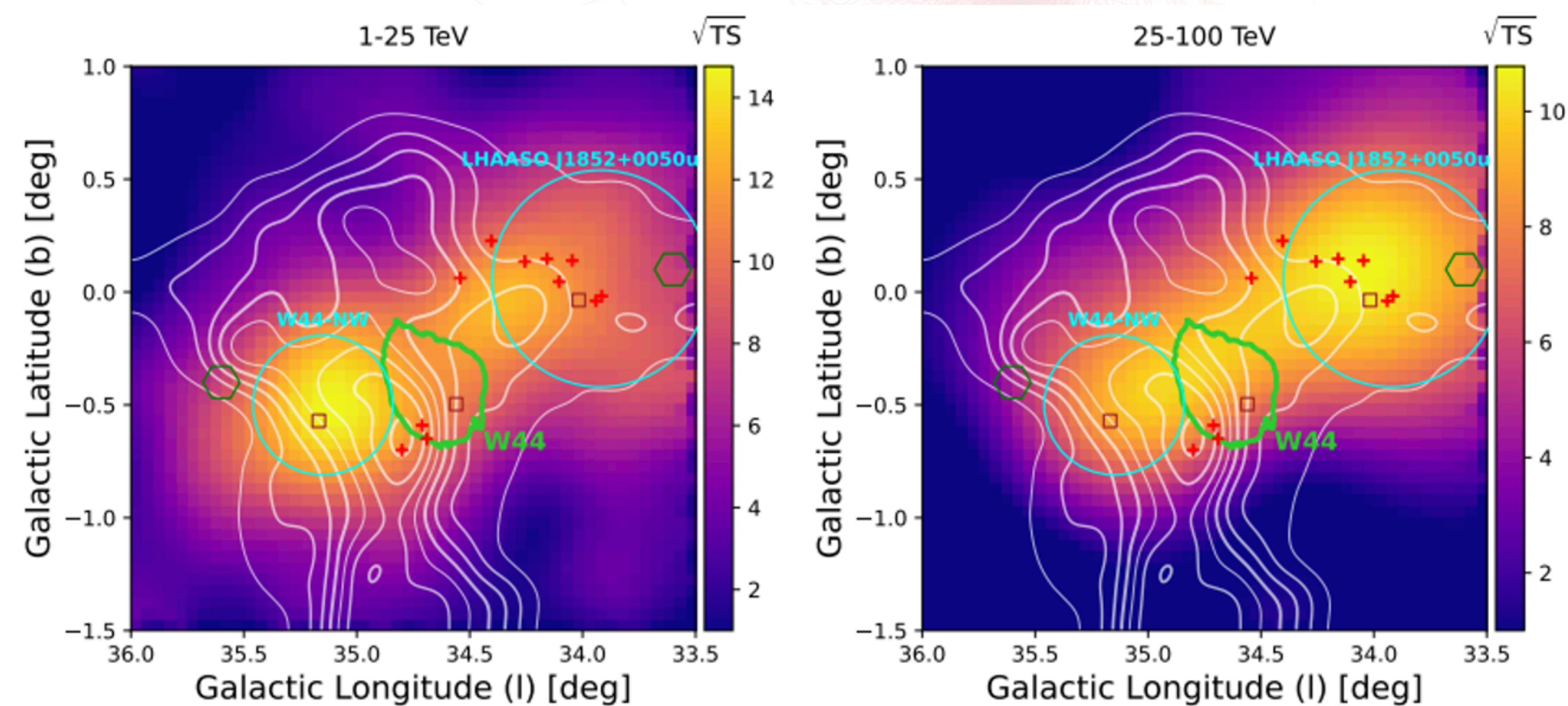
- 最亮的扩展源之一J1908 (胡世聪's talk)
- SNR W44附近的宇宙线逃逸 (吴含荣's talk)
- J2011+3315 区域长条状的伽马辐射 (李天扬)
- SNR和PWN重叠的J1945区域 (李源、罗宇)

伽马射线的产生需要靶物质，空间形态往往更加复杂



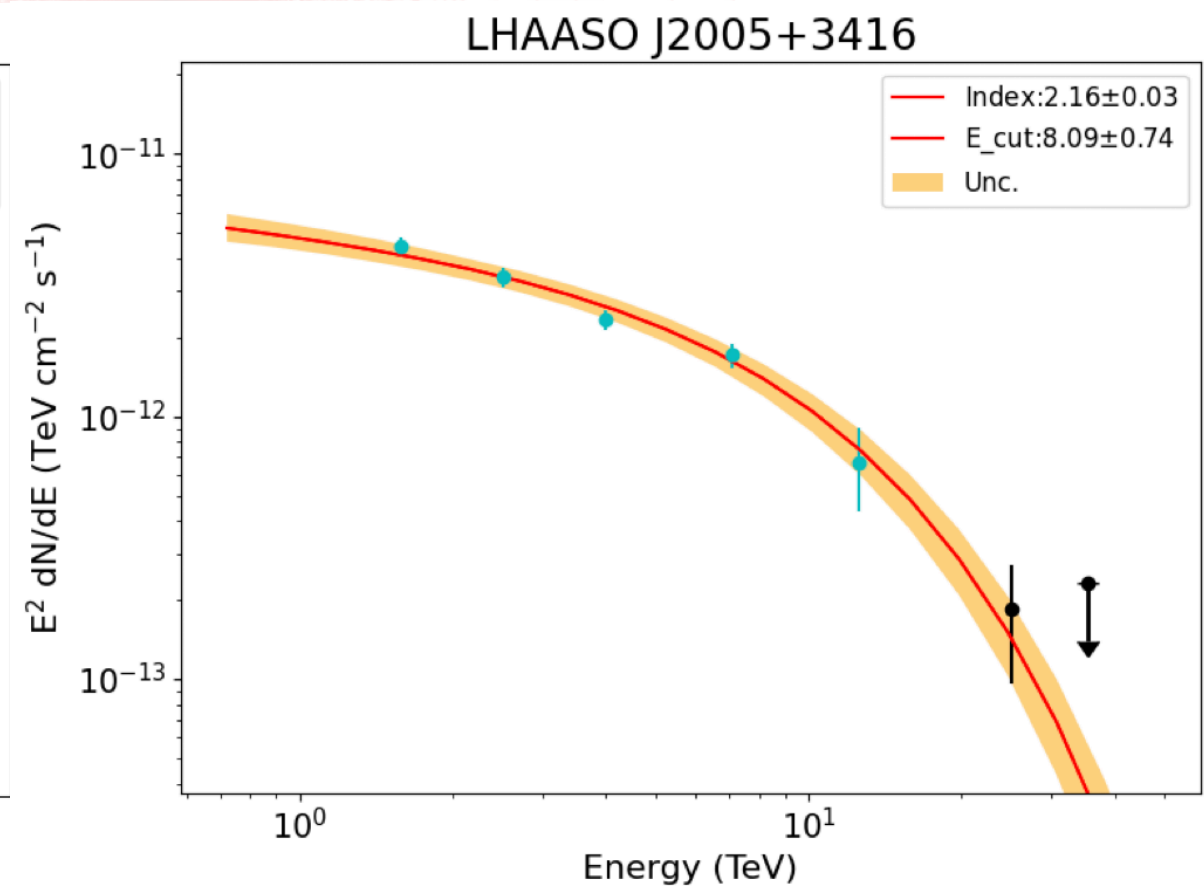
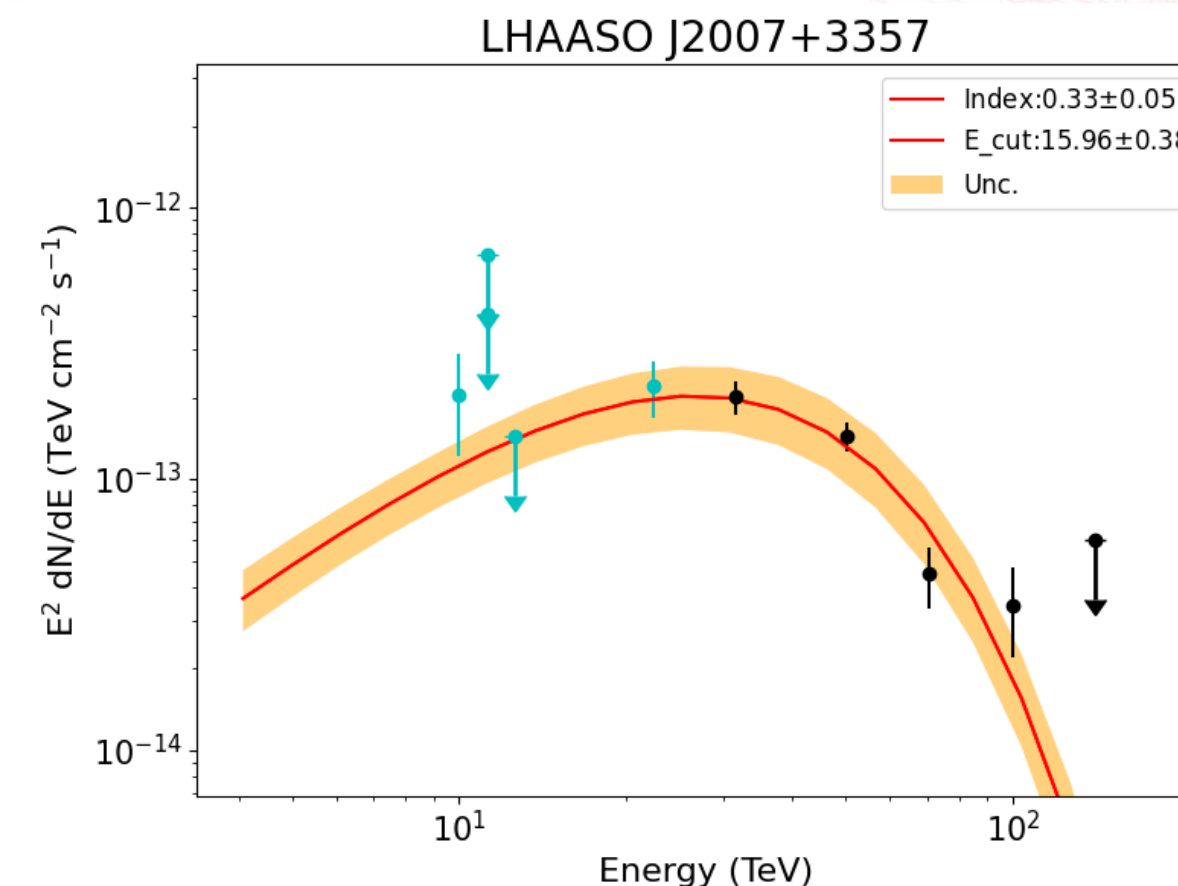
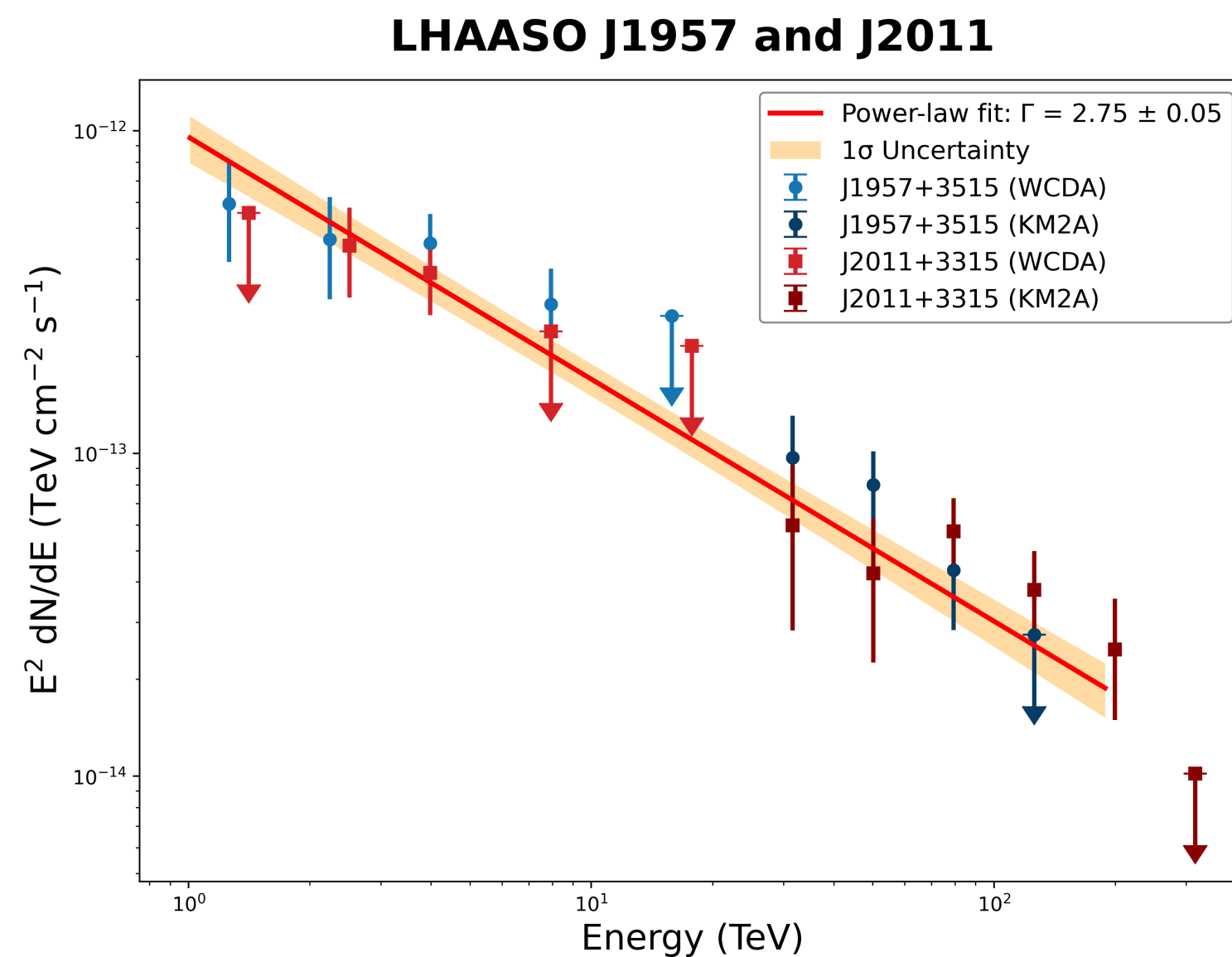
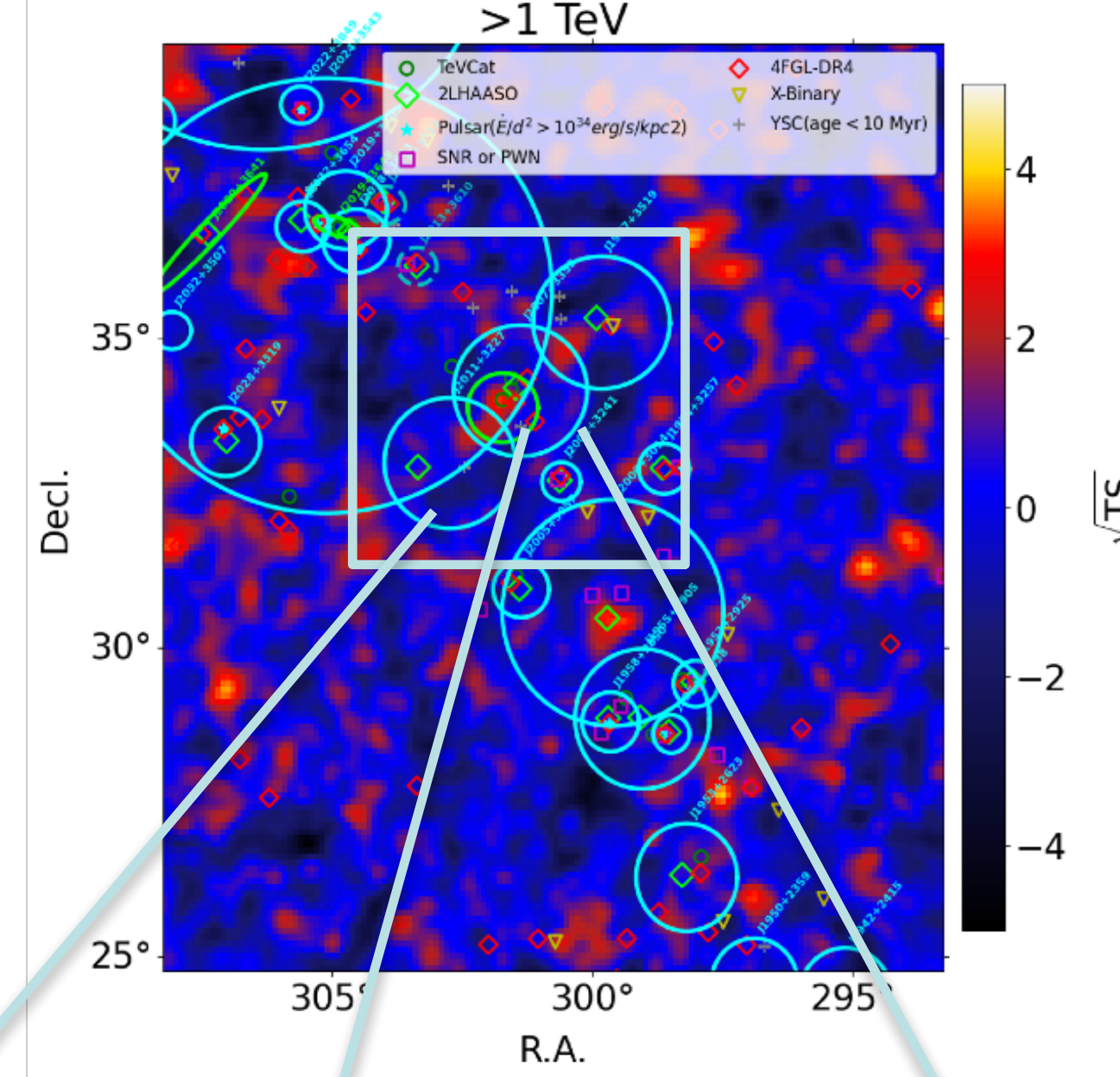
研究内容1：强子源中的粒子逃逸

- 最亮的扩展源之一J1908 (胡世聪's talk)
- SNR W44附近的宇宙线逃逸 (吴含荣's talk)
- J2011+3315 区域长条状的伽马辐射 (李天扬)
- SNR和PWN重叠的J1945区域 (李源、罗宇)



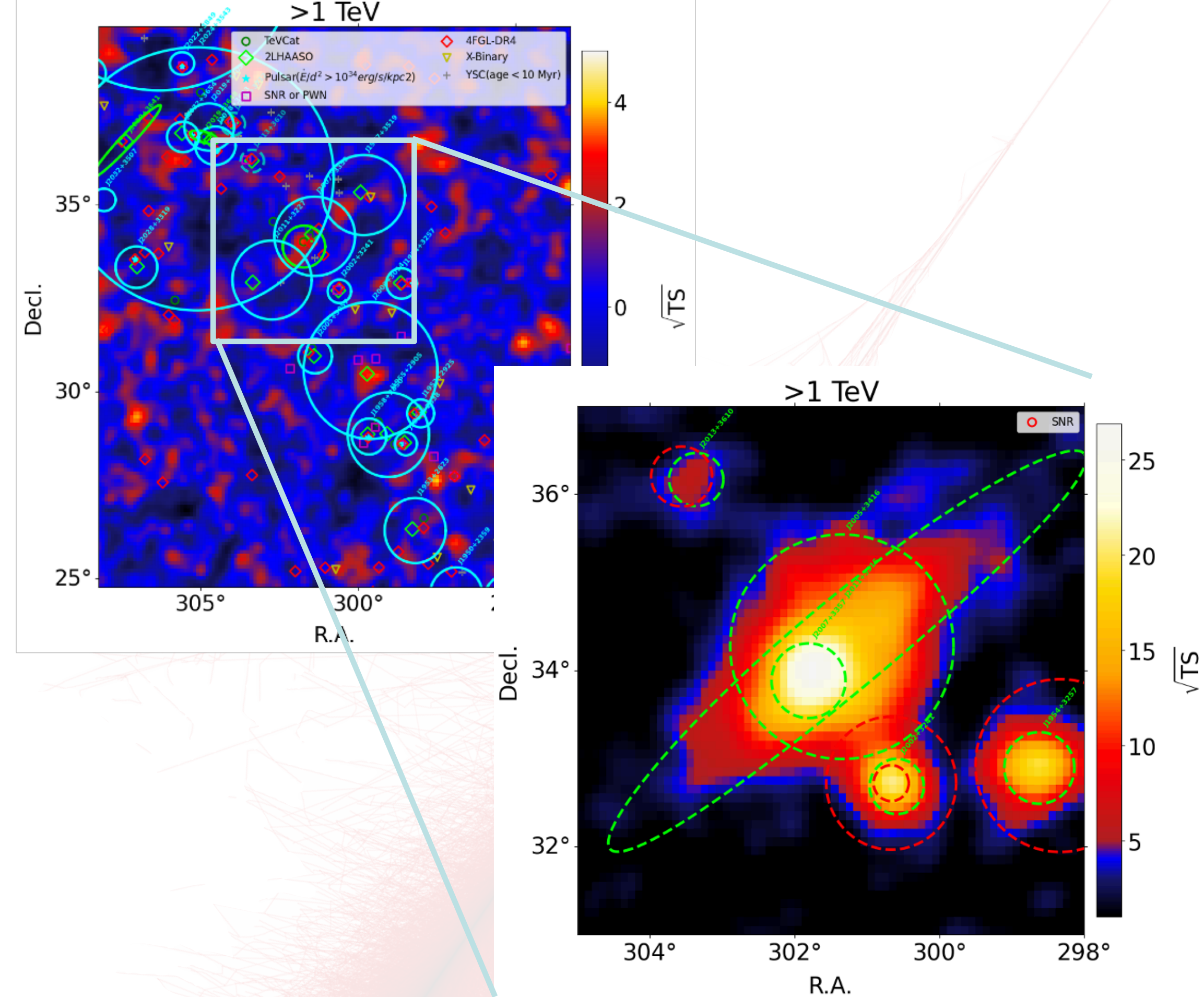
研究内容1：强子源中的粒子逃逸

- 最亮的扩展源之一J1908 (胡世聪's talk)
- SNR W44附近的宇宙线逃逸 (吴含荣's talk)
- J2011+3315 区域长条状的伽马辐射 (李天扬)
- SNR和PWN重叠的J1945区域 (李源、罗宇)



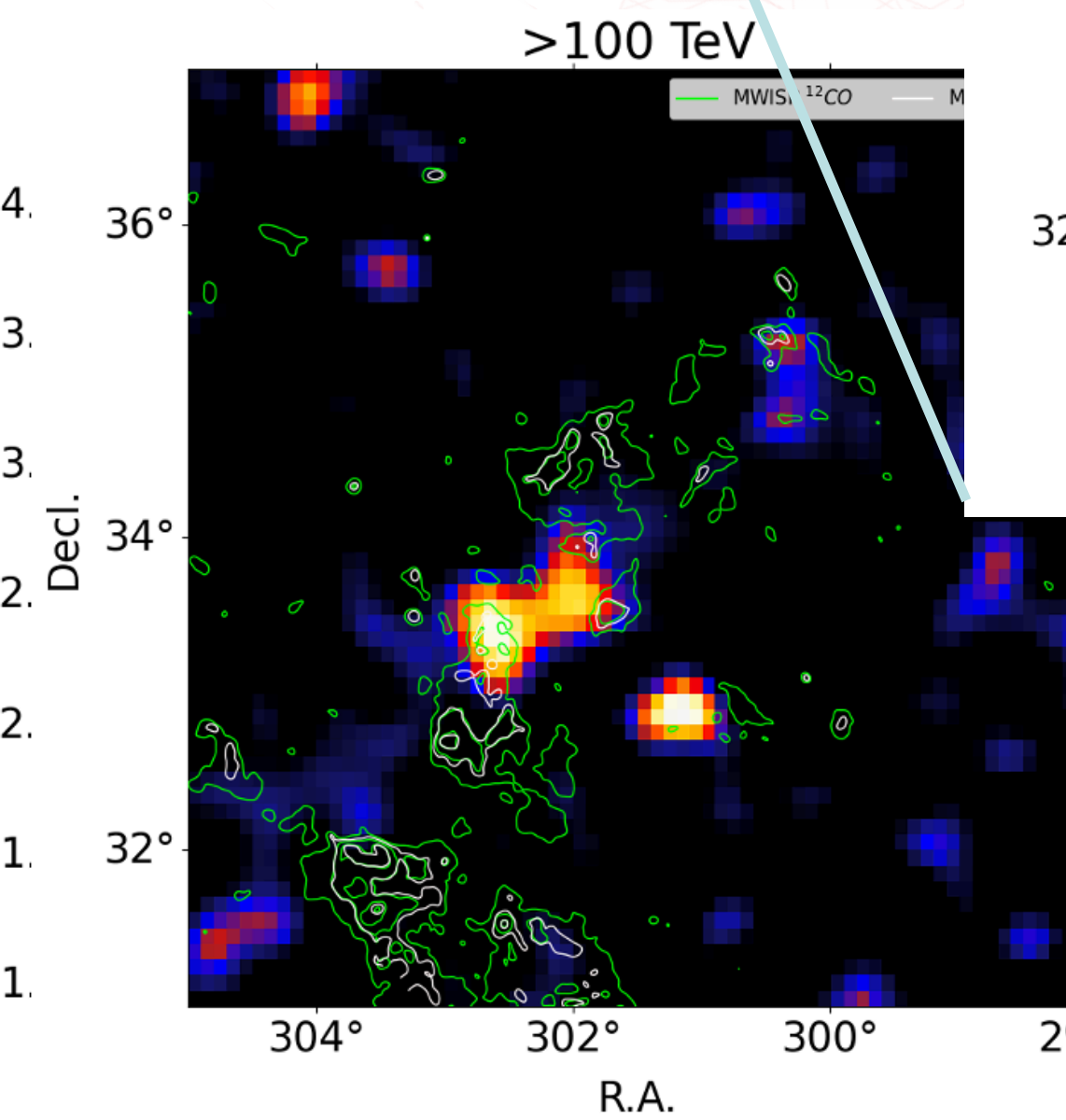
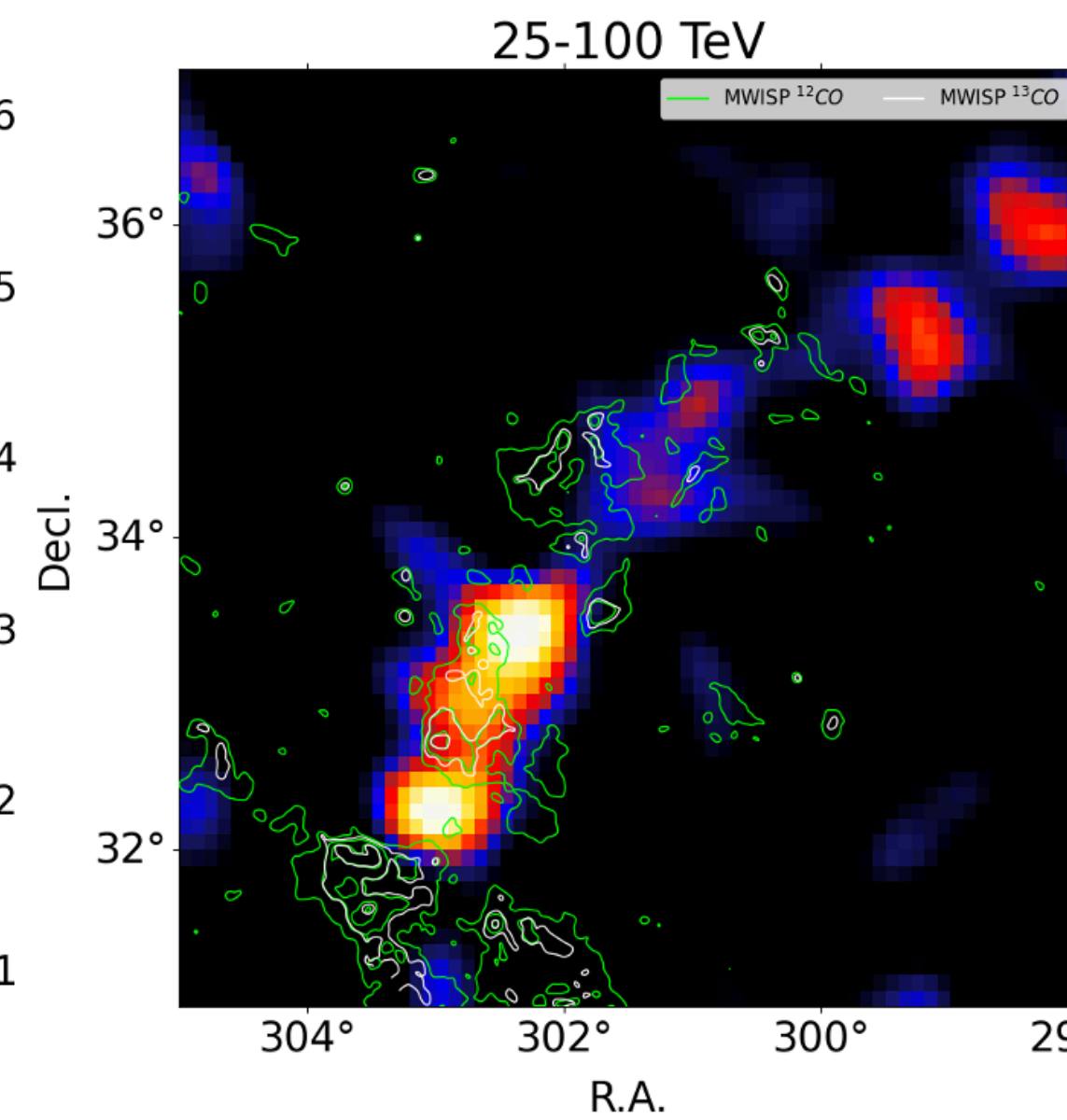
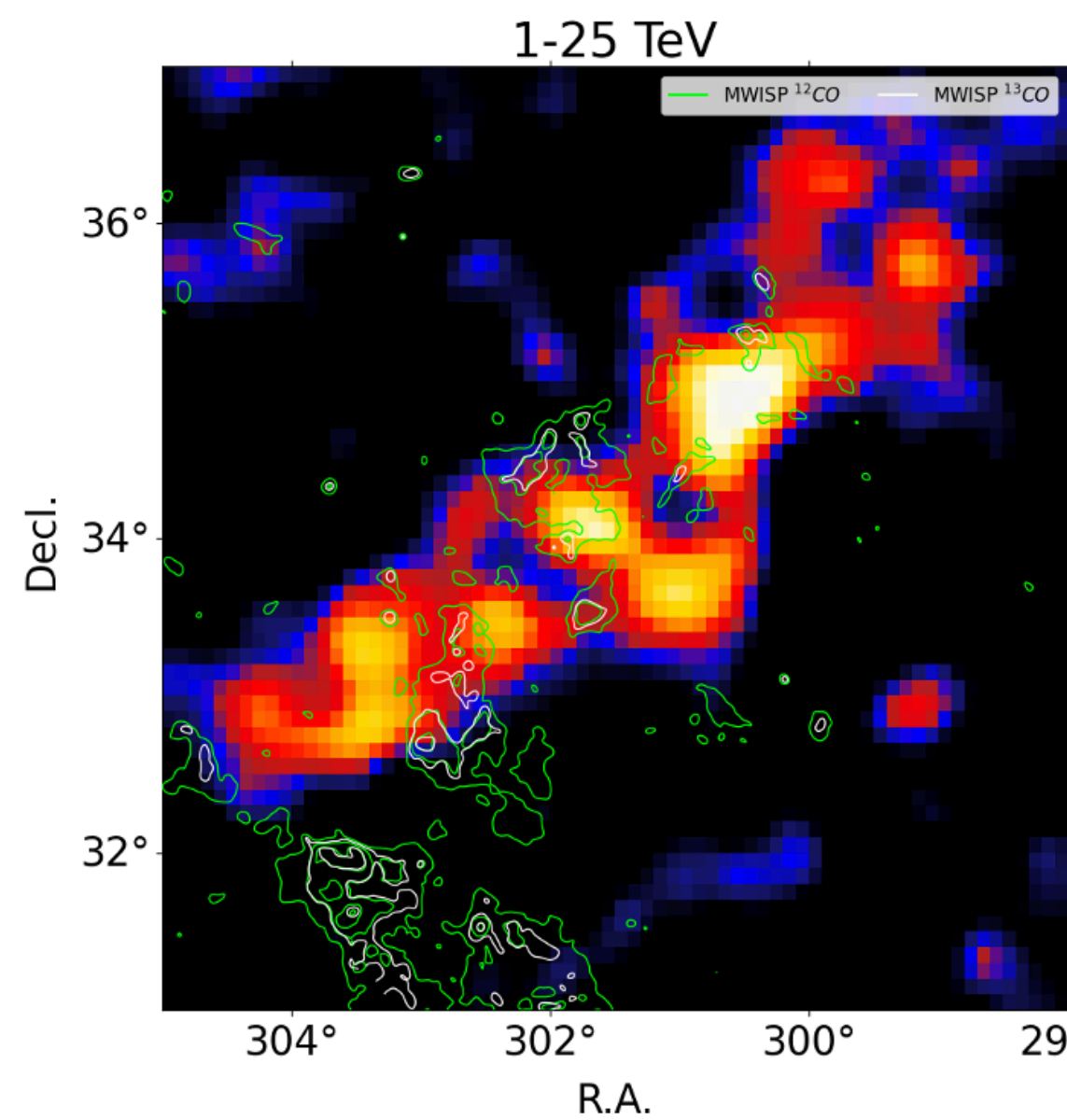
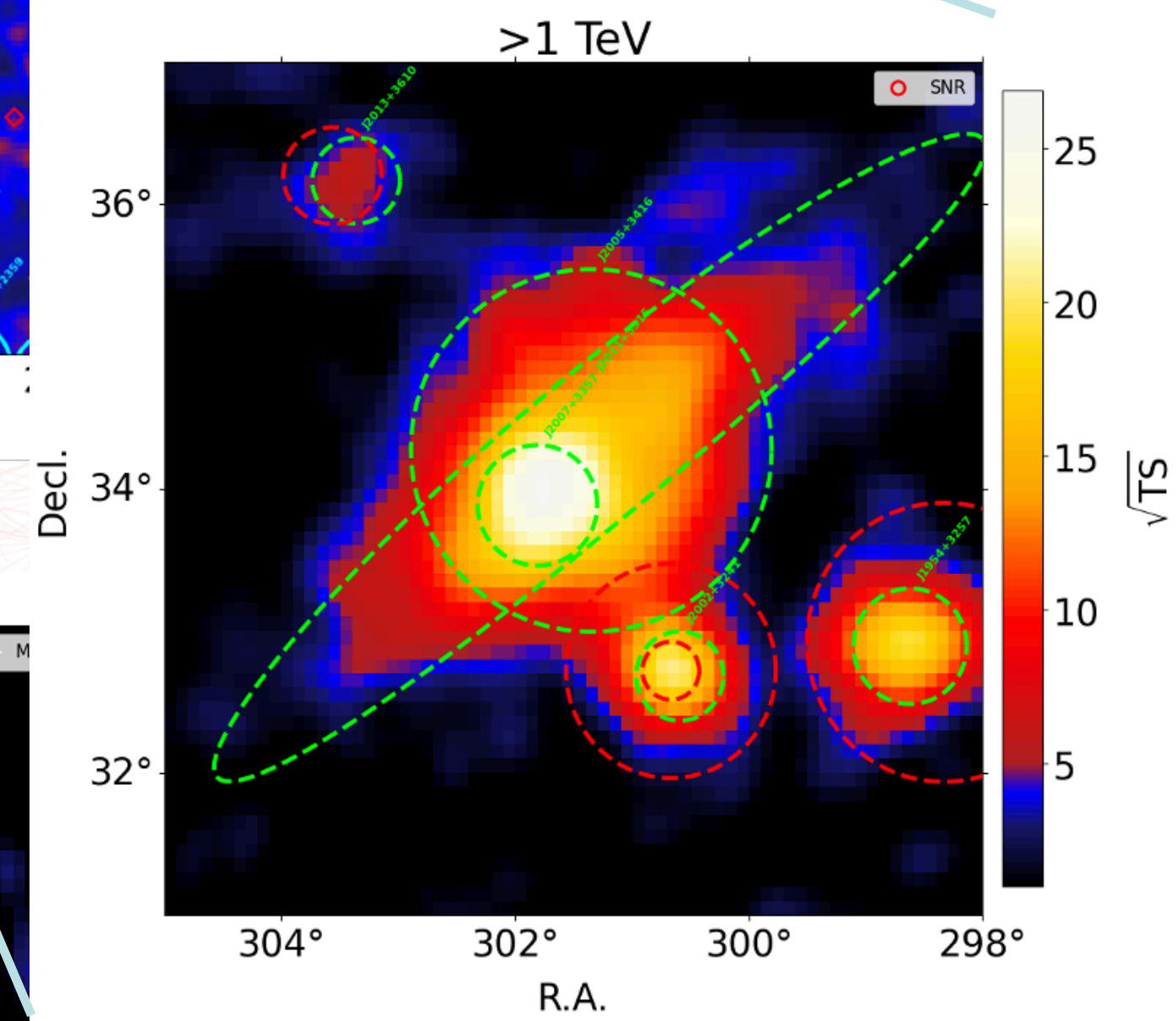
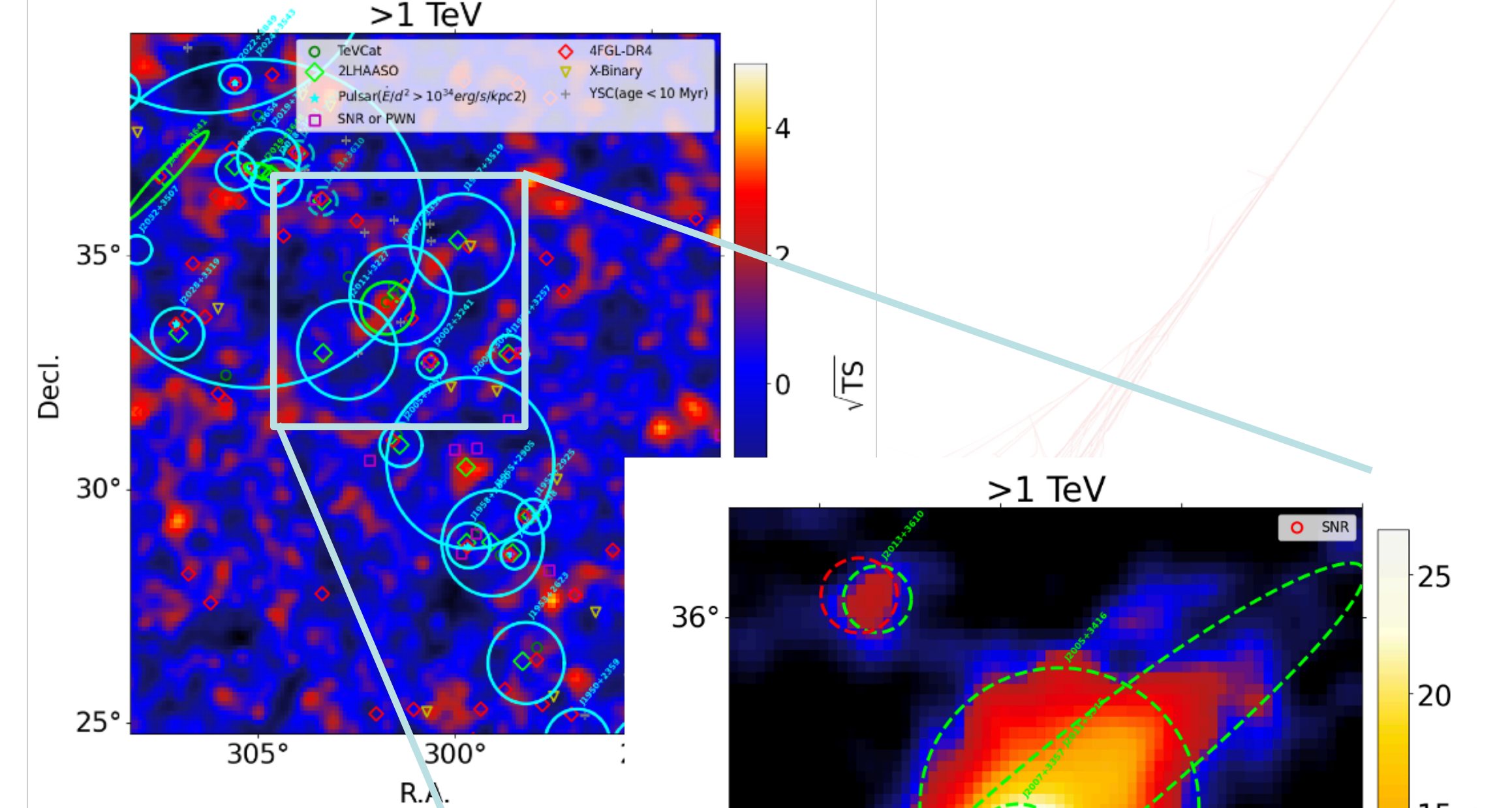
研究内容1：强子源中的粒子逃逸

- 最亮的扩展源之一J1908（胡世聪's talk）
- SNR W44附近的宇宙线逃逸（吴含荣's talk）
- J2011+3315 区域长条状的伽马辐射（李天扬）
- SNR和PWN重叠的J1945区域（李源、罗宇）



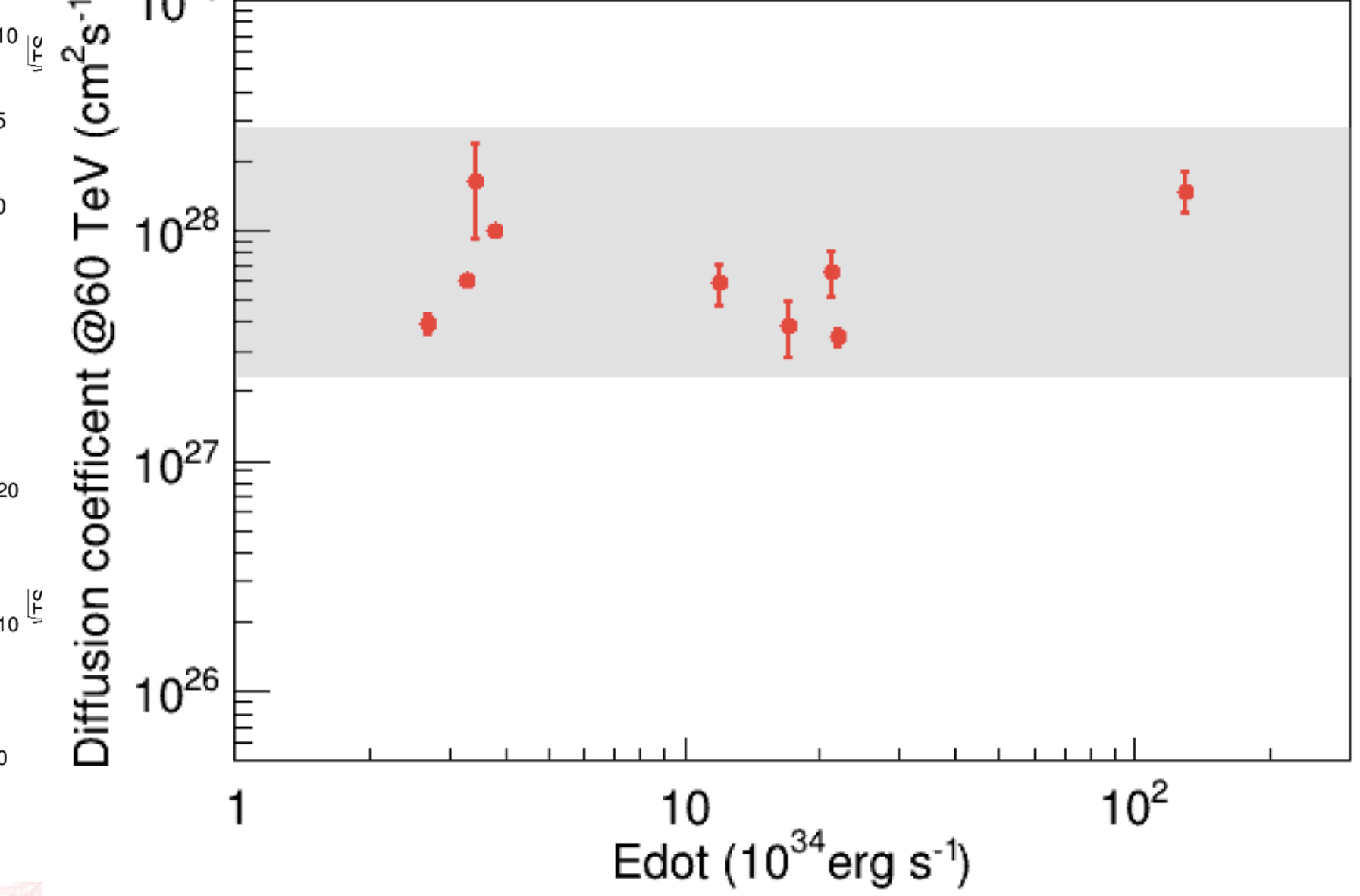
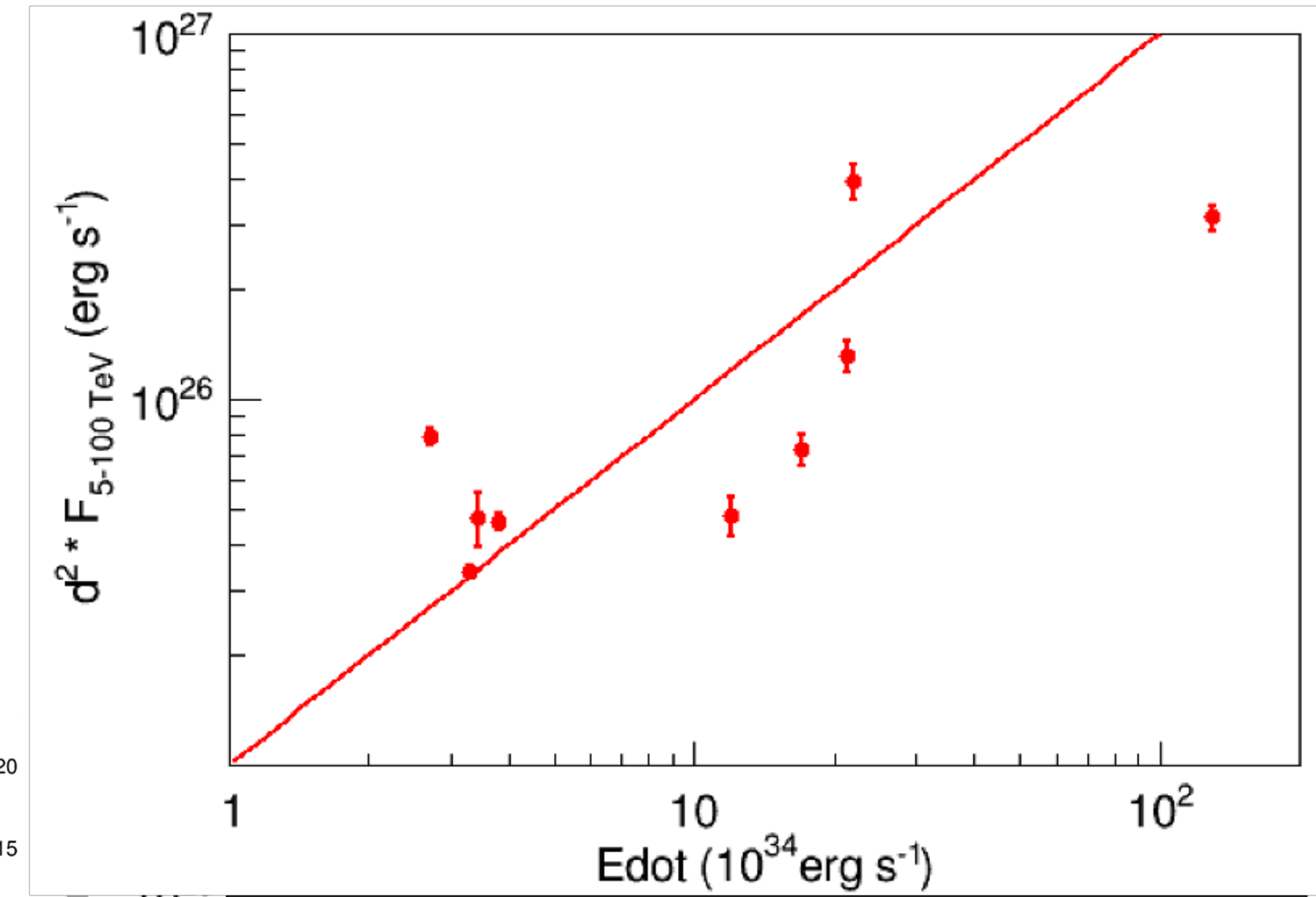
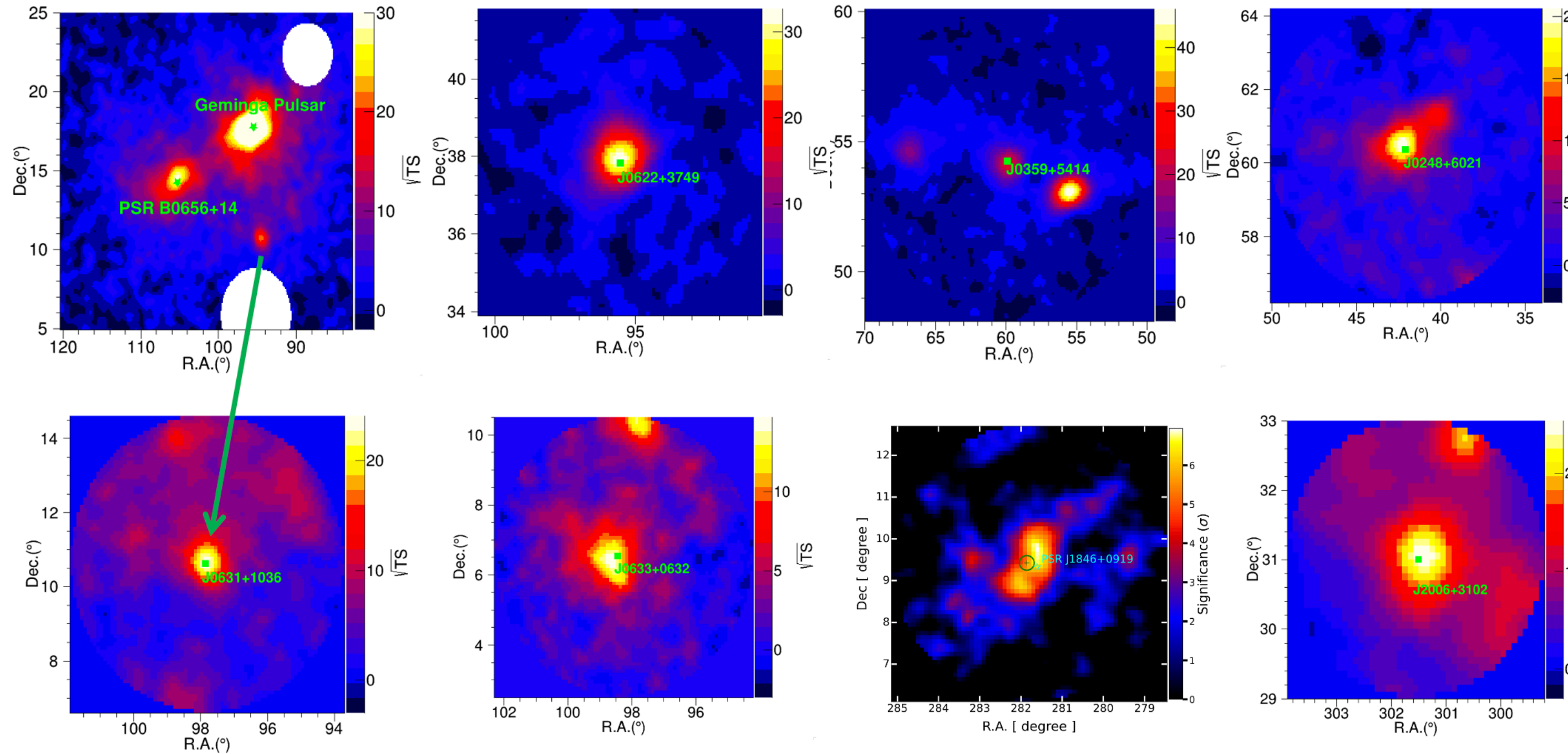
研究内容1：强子源中的粒子逃逸

- 最亮的扩展源之一J1908 (胡世聪's talk)
- SNR W44附近的宇宙线逃逸 (吴含荣's talk)
- J2011+3315 区域长条状的伽马辐射 (李天扬)
- SNR和PWN重叠的J1945区域 (李源、罗宇)



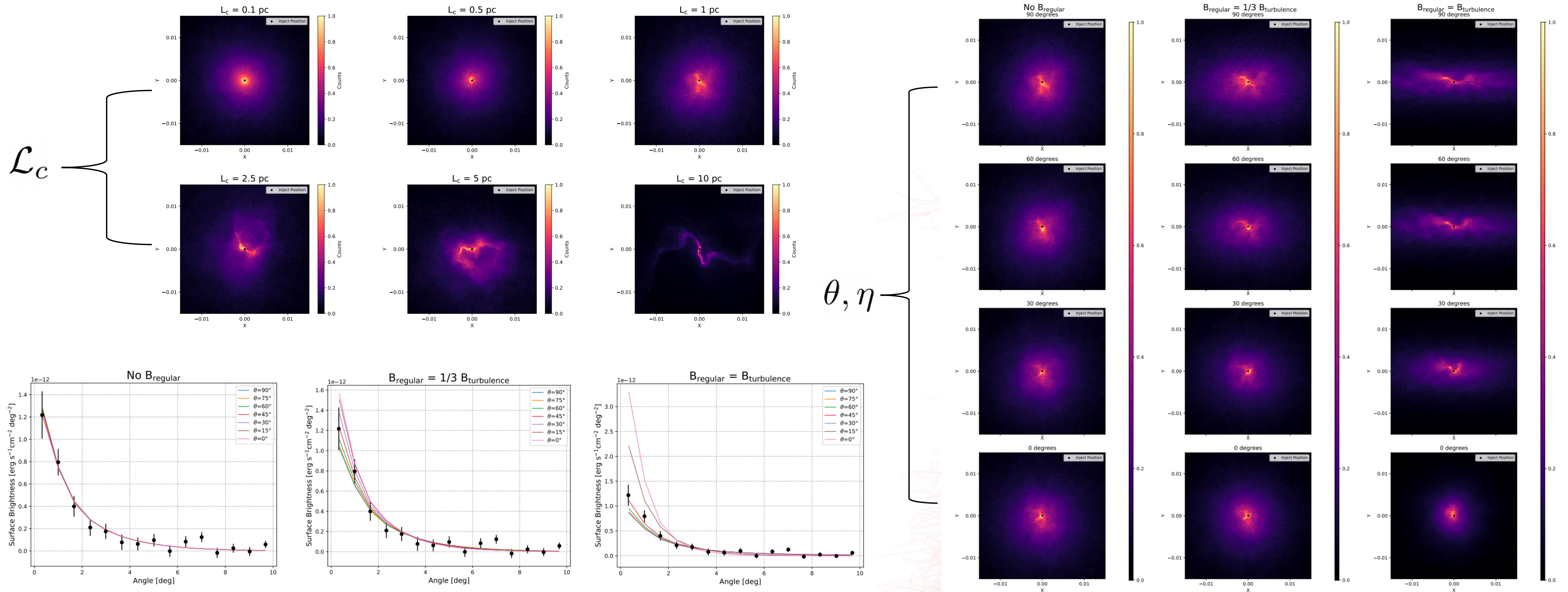
研究内容2: Population Studies

- High-b pulsar halos catalog (陈恩生's talk)
- Pulsar halos around MSPs (张鸿飞)
- PWN/pulsar halo catalog (席绍强、罗宇)



研究内容3: asymmetry of pulsar halos

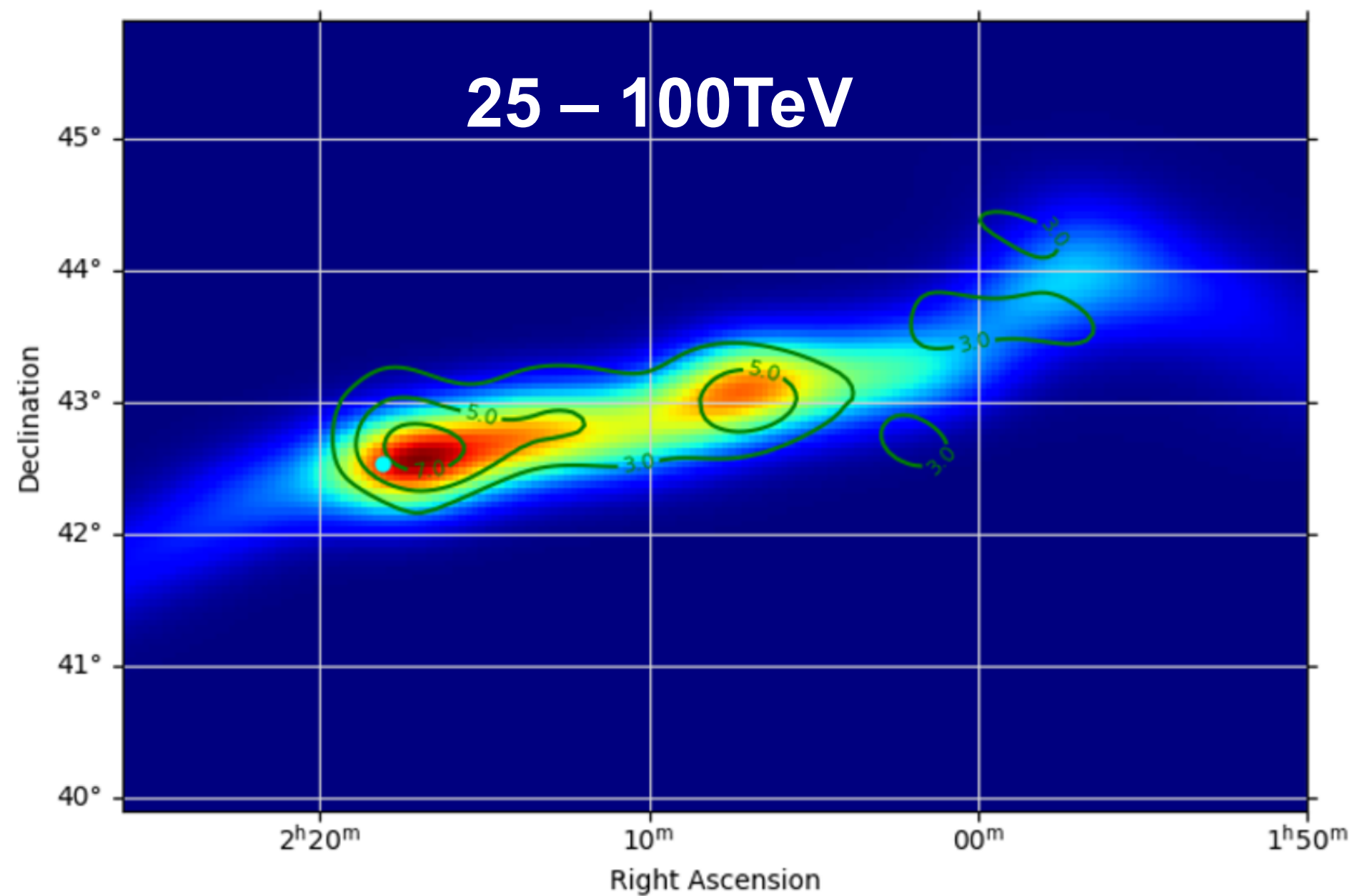
Simulated parameters space $\{\mathcal{L}_c, B_{\text{tot}}, \theta, \eta, \mathcal{P}(k)\}$



研究内容3: the "Mirage" effect

A "Peanut" in simulations:

(8192 particles)



Our Peanut fitting parameters:

$$L_c = 267 \text{ pc}$$

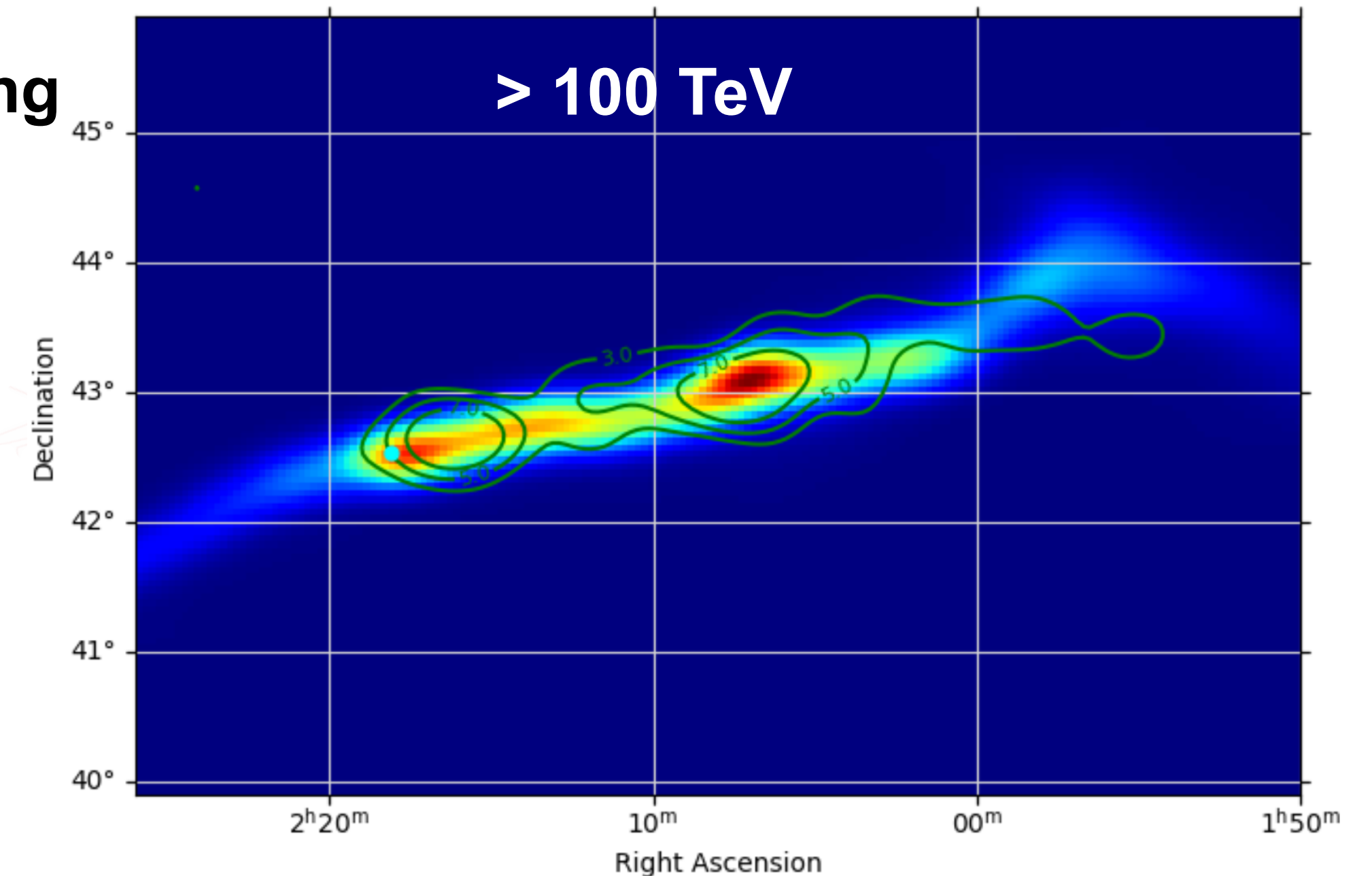
$$B_{\text{reg}} = 1.16 \mu\text{G}$$

$$B_{\text{turb}} = 0.95 \mu\text{G}$$

Kolmogorov

$$\alpha = 2.2$$

$$E_{\text{cut}} = 1 \text{ PeV}$$



Assumptions here: BSPWN, injection from 180 degree

The additional source is a "mirage", where the magnetic field bends inwards/outwards

研究内容3： 延展源相关的理论探讨

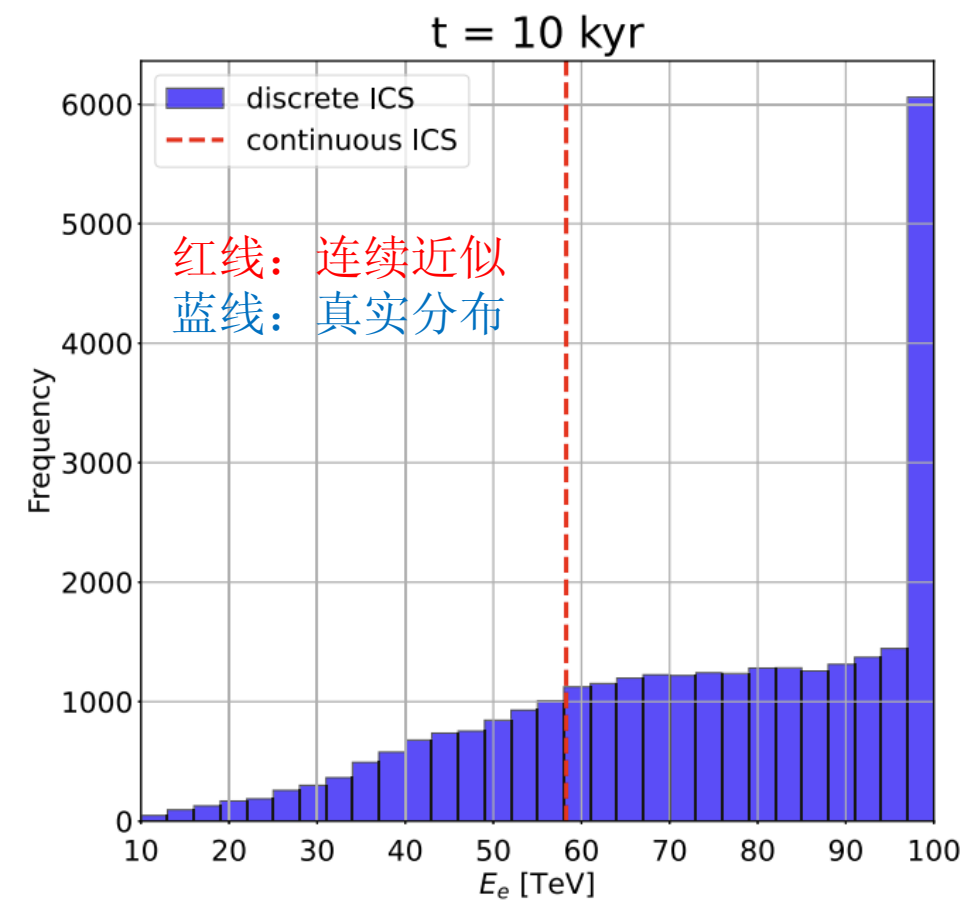
方堃 等

逆康普顿散射的离散属性对高能伽马天文的影响

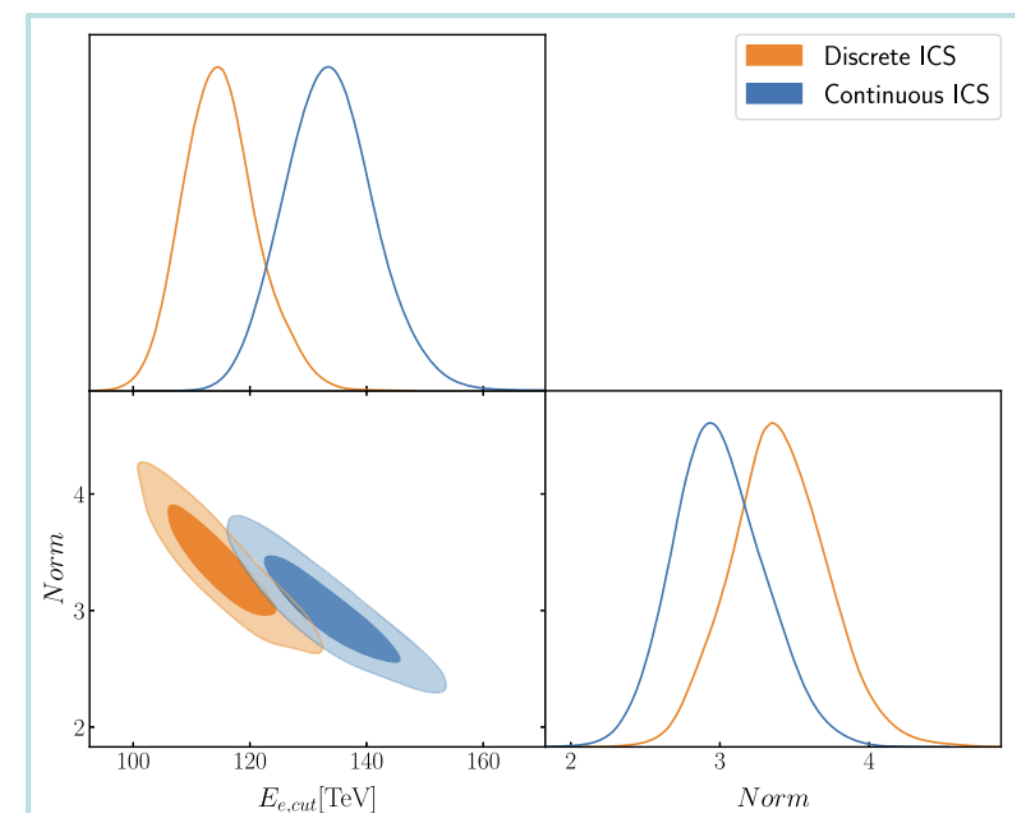
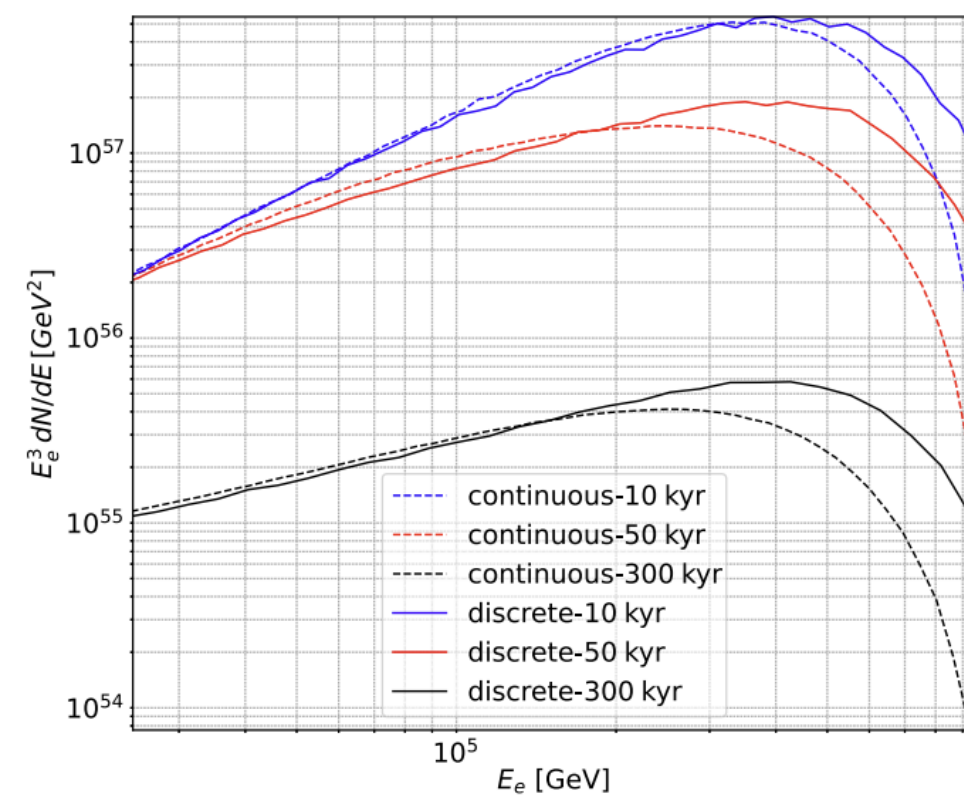
<https://doi.org/10.1103/g41m-jzjf>

Geminga halo电子加速传播过程的统一理解

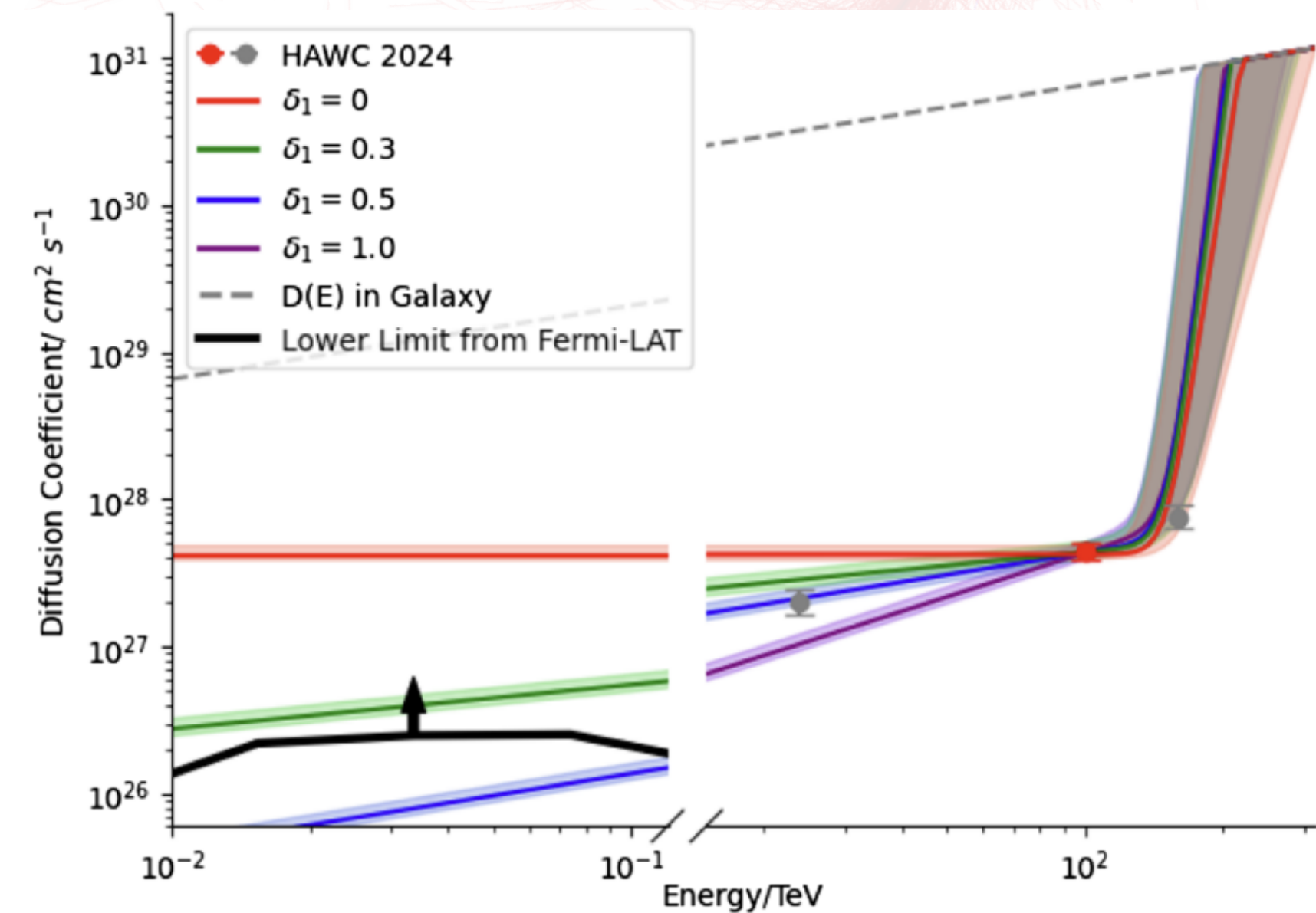
<https://doi.org/10.1103/lyfj-dhly>



- 电子因IC散射的能量损失在绝大多数工作中被视为连续过程，但在 $E \sim 100 \text{ TeV}$ 时不再成立
- IC散射的离散性会使电子和伽马能谱上存在的特征结构（如截断）变得更“宽”
- 该修正对Geminga halo参数有显著影响



- 在加速区，扩散系数与PWN激波上游尺度的关系决定了注入能谱的截断→伽马能谱截断
- 在传播区，扩散系数决定了pulsar halo的空间分布



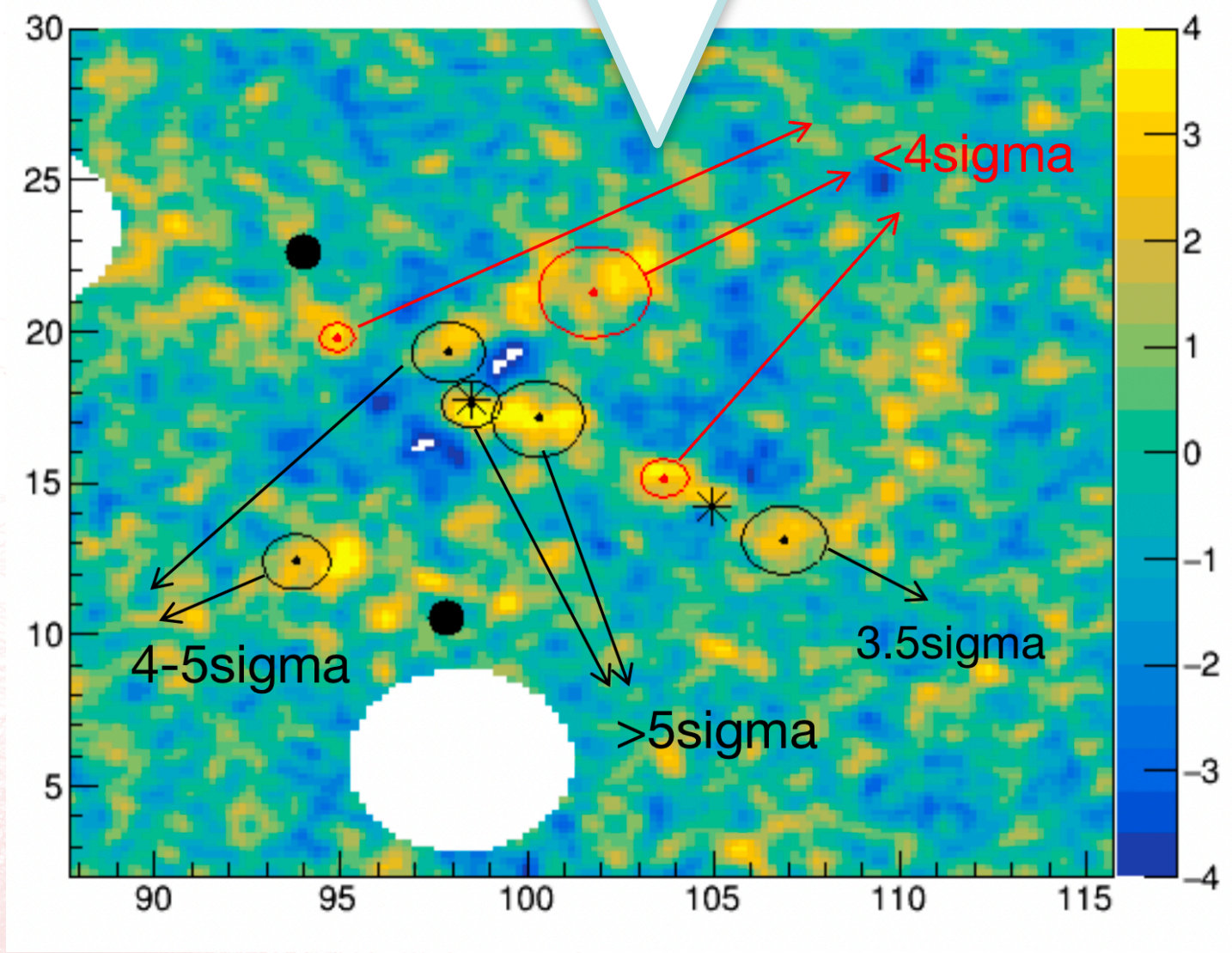
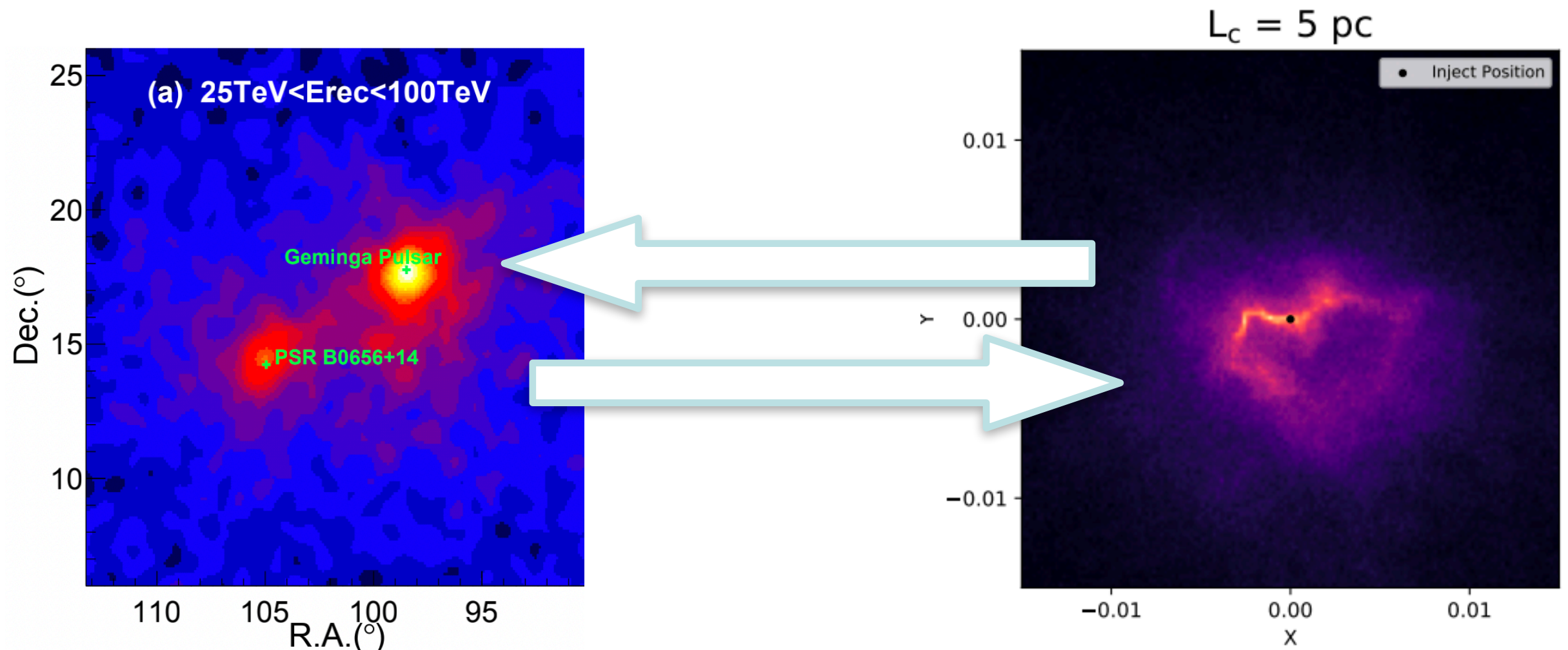
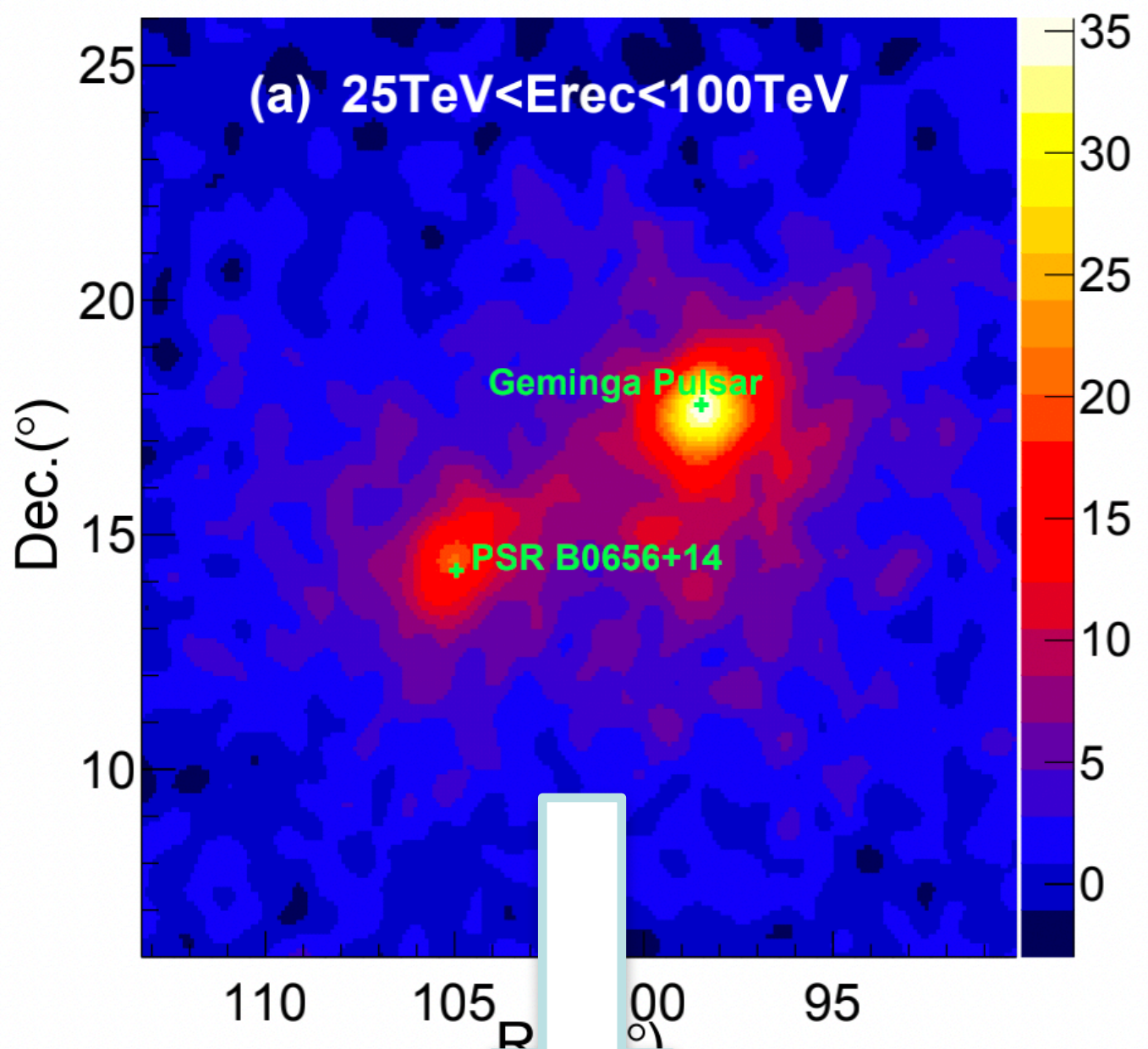
问题与挑战1： 延展源复杂形态的分析

- 多源拟合中新加入的源是真实的吗?
- 源的不规则形态如何定义

张鸿飞、包逸炜等

Example: using AI tools to study Geminga's morphology and constrain the physical parameters

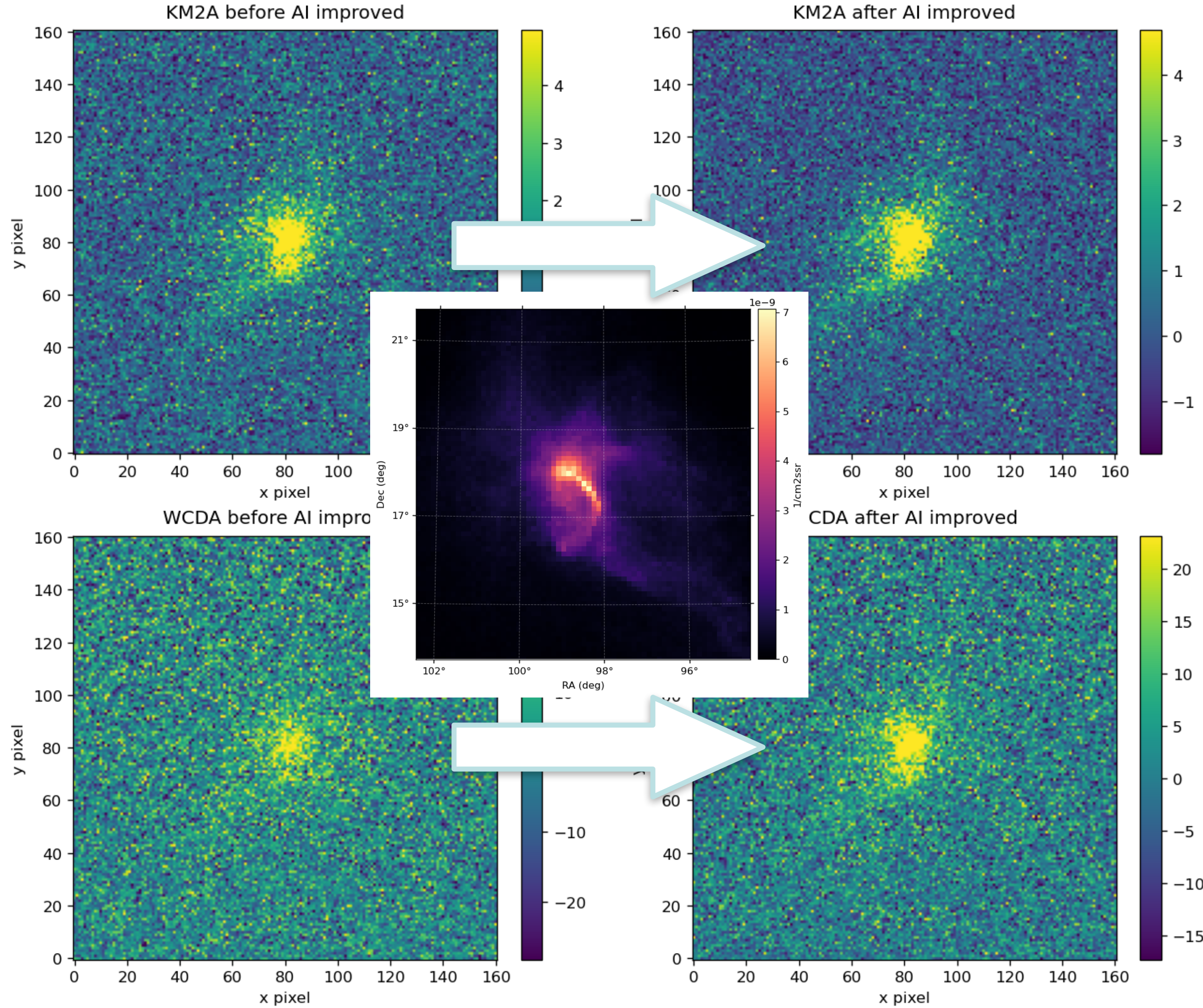
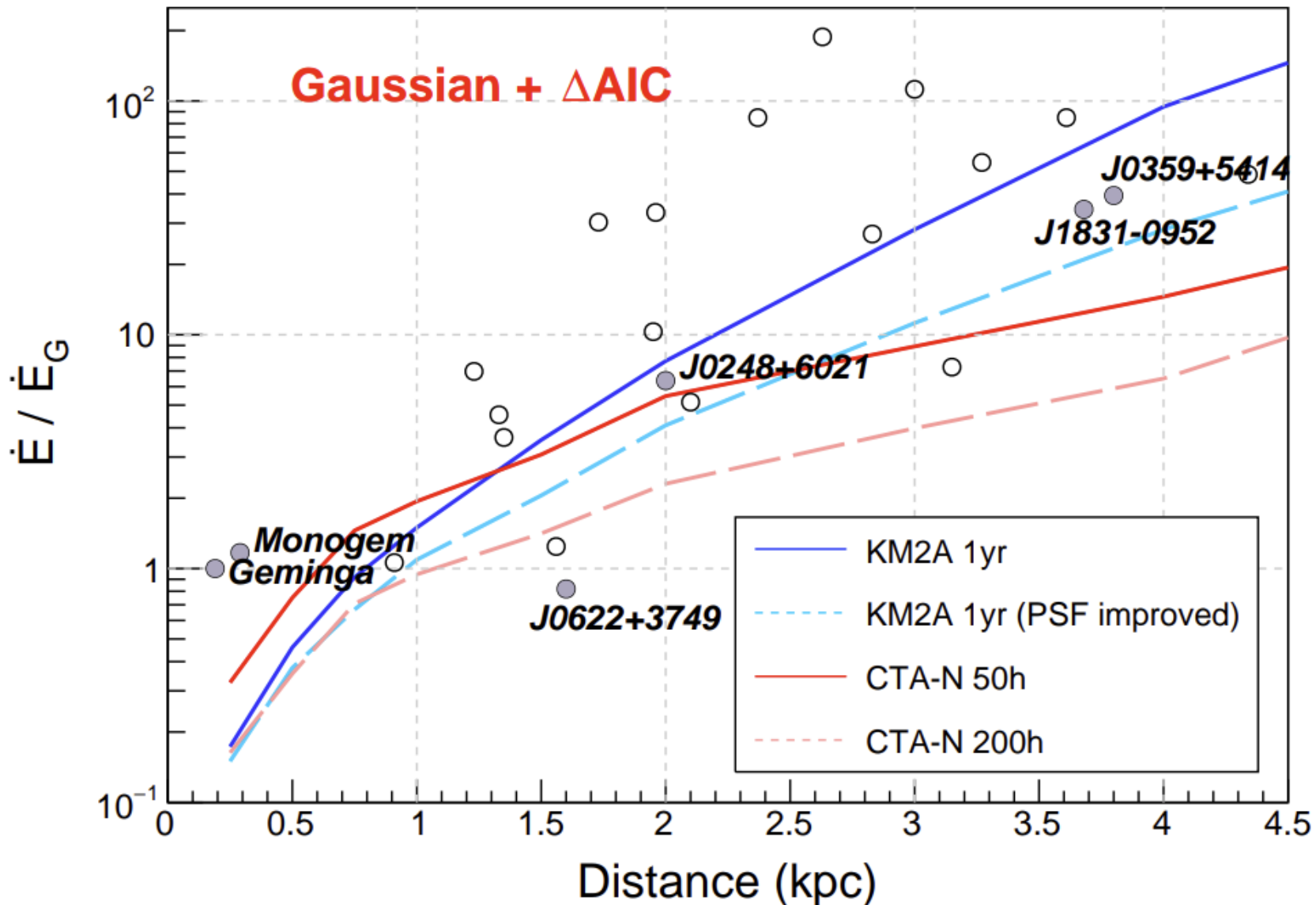
Similar work has been done in other fields, see Buck et al. (2021), Gucht et al.(2020), Bialopetravičius et al.(2019)



问题与挑战2: AI优化的重建带来的机会

地面实验对Pulsar halo形态特征分辨的预期
<https://doi.org/10.1088/1674-1137/ae74bd>

- 若KM2A的空间分辨能力提升40%，将能够对目前多个pulsar halo候选者的形态特征进行提取
- 评估了CTA成功提取pulsar halo形态特征所需要的曝光时间



报告小结

基于LHAASO延展伽马射线源的研究，本课题：

- (1) **精确测量**潜在宇宙线加速源附近的**延展伽马射线辐射**，在越来越多源中看到了能量依赖、非对称形态等特征
- (2) 观测到脉冲星晕和强子源附近的**宇宙线逃逸** (DA495, W44)
- (3) 将进一步推进对Geminga、J1908、J1825几个重要且复杂扩展源的分析，并逐目标的开展数值模拟，以形成自洽模型。