



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

LHAASO研究成果报告

陈松战

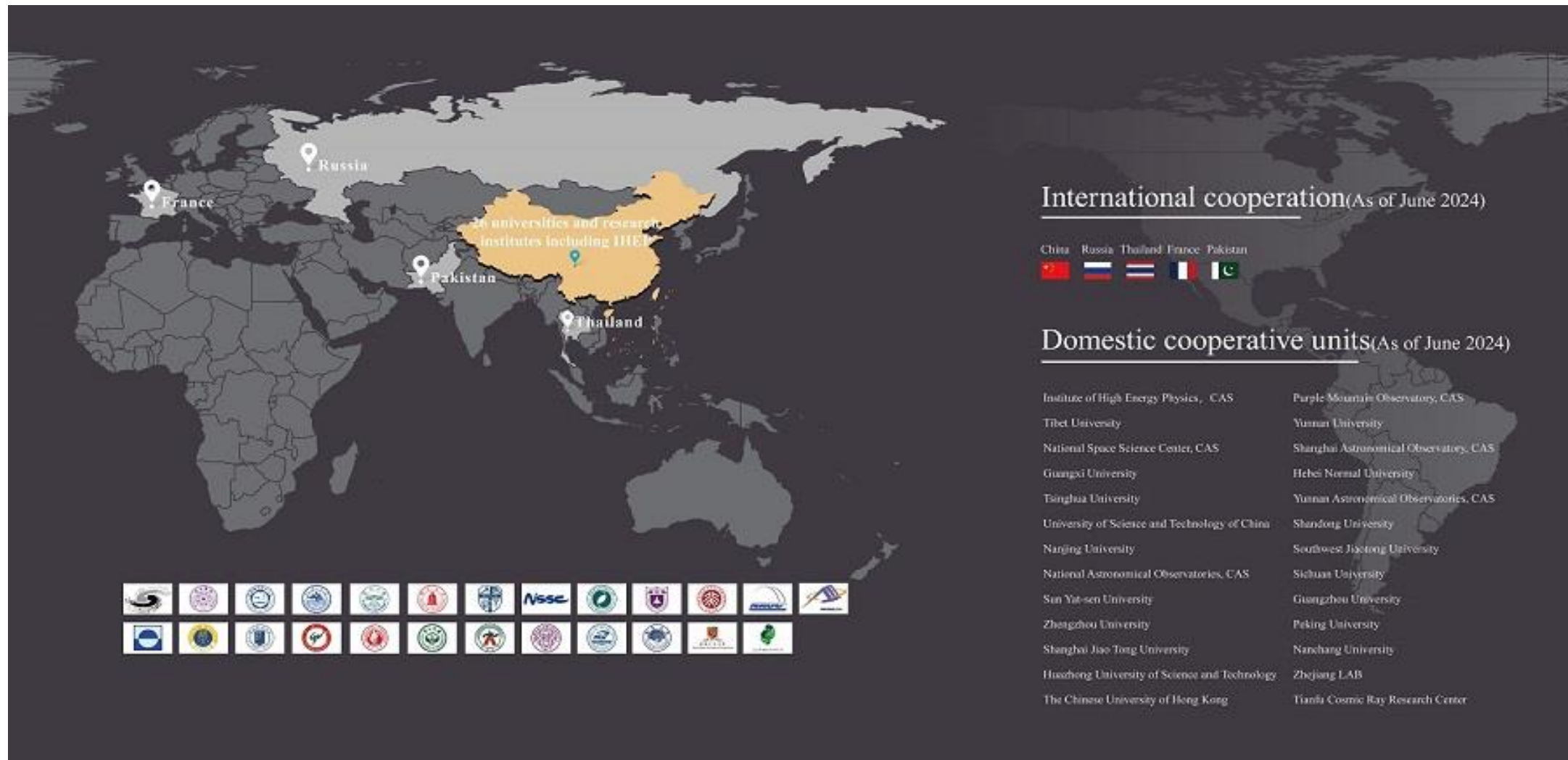
2024.8.14@青岛

第十四届全国粒子物理学术会议



LHAASO国际合作组

■ 5个国家，30家国内外高校和研究所，298名科研人员

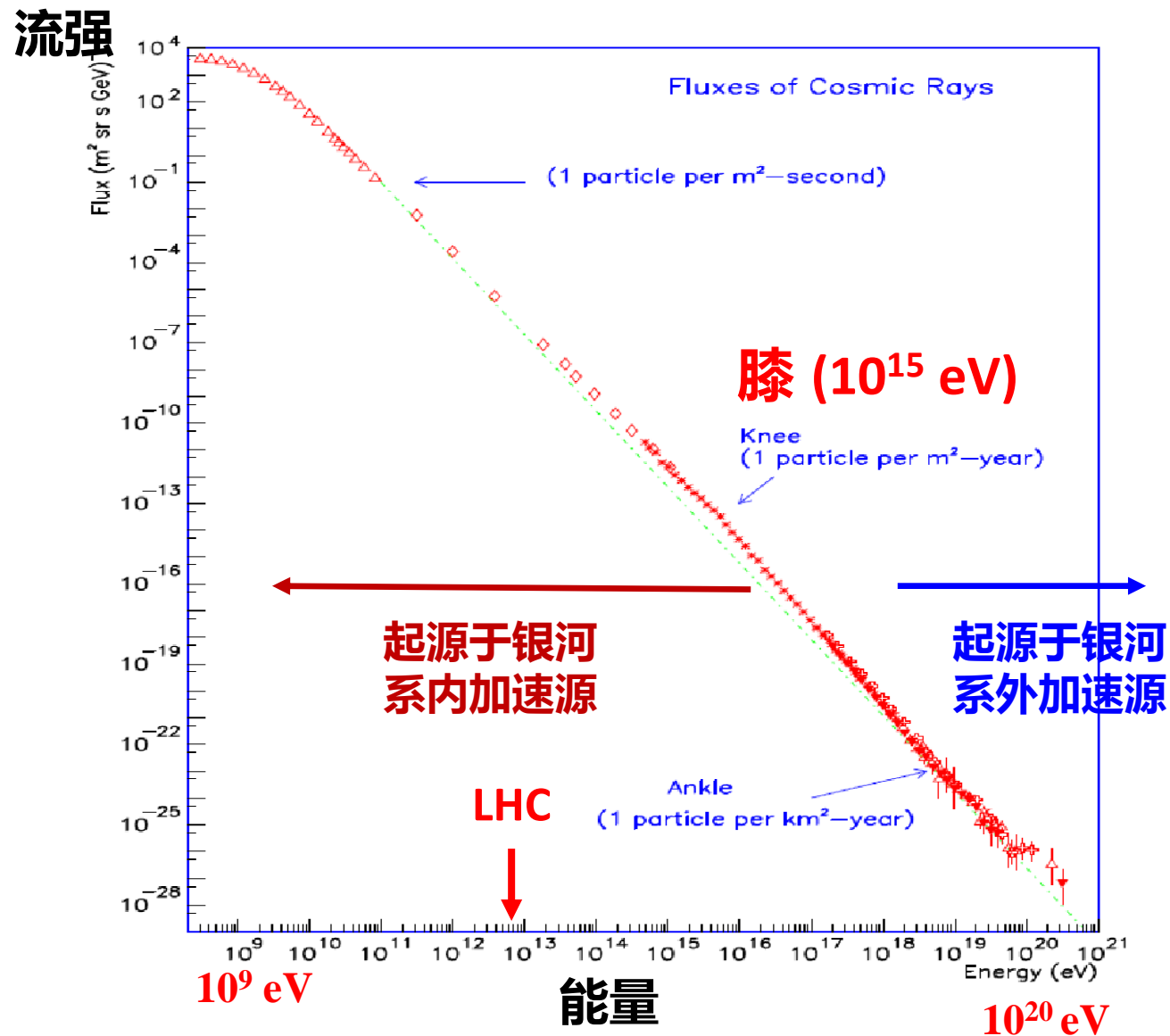




一、引言

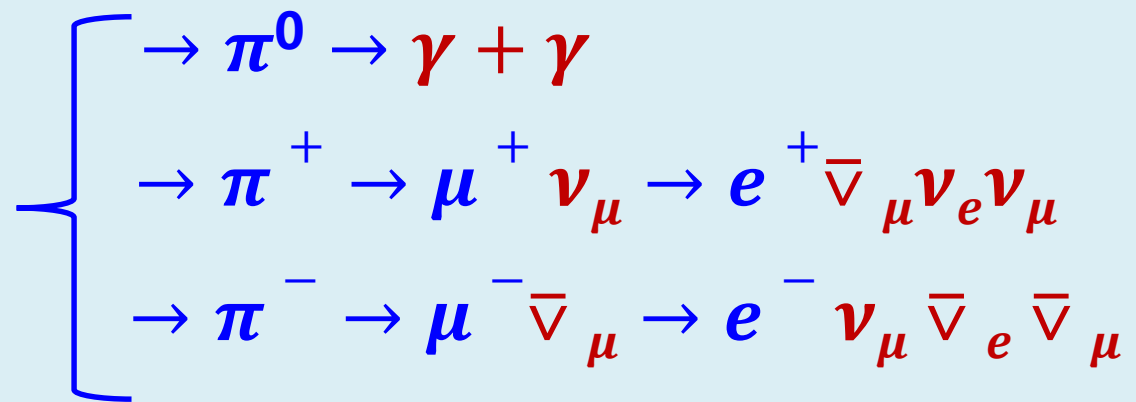
宇宙线

- 1912年发现宇宙线
- 宇宙线是来自外太空的高能带电粒子，宇宙基本组成一部分
- 宇宙线最高能量是人造加速器——LHC加速最高粒子能量的一千万倍
- 宇宙线起源仍是未解之谜



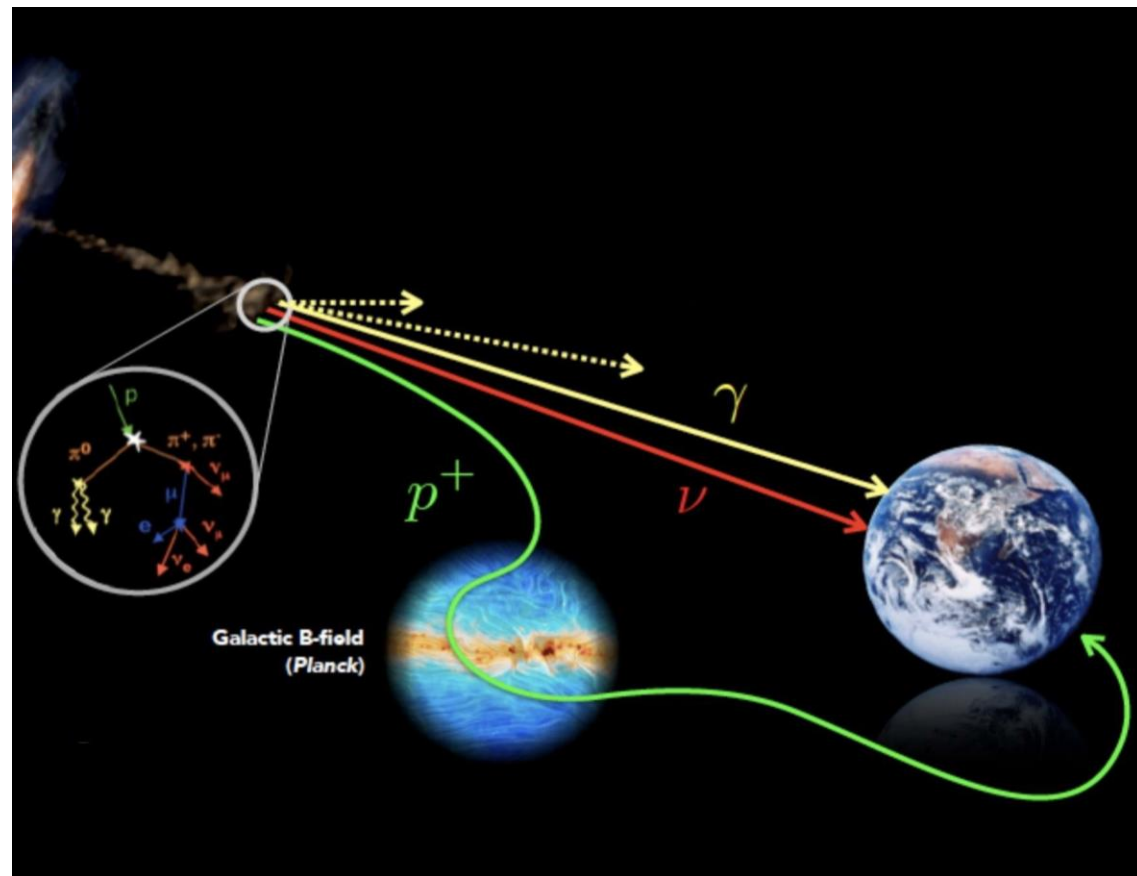
宇宙线起源研究的三个重要方向

$P(\text{宇宙线}) + P(\text{介质气体})$



极高能宇宙线的拉莫半径

$$R = \frac{E/E\text{eV}}{B/nG} \text{ Mpc}$$

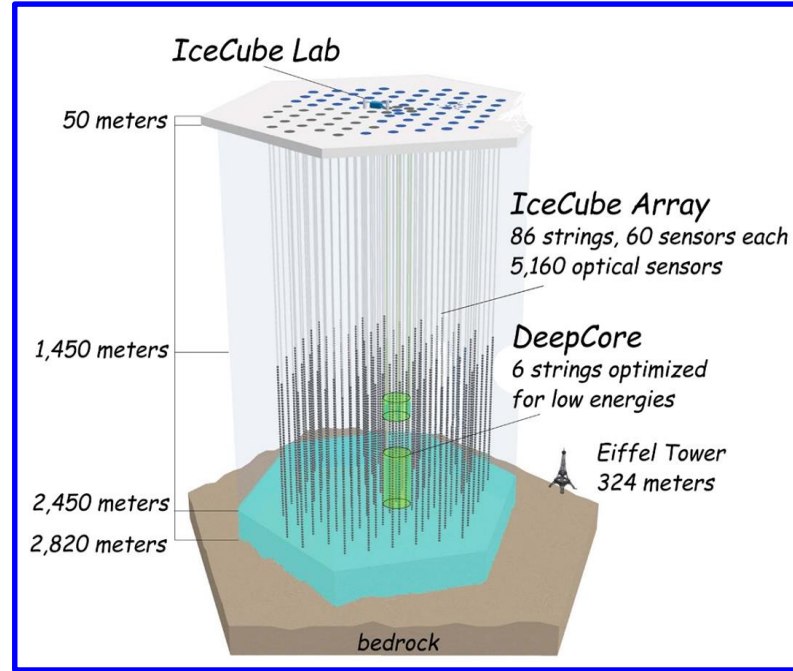
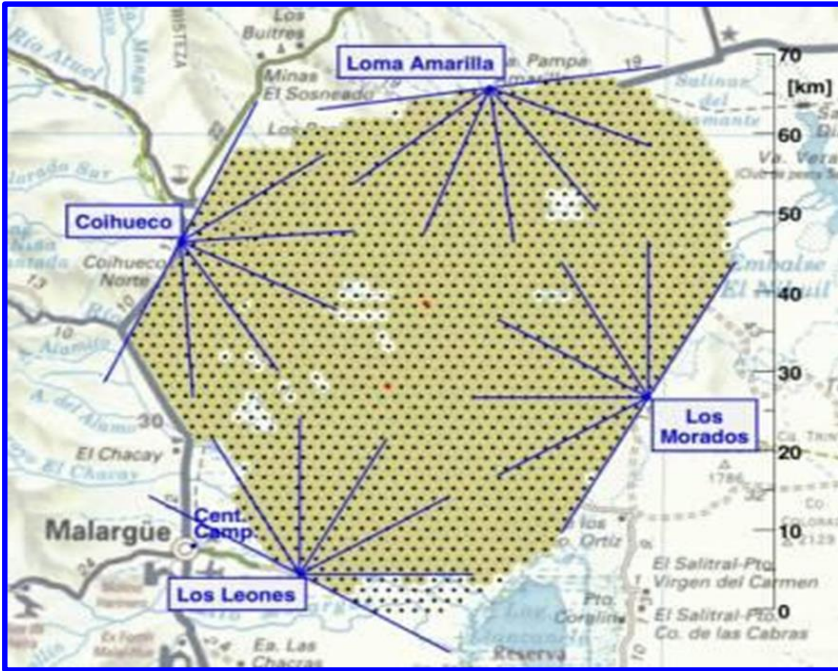


三个支柱实验

极高能宇宙线天文

高能中微子天文

超高能伽马天文



Pierre Auger
(3000 平方公里)
2006-至今

IceCube
(1 立方公里)
2011-至今

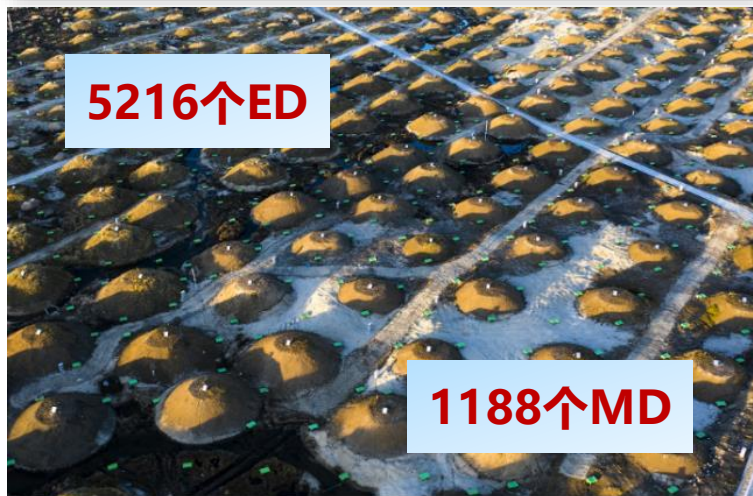
LHAASO
(1.3平方公里)
2021-至今

LHAASO探测器

LHAASO自2019年开始部分运行，2021年7月全部运行！

地面粒子探测器阵列(KM2A)

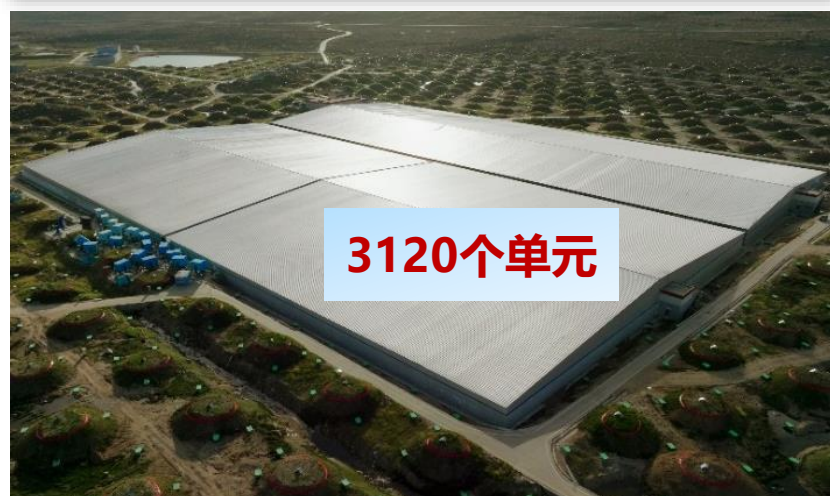
电磁粒子探测器阵列 缪子探测器阵列



最灵敏的超高能伽马探测装置

水切伦科夫探测器阵列

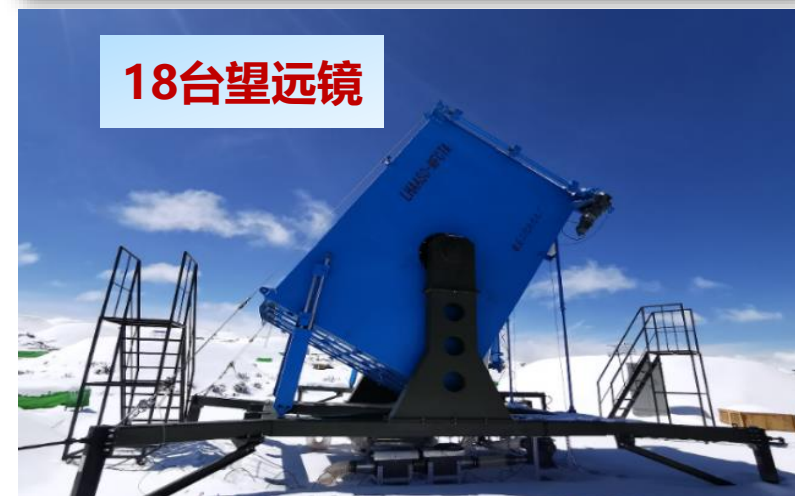
WCDA



最灵敏度的甚高能伽马巡天望远镜

广角切伦科夫望远镜阵列

WFCTA



能量覆盖范围最宽的高能宇宙线复合式立体测量系统

LHAASO达到国际领先水平

高海拔宇宙线观测站国家重大科技基础设施项目国家验收意见

验收委员会认为：LHAASO 充分利用特定地域 4410 米优越的高海拔条件和先进技术优势，建成目前世界上灵敏度最高的超高能伽马射线探测装置和甚高能伽马射线源巡天普查望远镜，以及能量覆盖范围最宽的超高能宇宙线复合式立体测量系统，设施综合性能达到国际领先水平。试运行期

“设施综合性能达到国际领先水平”

“国际粒子天体物理三大实验设施之一”

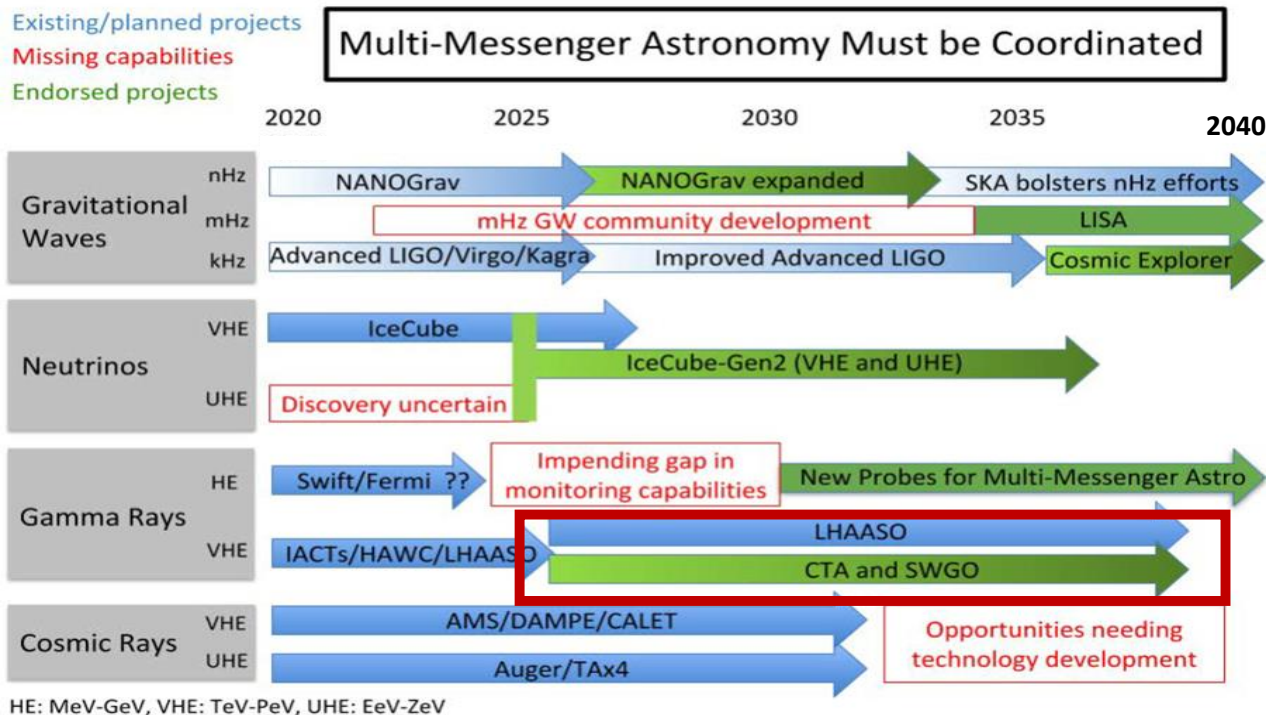
“促进该领域实现重大原创突破、带动前沿交叉相关学科发展”

验收委员会同意该项目通过国家验收。

国家验收委员会主任：

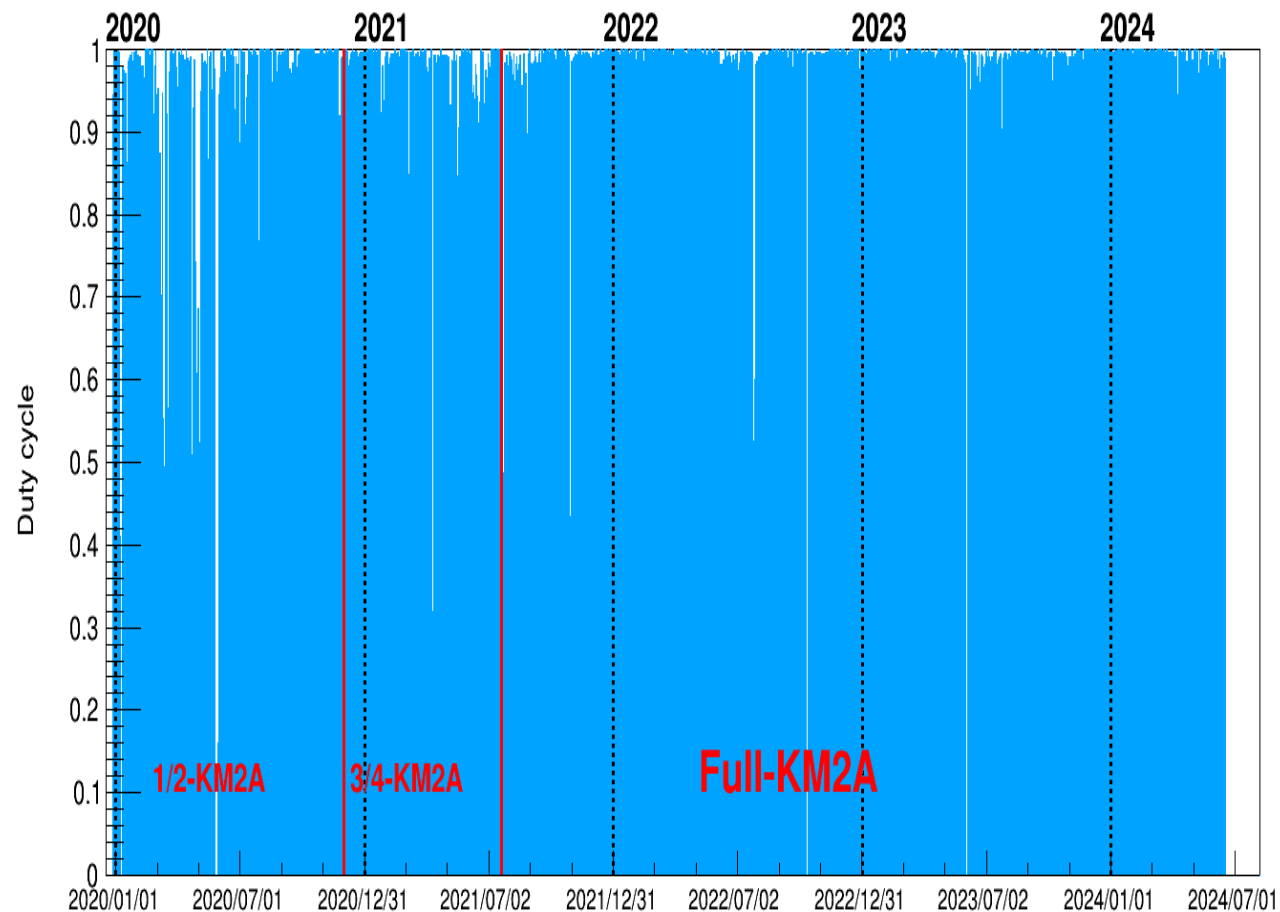
朱建武
2023.5.10
2023年5月10日

美国科学院、工程院、医学院发布题为《通向发现之旅》的天文学中期规划白皮书《Astro-2020》：**拉索**是伽马天文学**国际领先**的实验，未来的10年追赶对象！

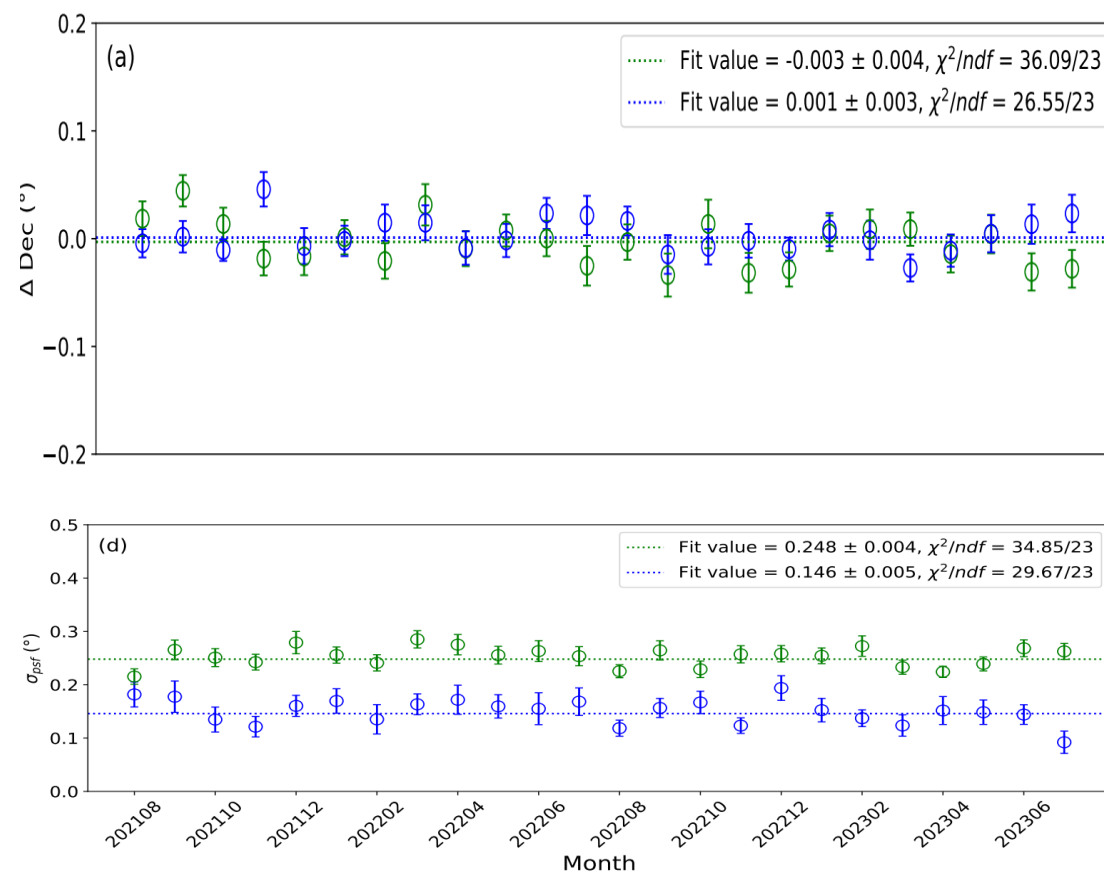


LHAASO长期高质量稳定运行

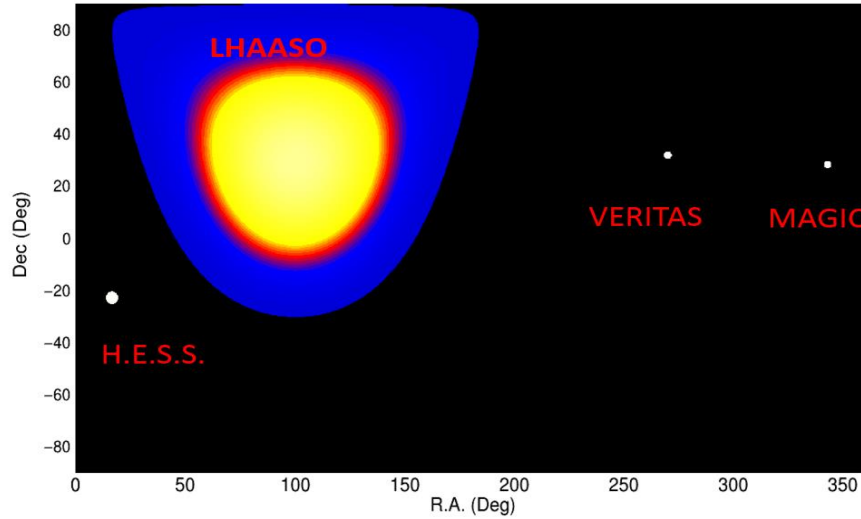
阵列运行时间和探测器良好率均 > 98%



指向精度和角分辨率长期稳定

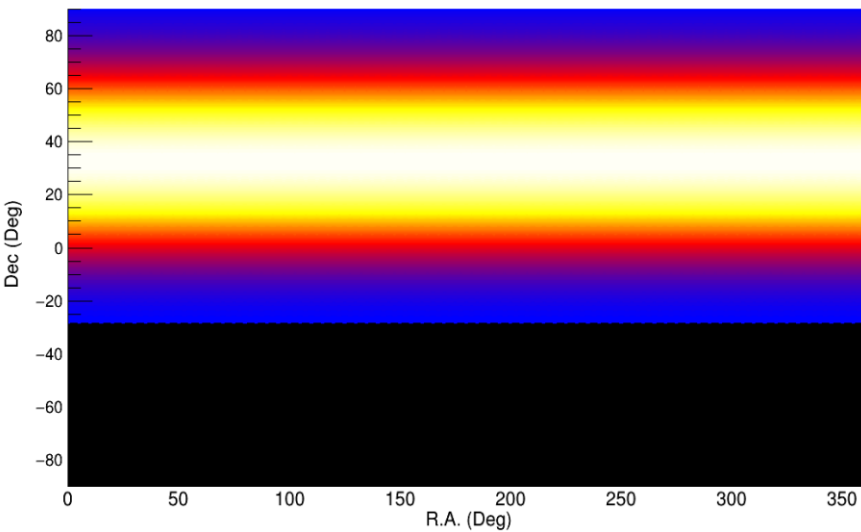
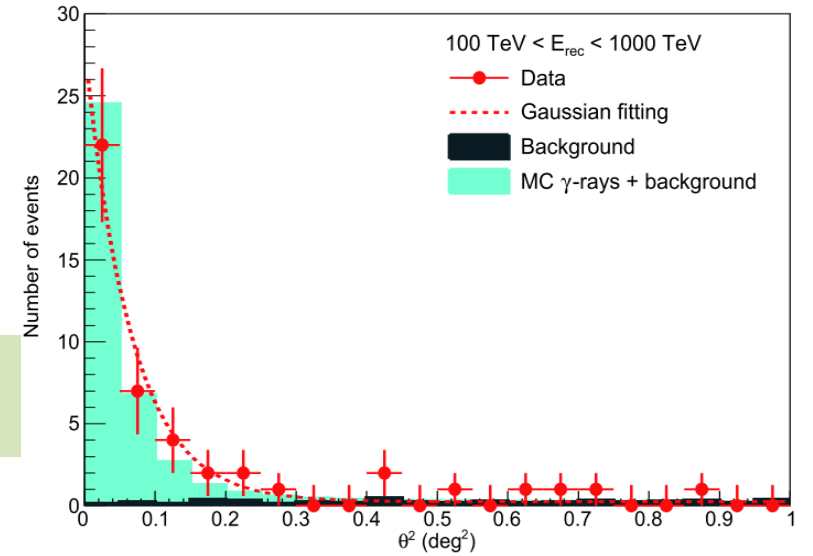


LHAASO对伽马射线探测特点



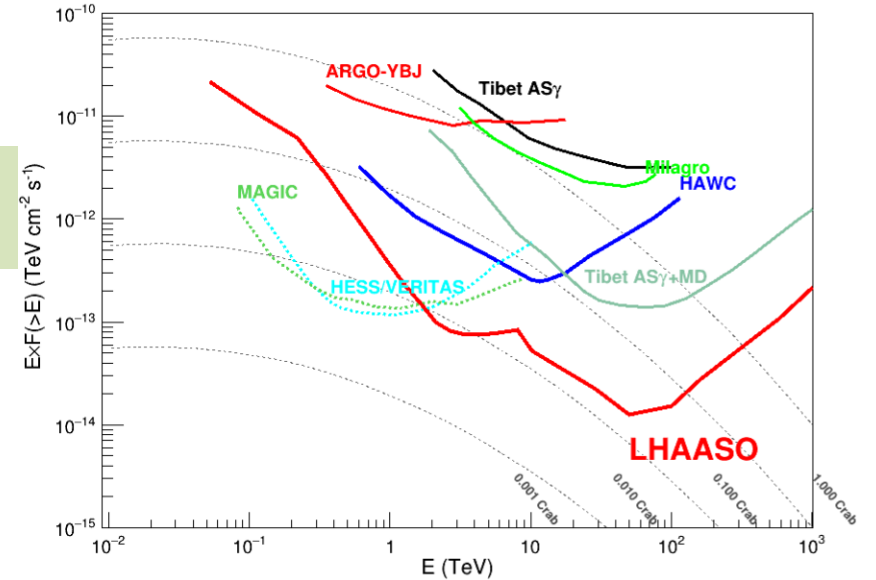
大视场

干净伽马测量



宽能段、高灵敏

全天候



LHAASO的科学目标

寻找宇宙线起源核心目标

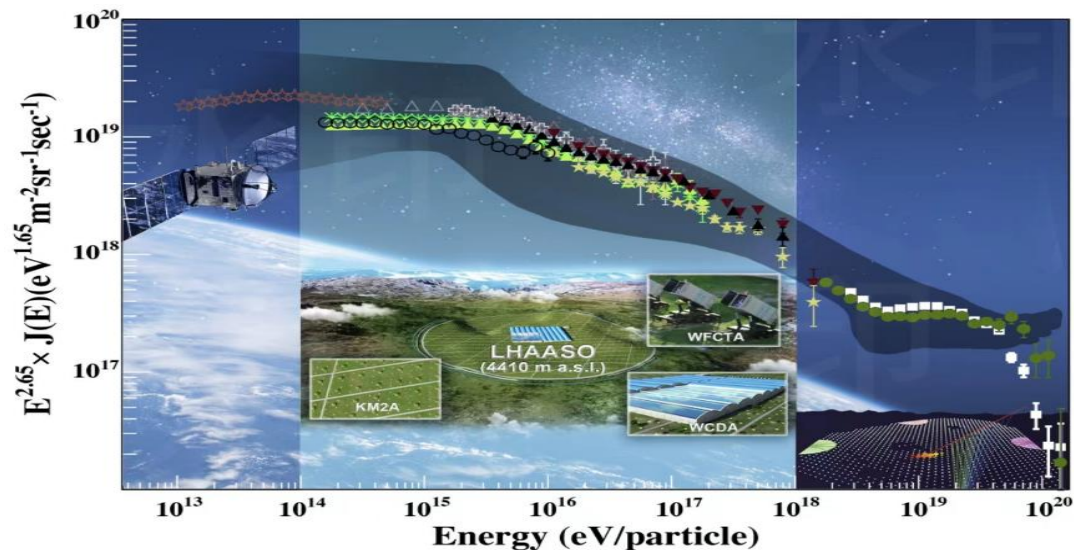
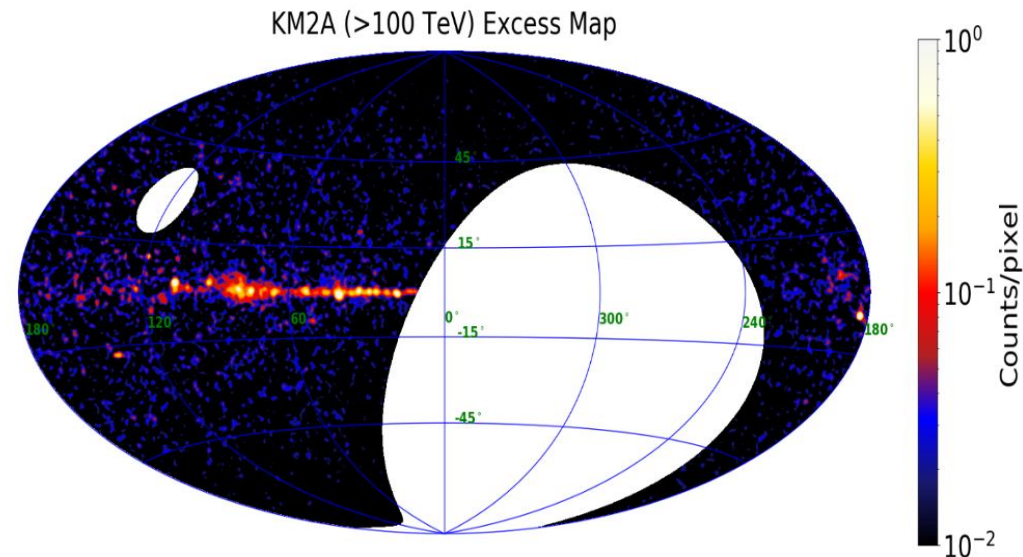
- 精确测量候选天体（超新星遗迹、黑洞等）的伽马射线宽范围能谱，寻找宇宙线源存在的证据，精确测量带电宇宙线成份与能谱，探明宇宙线起源、传播的规律

伽马射线源的巡天普查

- 大量发现伽马射线源，发现新现象、揭示新规律

探索新物理前沿

- 开展暗物质研究，超越加速器物理能标之上的新物理问题，量子引力效应或Lorentz 对称性破缺效应等研究





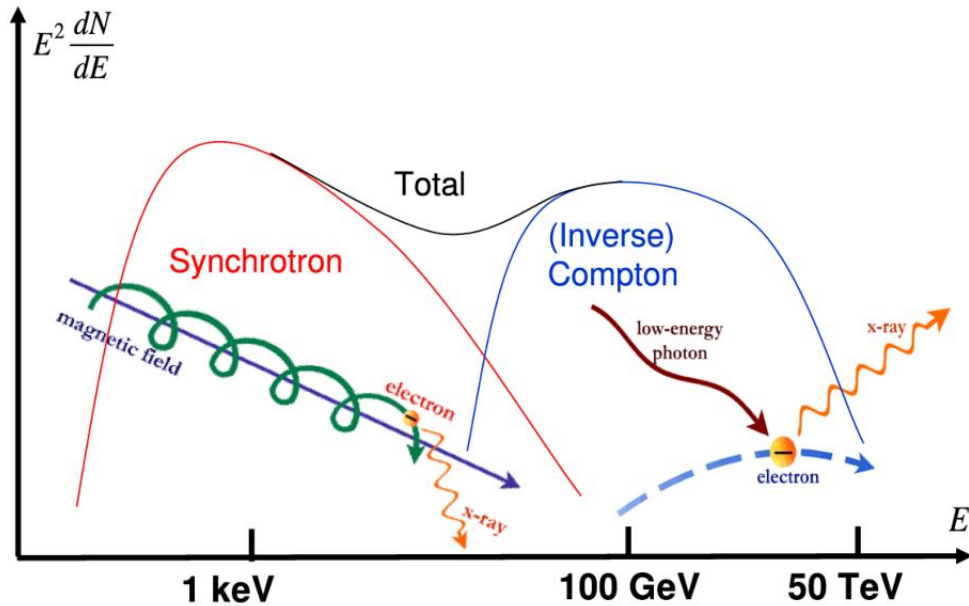
二、LHAASO对宇宙线起源研究成果

伽马射线产生机制

多波段联合辐射

超高能辐射不依赖磁场强度

在K-N区电子能量2-3倍于伽马能量



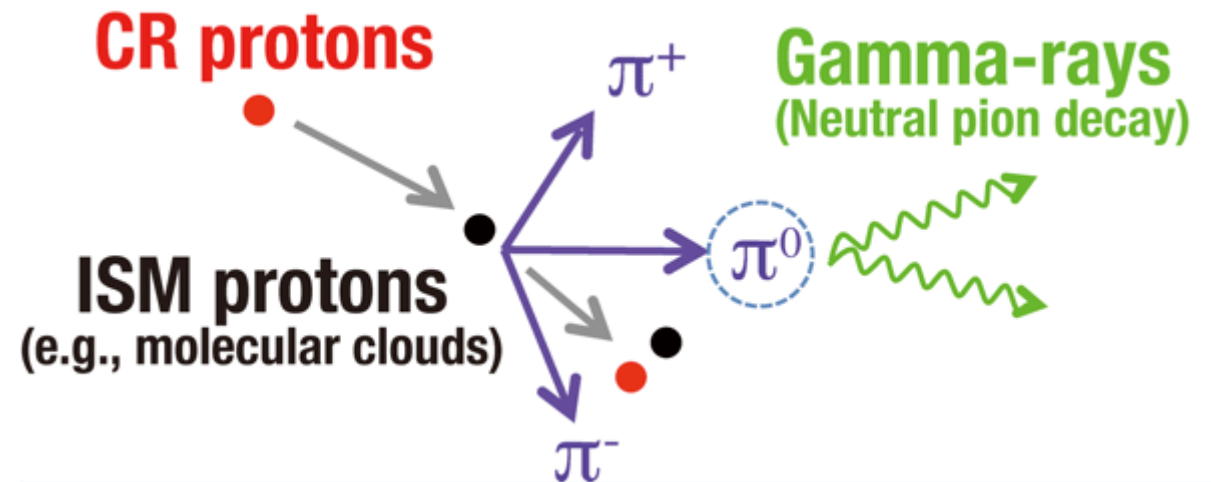
Angelis et al. 2008

高能电子的逆康普顿散射(CMB, IR, ...)

很弱低能辐射

需要与气体分布关联

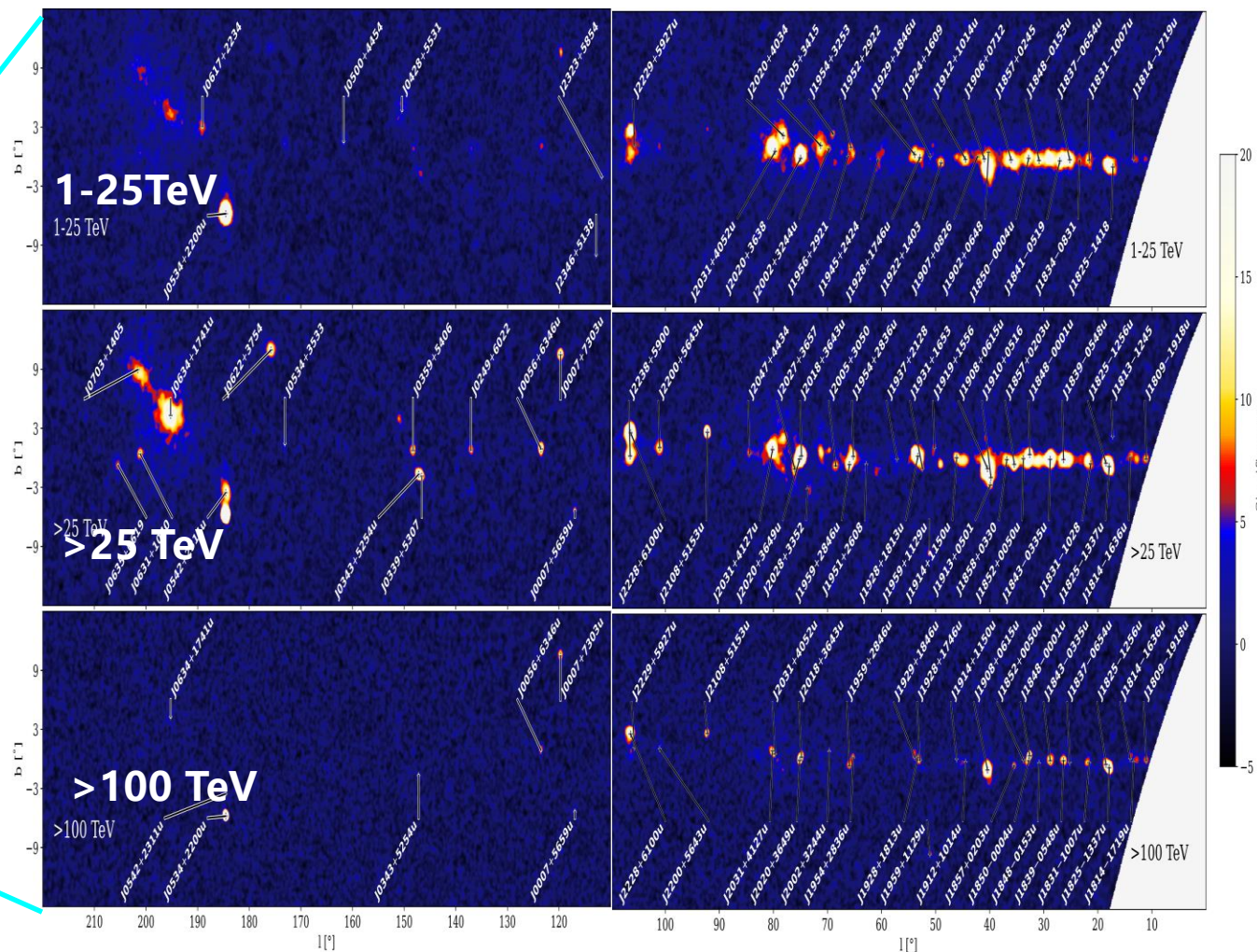
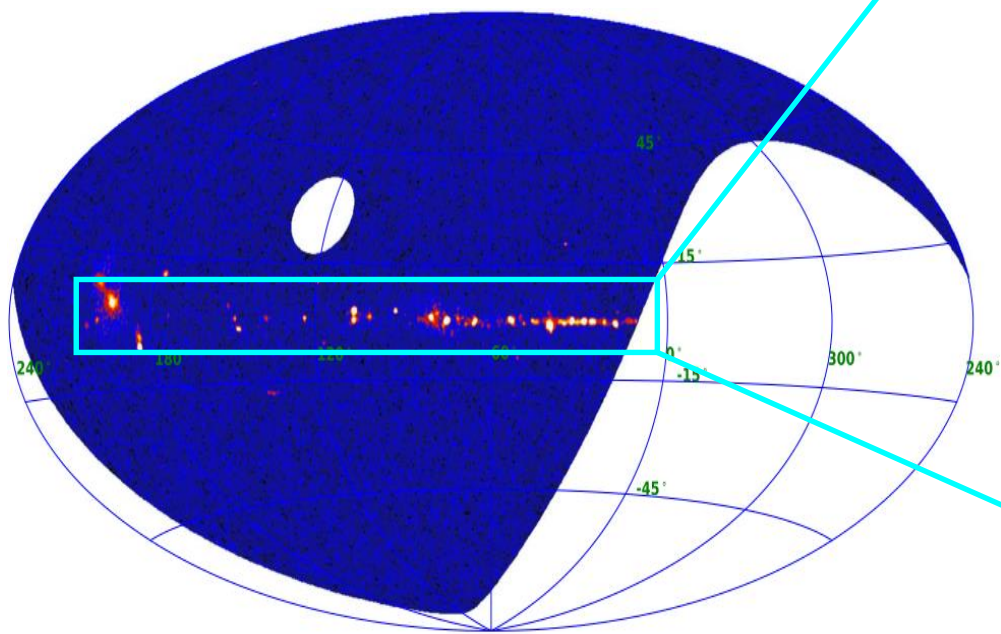
质子能量10倍于伽马能量



宇宙线与星际气体碰撞

巡天普查发现大量宇宙线起源的最佳候选体

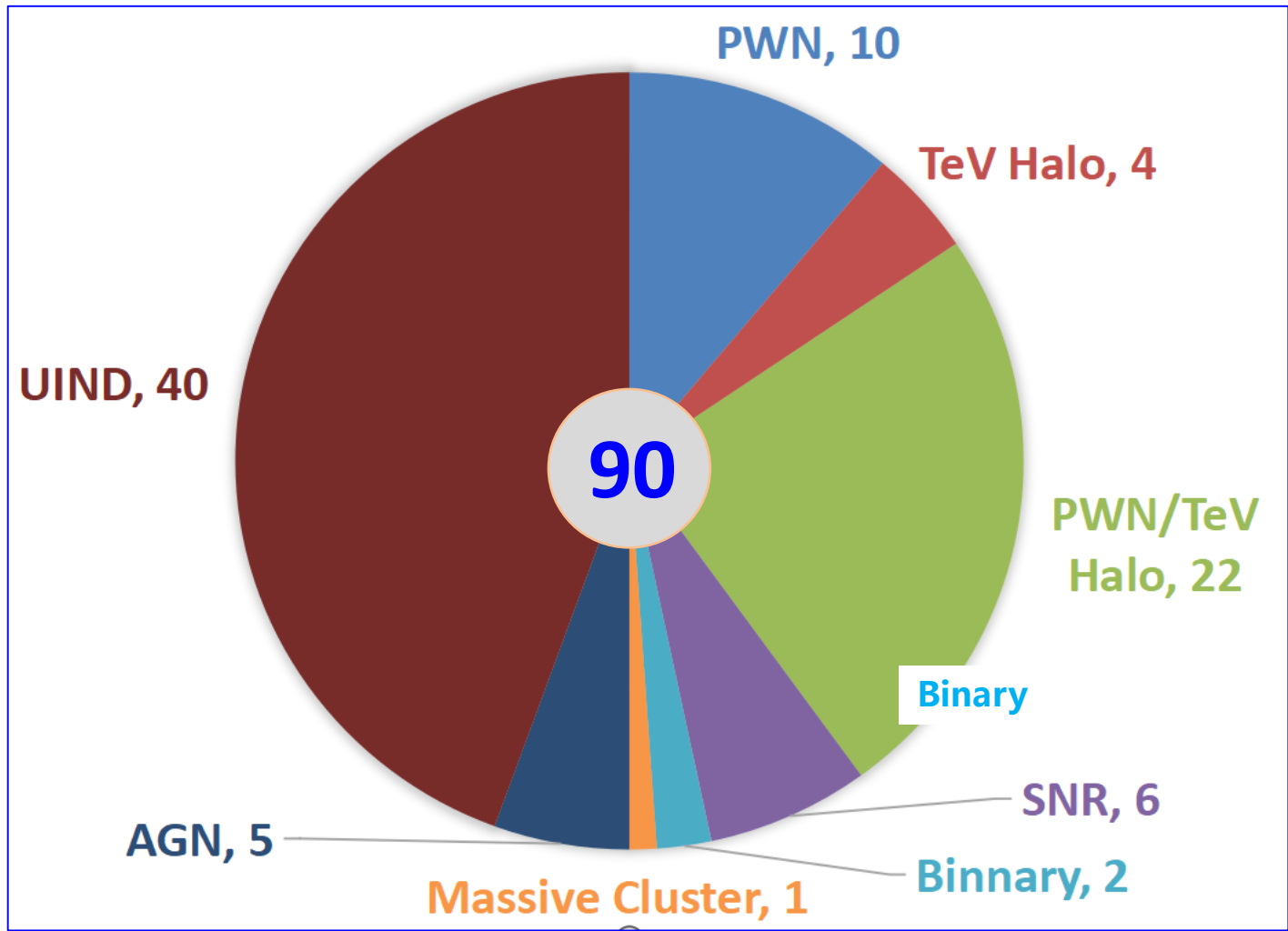
- 2021年开启超高能伽马天文 (>100 TeV, 12个超高能天体)
- 90个甚高能天体:32新发现
- 43个超高能天体



LHAASO coll. ApJS, 271:25 (2024)

LHAASO第一星表种类分布

- 宇宙线源重要候选体：
脉冲星风云、超新星遗迹、微类星体、年轻大质量星团

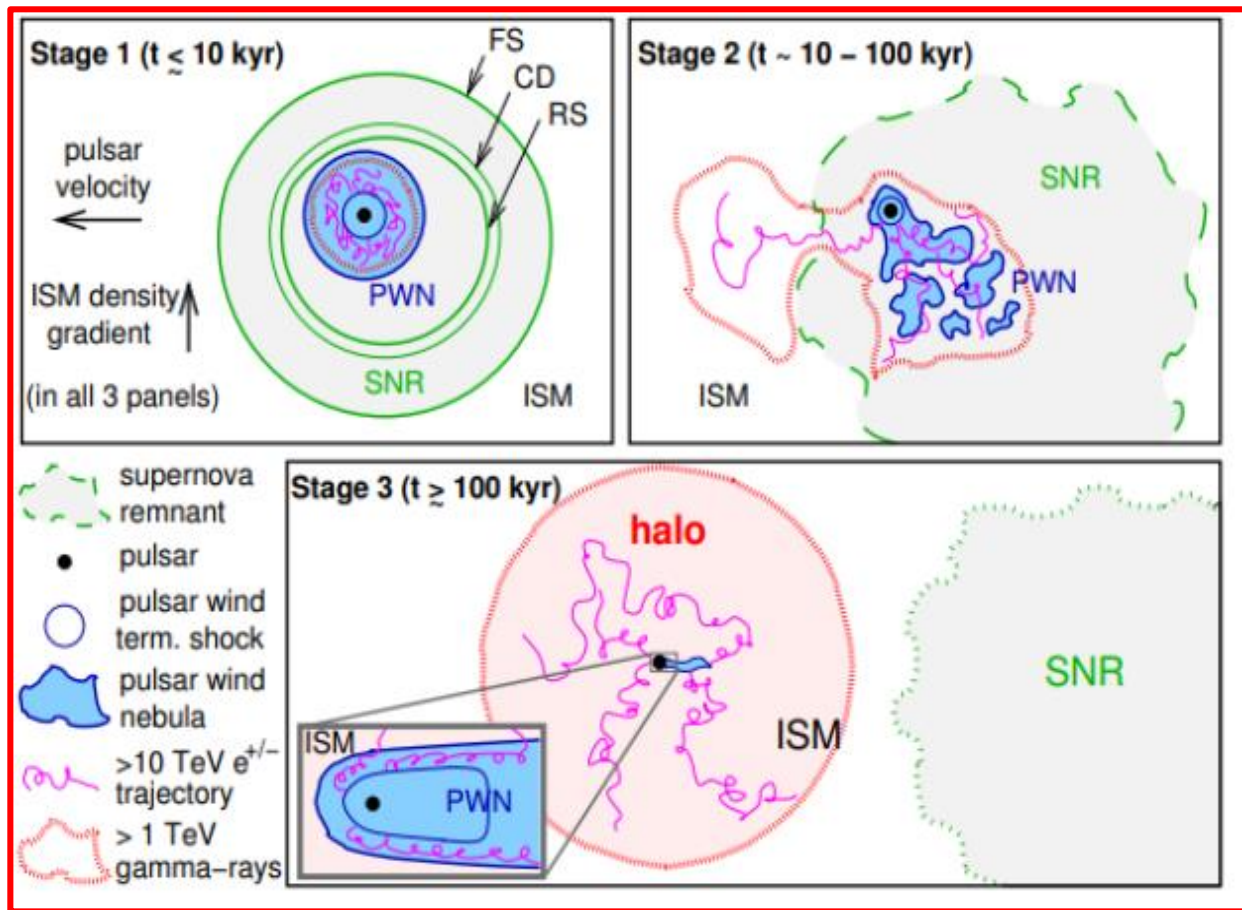




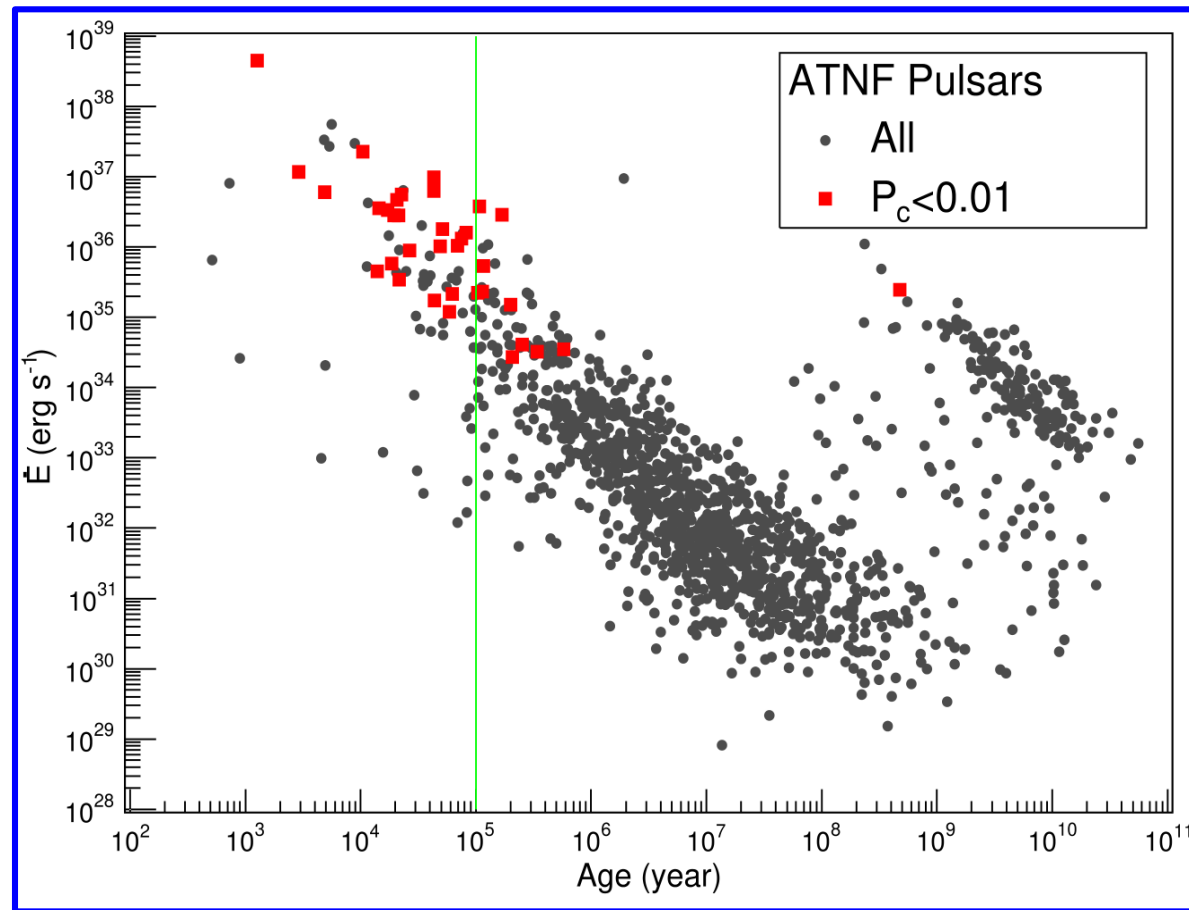
河内：脉冲星风云相关研究进展

脉冲星风云是最高效的超高能伽马天体

脉冲星风云演化图像



与脉冲星成协的LHAASO源

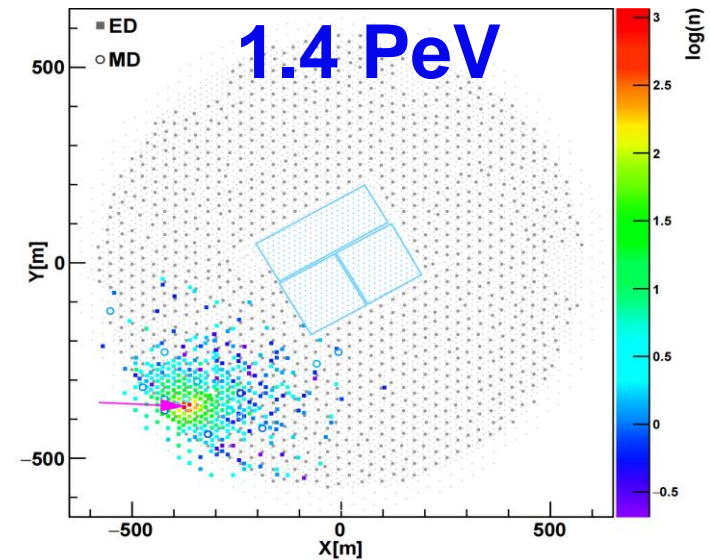
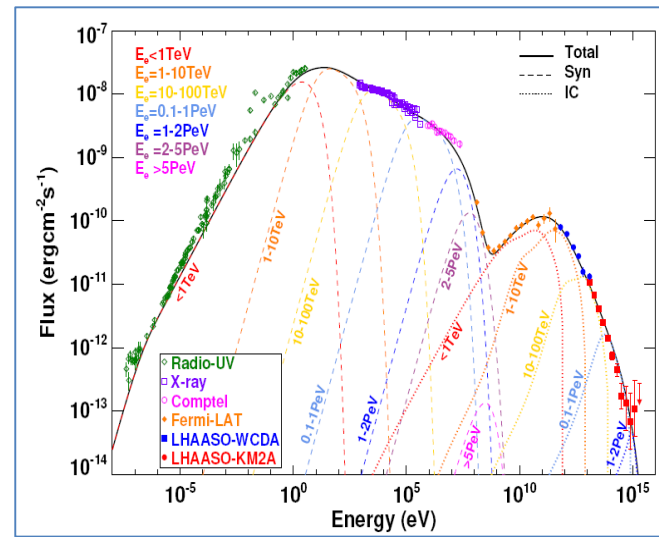
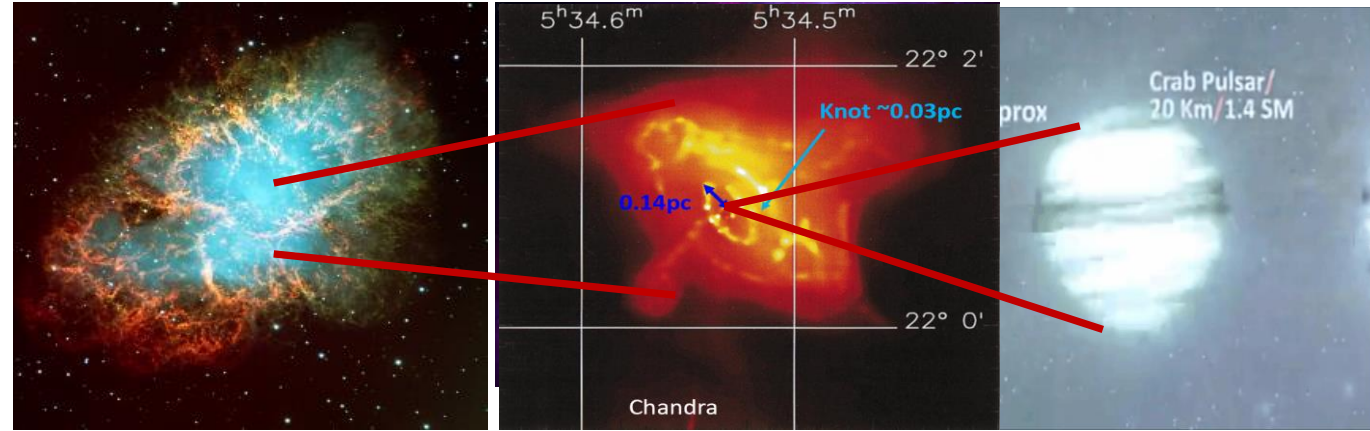


LHAASO coll., ApJS 271:25(2024)

辐射PeV光子的脉冲星风云蟹状星云

- 星云核心为超强电子加速器
- 加速效率逼近理论加速极限
- PeV光子与GeV爆发为近15年最令人惊奇的两项重要发现(Amato & Olmi 2021)

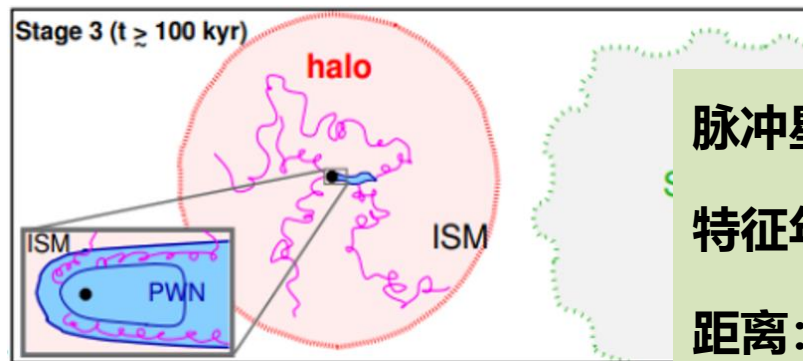
- 光子最高能量1.1PeV→1.4 PeV
- 原初电子能量2.3 PeV→2.8 PeV
- 加速率 $\eta \approx 0.16 \rightarrow 0.26$
- 加速尺度 $l > R_g = 0.025 \text{ pc} \rightarrow 0.032 \text{ pc}$



Science,373:425 (2021)

确认脉冲星周围电子存在慢扩散

- 确认脉冲星周围电子弥散扩散比在星际空间慢约100倍
- 首次将其辐射拓展至超高能区



脉冲星: PSR J0622+3749

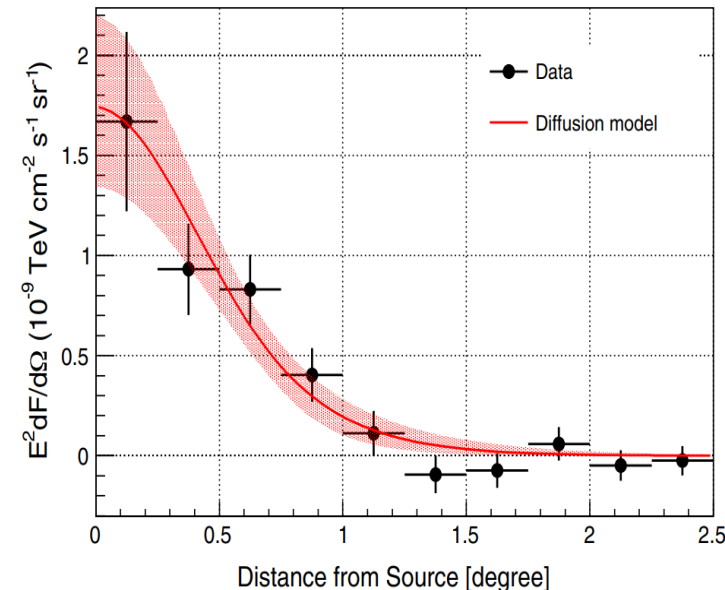
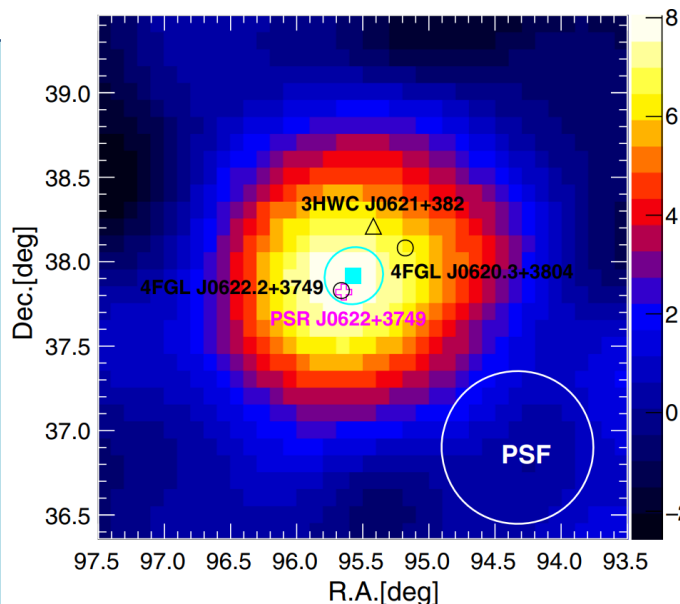
特征年龄: 21万年

距离: 1.6 kpc

$$f(\theta) \propto \frac{1}{\theta_d(\theta + 0.085\theta_d)} \exp[-1.54(\theta/\theta_d)^{1.52}]$$

$$D \approx (8.9_{-3.9}^{+4.5}) \times 10^{27} (d/1.6 \text{ kpc})^2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

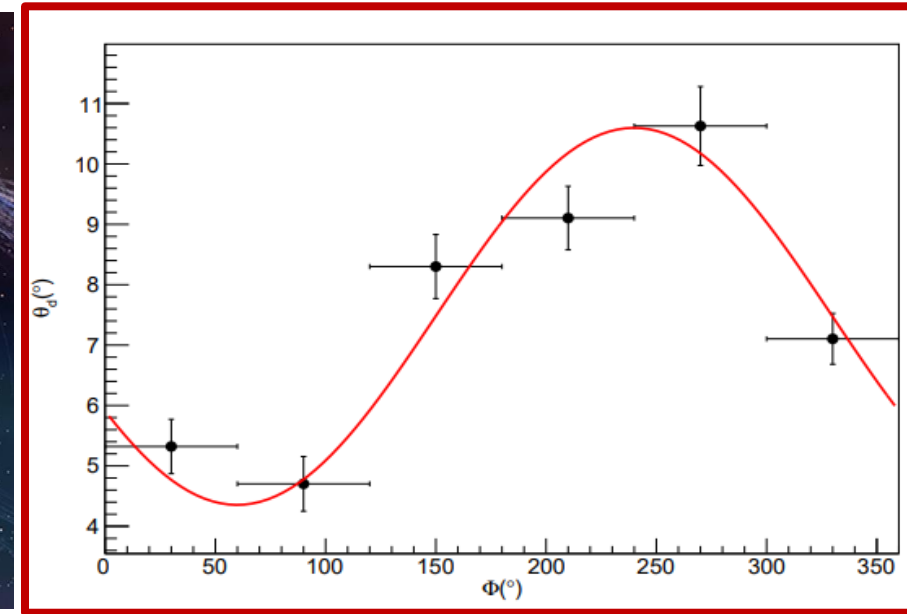
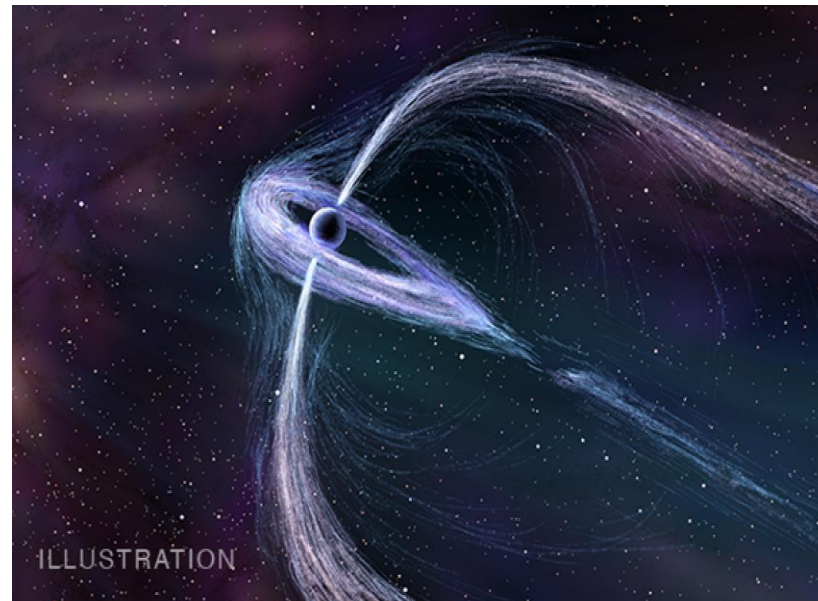
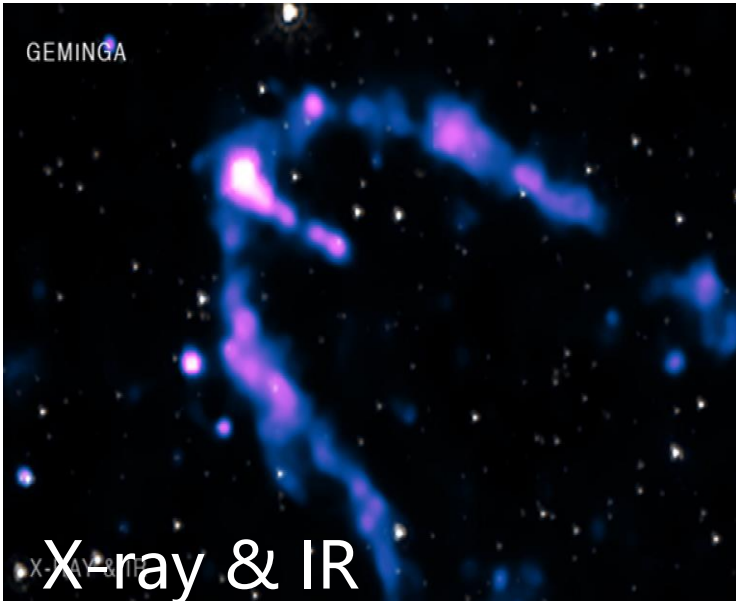
$$E_e \sim 160 \text{ TeV}$$



发现脉冲星星晕电子存在非对称慢扩散

- 脉冲星Geminga, 特征年龄34万年, 距离250 pc
- 可以精细研究电子扩散特性

Preliminary



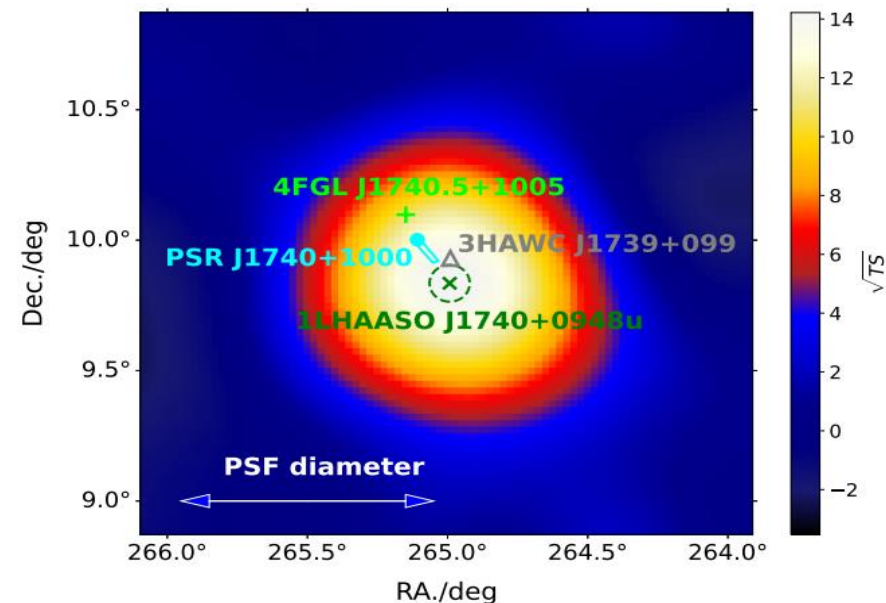
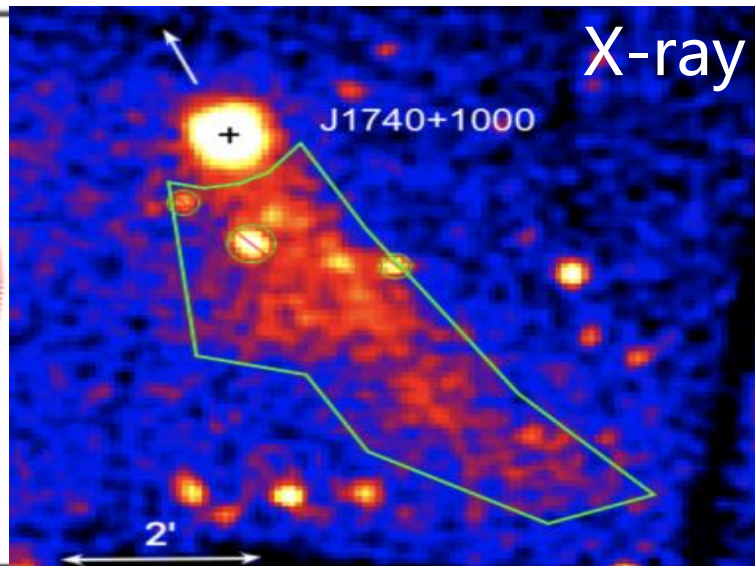
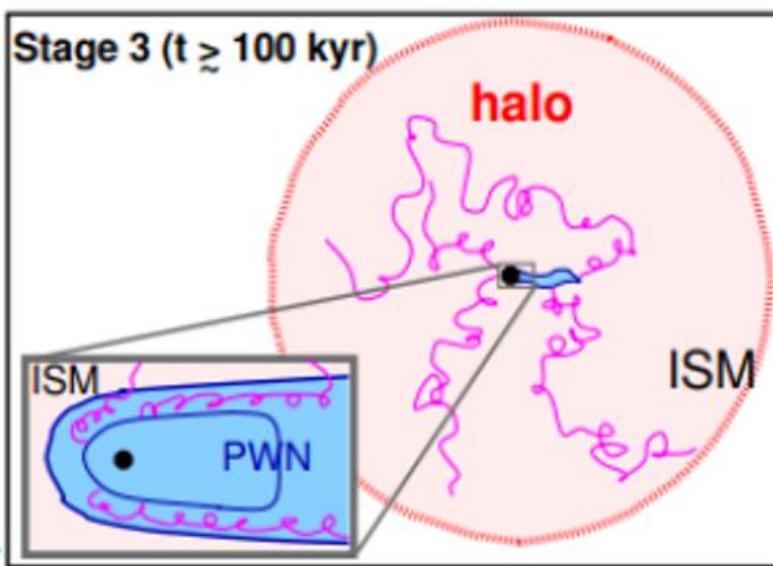
发现弓激波型脉冲星风云尾部超高能辐射

- 未发现预期的晕结构(高银纬环境有关?)
- 首次在尾部发现超高能辐射
- 在尾部可能存在新的加速过程?

脉冲星: PSR J1740+1000

特征年龄: 11万年

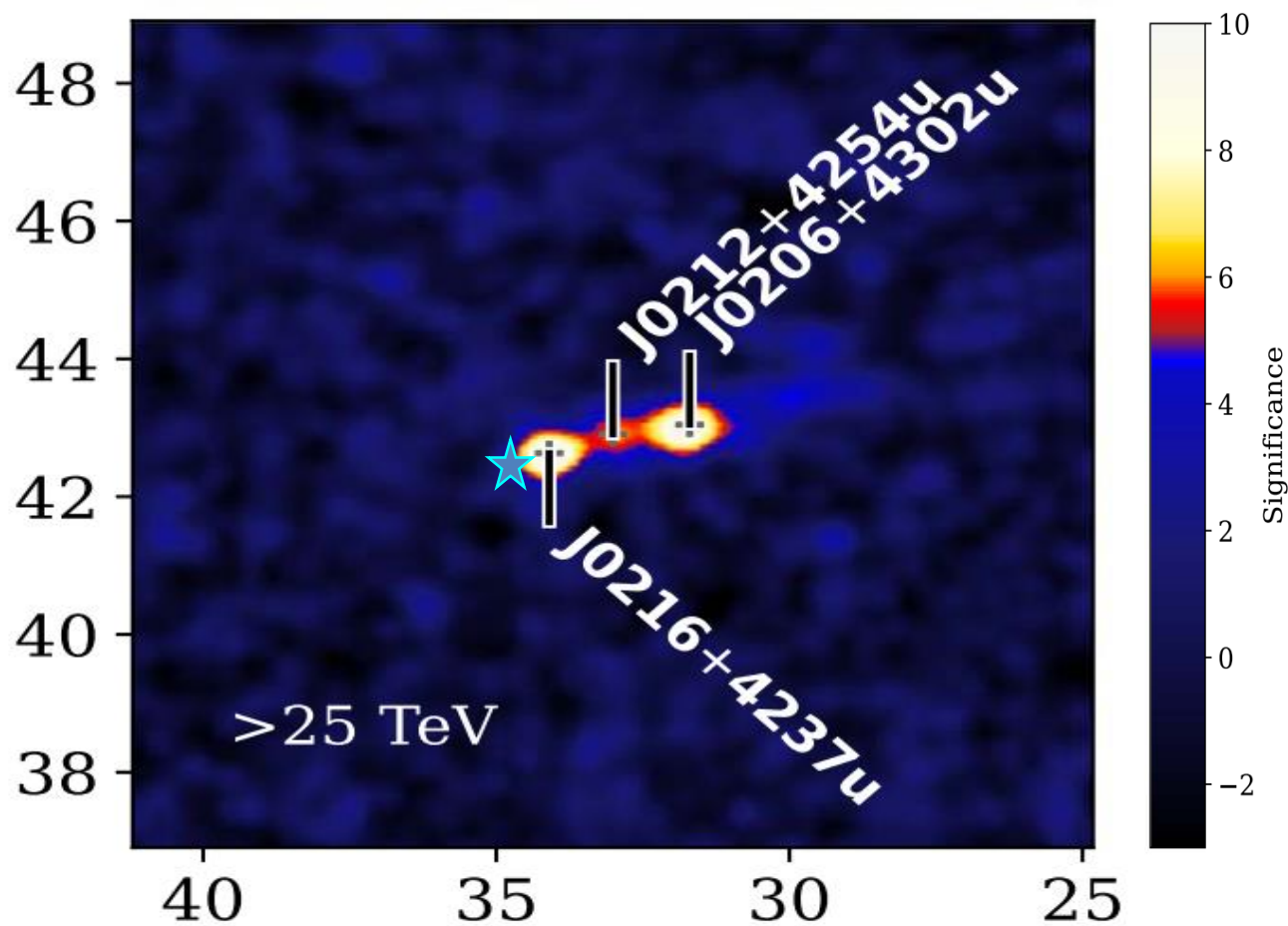
距离: 1.4 kpc



LHAASO coll., submitted

发现与毫秒脉冲星相关的新型超高能辐射天体

- 脉冲星: PSR J0218+4232 (MSP)
- 特征年龄: 4.76 亿年
- 距离: 3.15 kpc
- 主要挑战: 传播? 加速?





河南：超新星遗迹相关研究进展

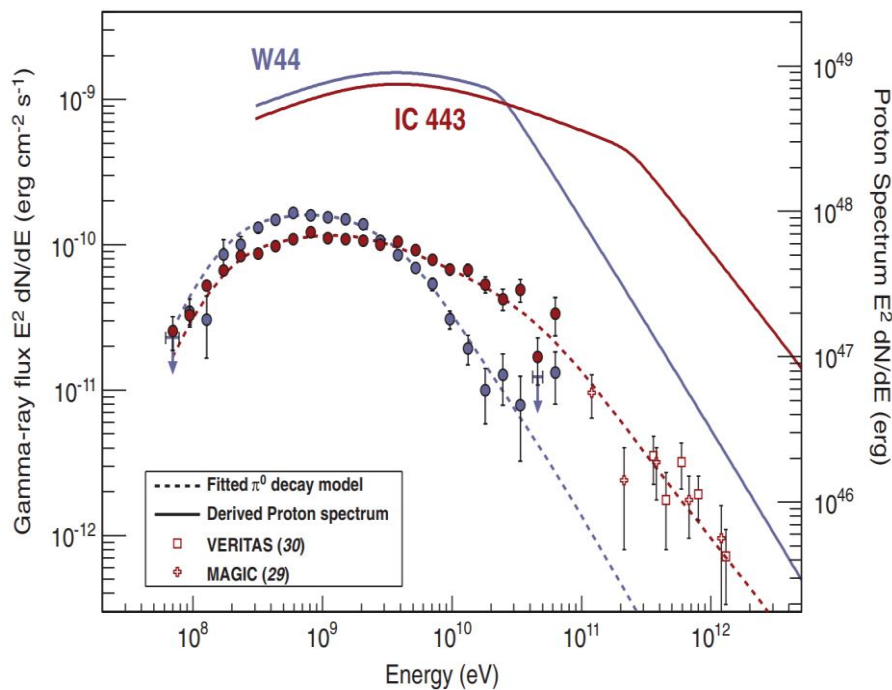
超新星遗迹长期作为主要宇宙线候选天体

$E_{p,cut} \sim 100 \text{ GeV}$

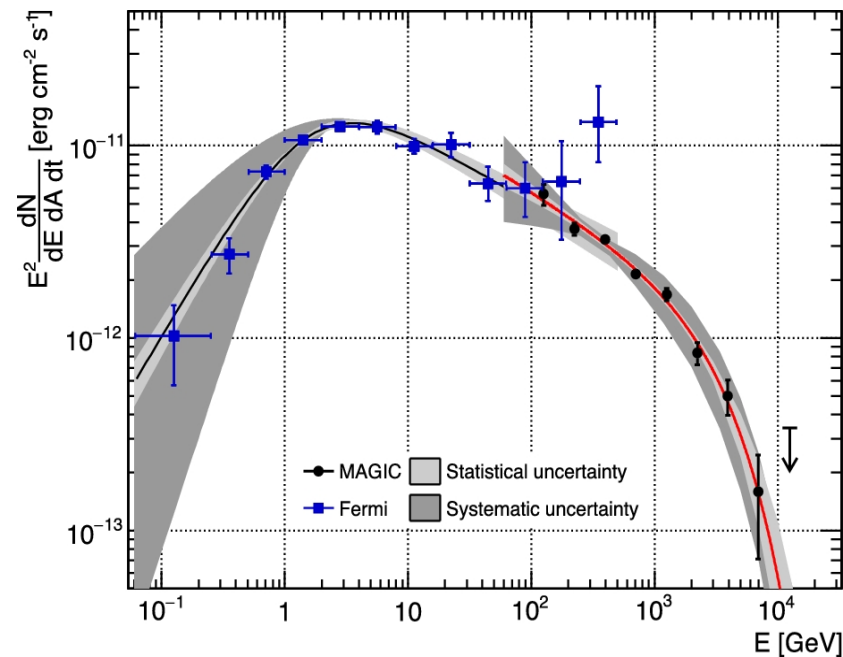
$E_{p,cut} \sim 10 \text{ TeV}$



Baade & Zwicky (1934)



Fermi-LAT Coll. 2013



MAGIC coll. 2017

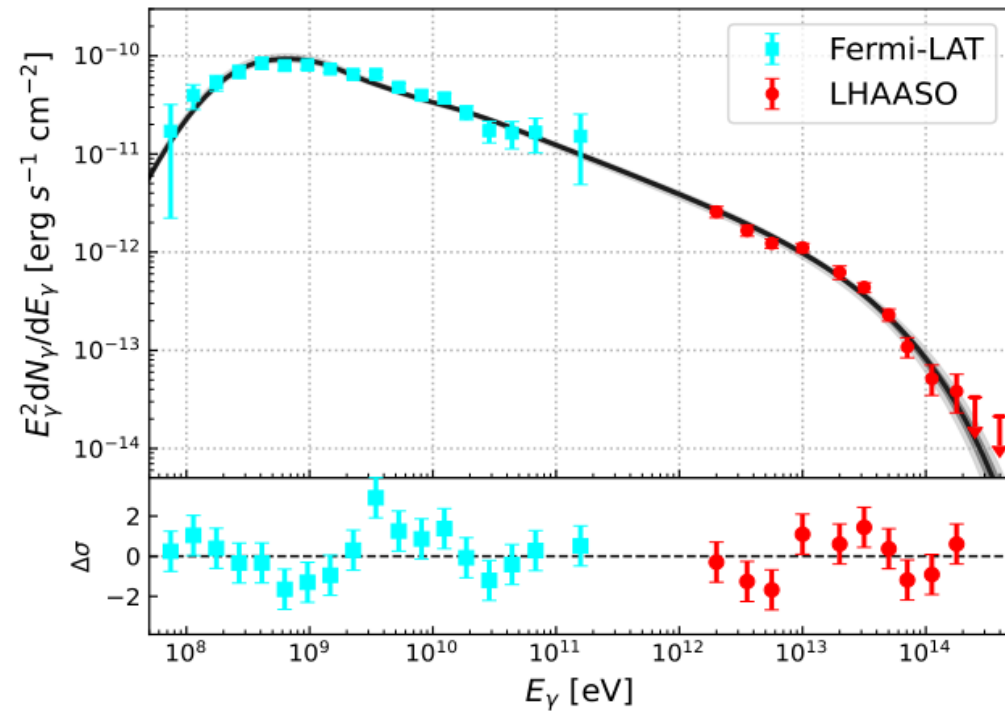
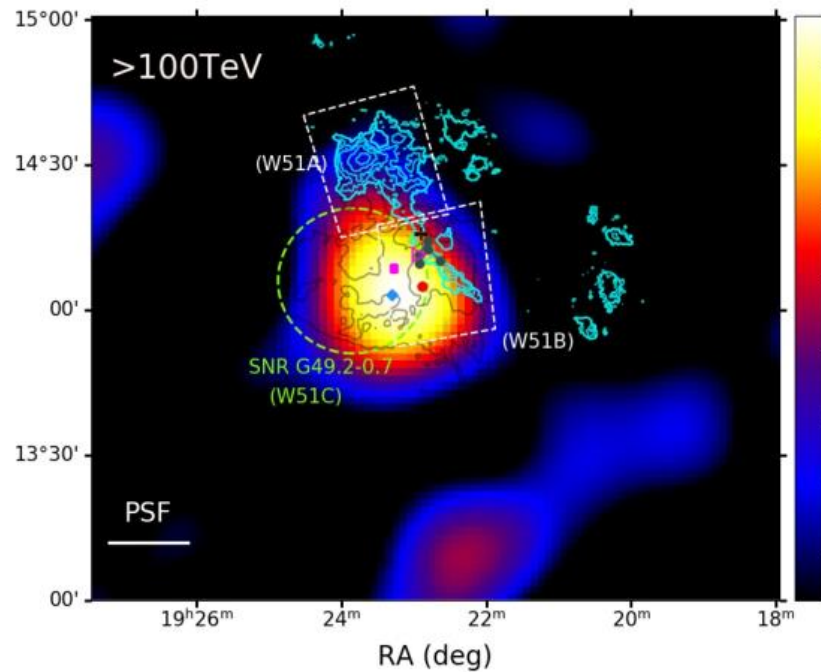
2013年国际十大天文学进展

获W51区域宇宙线加速极限关键证据

- SNR W51C与分子云碰撞区域

- 原初宇宙线质子截断能量 $E_{p,\text{cut}} = 385^{+65}_{-55} \text{ TeV}$

- SNR能否加速宇宙线超过1 PeV?

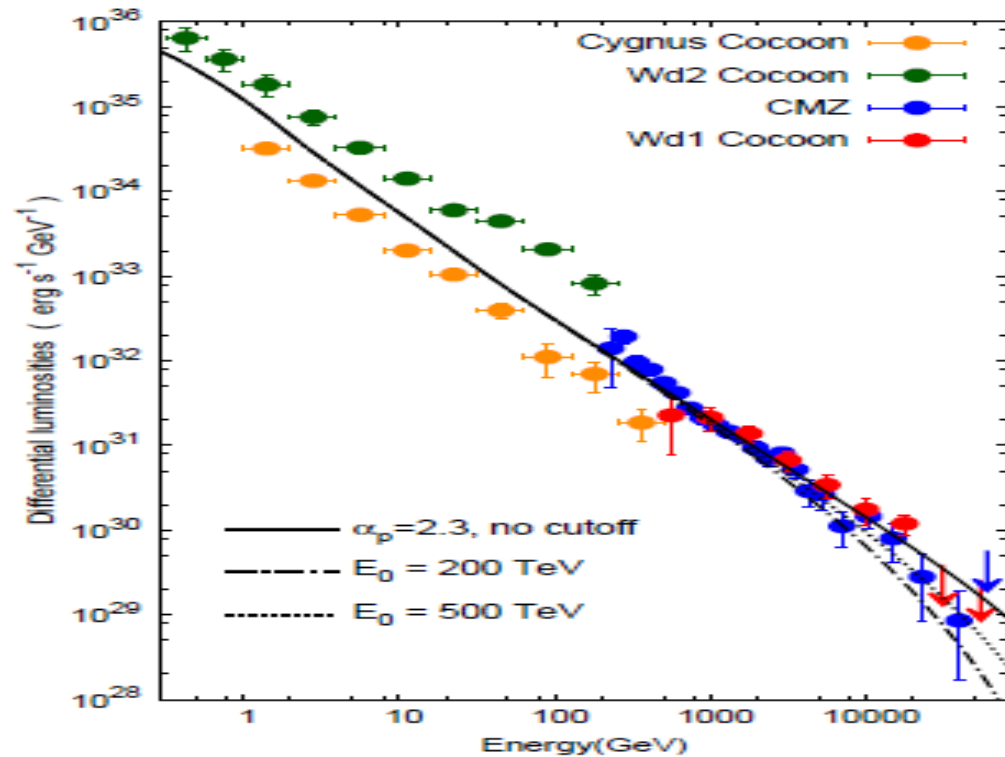




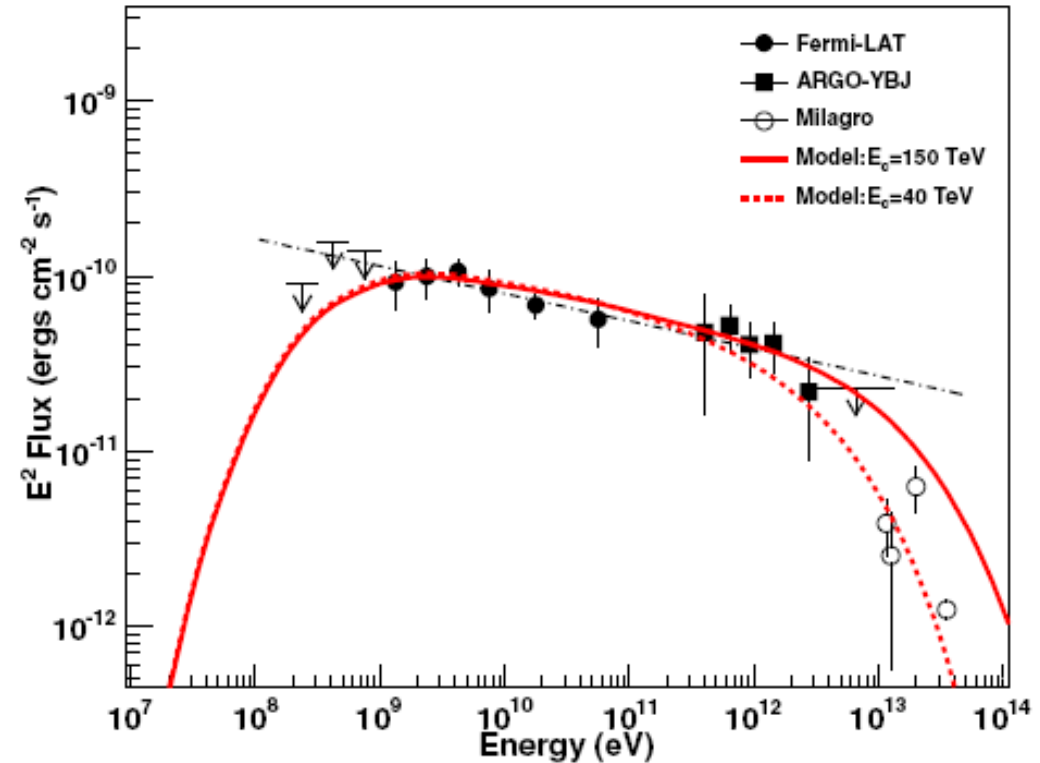
河内：年轻大质量星团相关研究进展

大质量星团能否作为主要PeV宇宙线加速源?

- 年轻大质量星团对宇宙线供给率 10^{41} erg/s,有能力担任主要宇宙线源



Aharonian et al. 2018

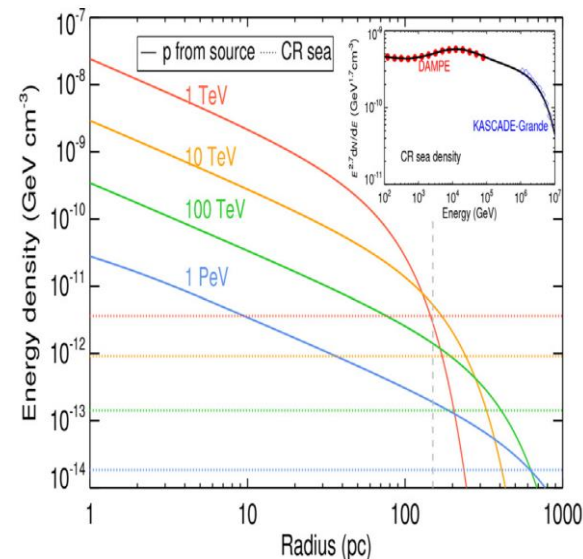
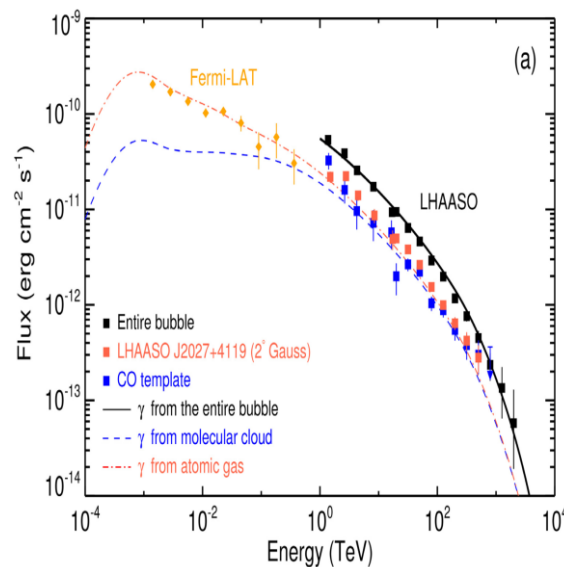
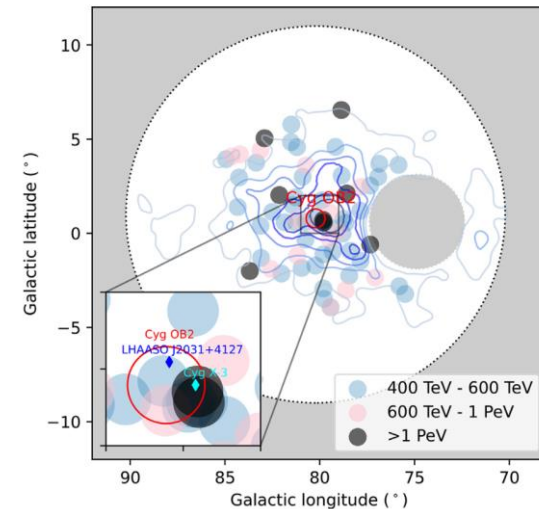
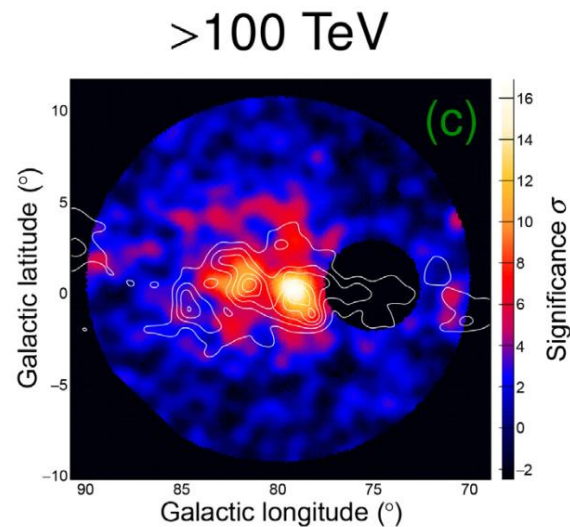


ARGO-YBJ coll. 2014

LHAASO发现首个10PeV超级宇宙源

- 半径大于6度 ($\sim 150\text{pc}$) 的巨型超高能伽马泡
- 与分子云明显成协
- 8个PeV光子(最高2.5PeV)
- 首次探测到10PeV宇宙线加速天体
- 年轻大质量星团Cygnus OB2为最可能加速源

Science Bulletin, 69:449–457(2024) (封面文章)



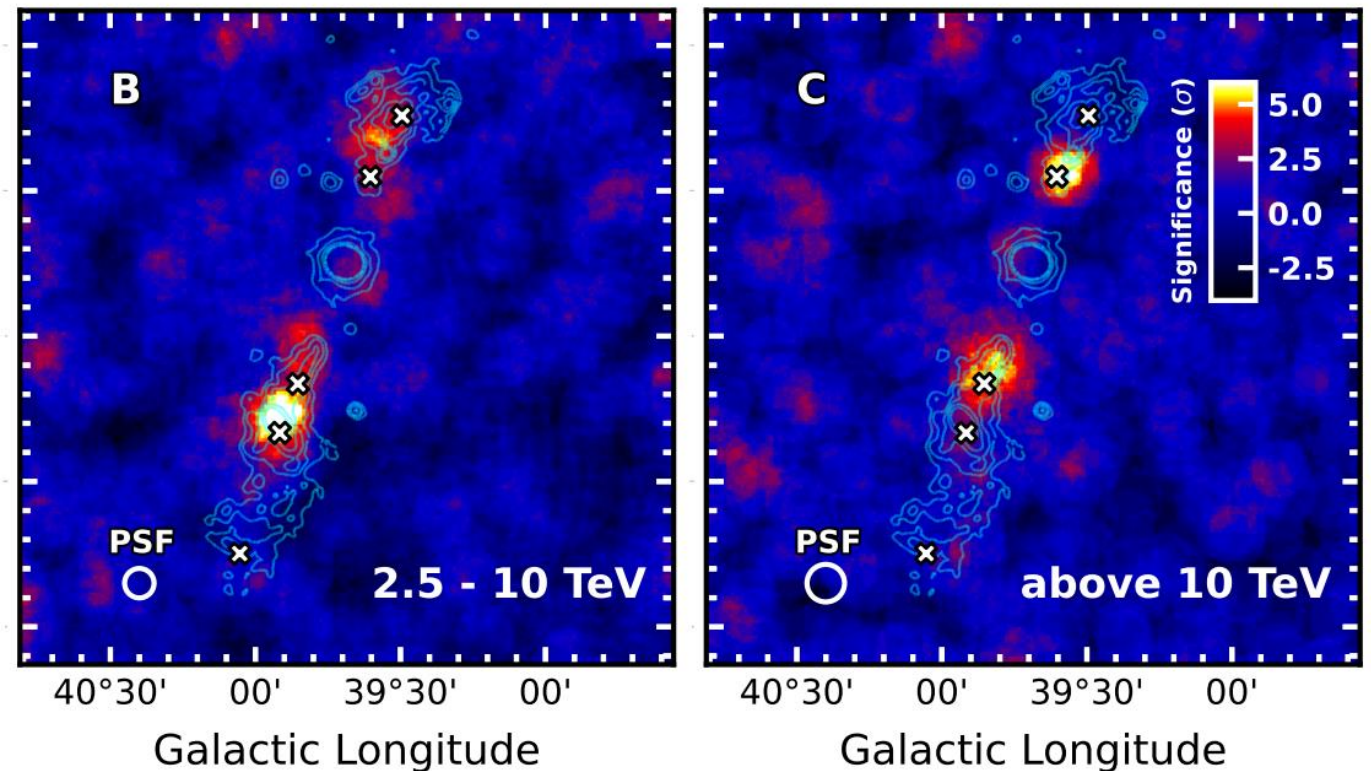


河内：微类星体相关研究进展

微类星体能否作为超高能宇宙线加速器？

LHAASO 已经探测到微类星体 $> 100\text{TeV}$ 辐射！

问题：在哪里加速？ 加速电子or质子？



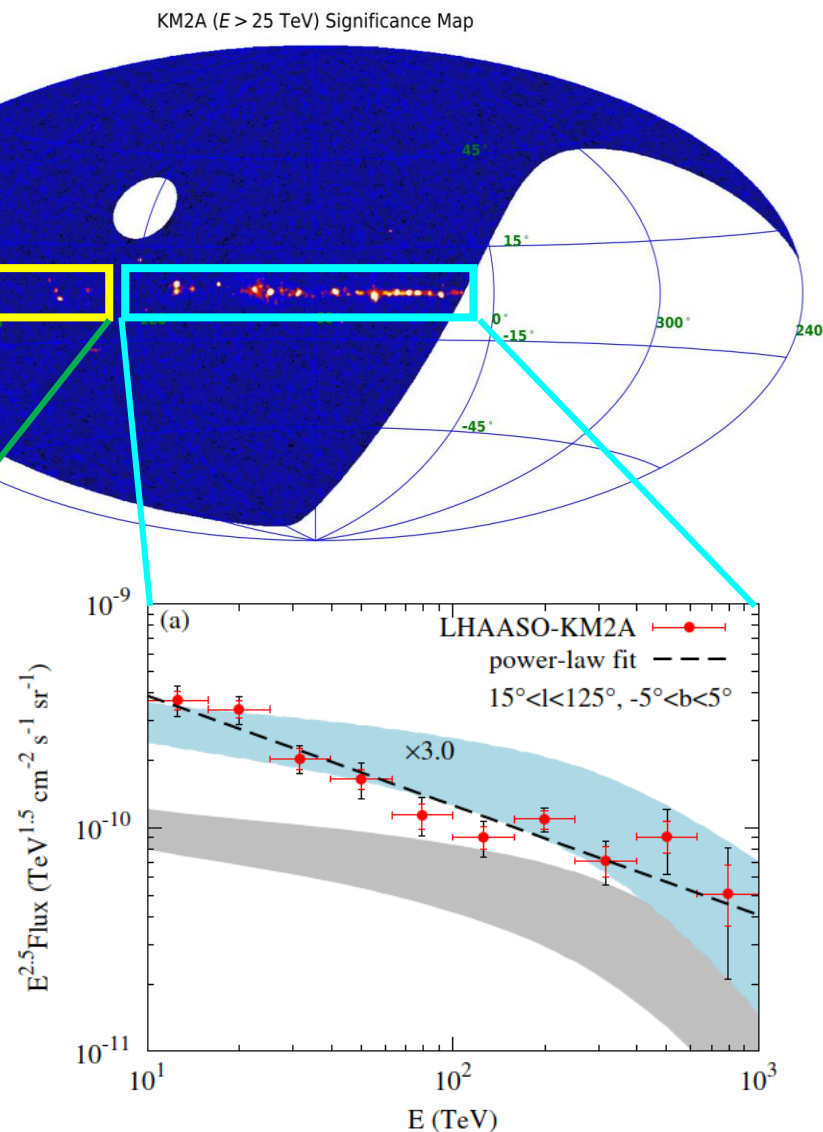
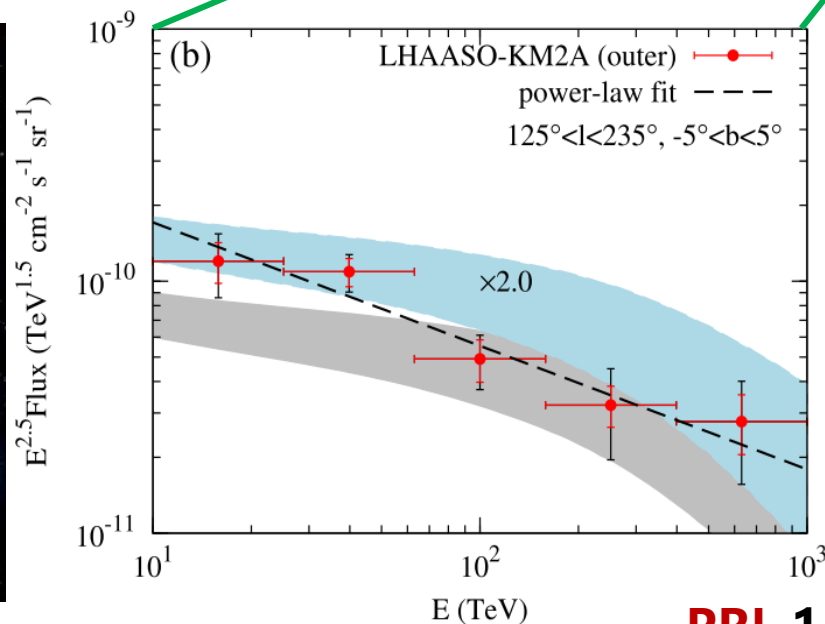
HESS coll., *Science*, 383:402-406 (2024)



河内：弥散相关研究进展

银盘弥散伽马为宇宙线分布提供重要信息

- 覆盖能段最宽、测量精度最高、点源污染最少
- 测量结果远高于理论预期，引起国际广泛关注
- 首次揭示出外银盘区域存在显著的弥散辐射
- PRL编辑推荐论文

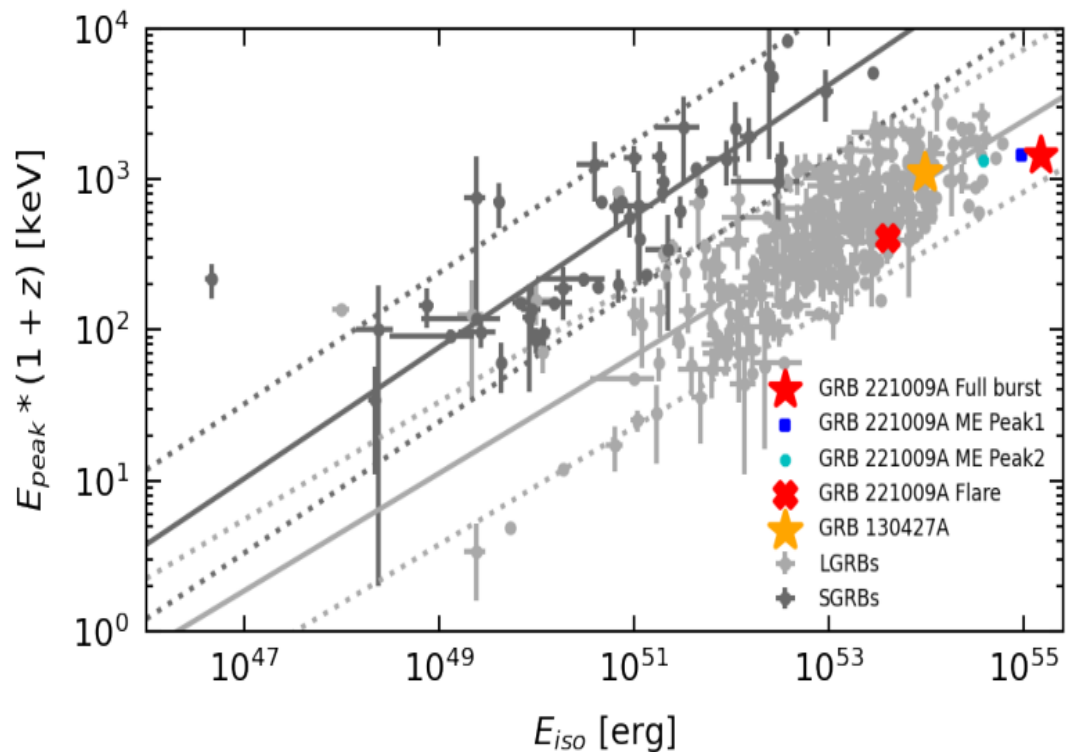


PRL 131:151001(2023)

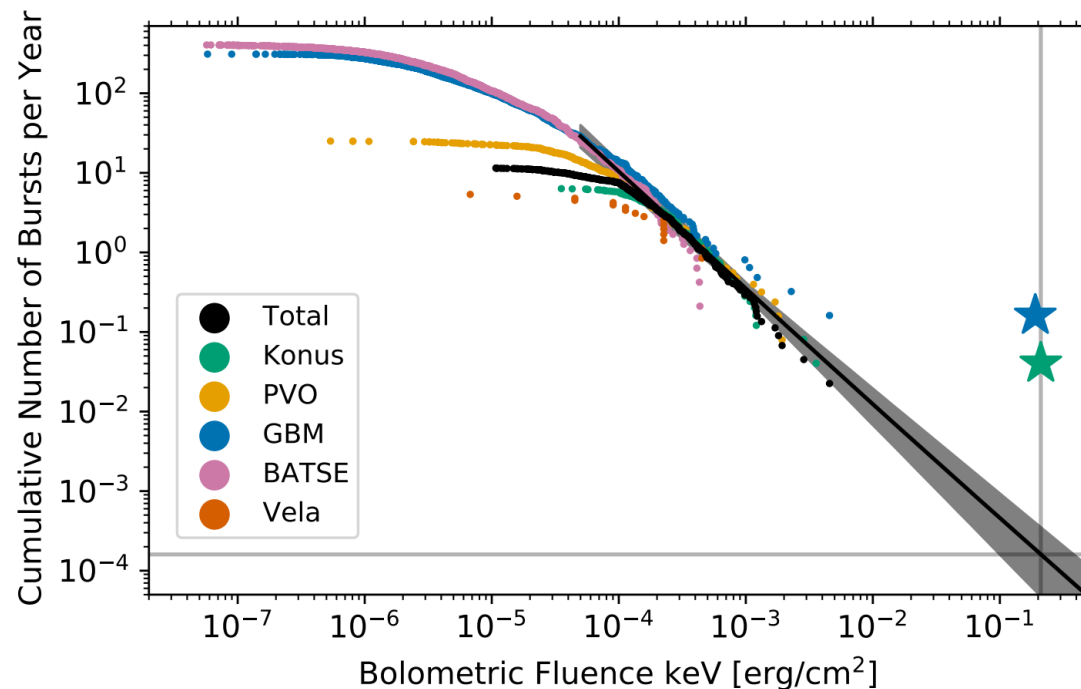


河外：伽马射线暴相关研究进展

史上最亮的GRB 221009A



Insight-HXMT& GECAM collaboration 2023



Buns et al. 2023

史上最亮 (Brightest of all time) !

千年机遇! 万年幸运!

发现史上最亮伽马暴的极窄喷流和十万亿电子伏特光子

- 首次精确测量高能光子爆发的完整过程
- 首次探测到高能光子流量的快速增强现象
- 发现极窄喷流揭示伽马射线暴历史最亮的秘密

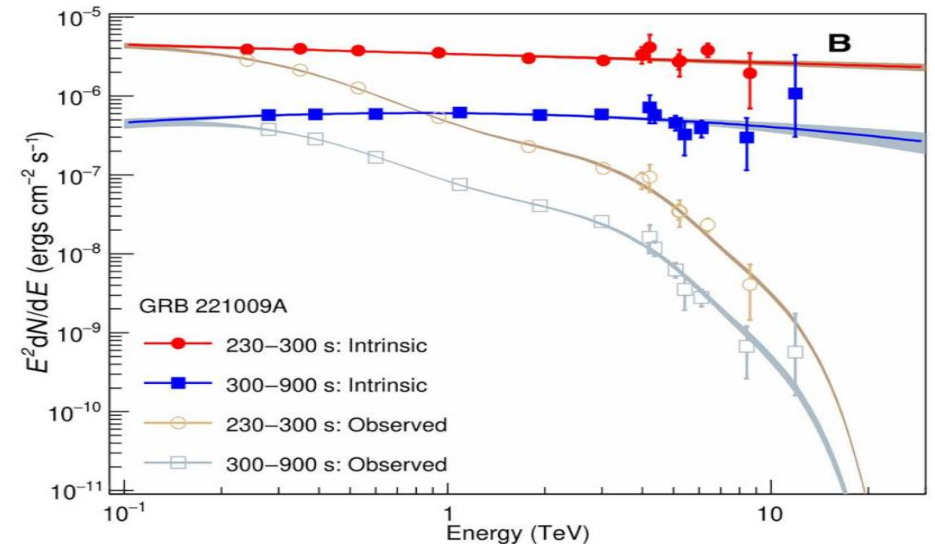
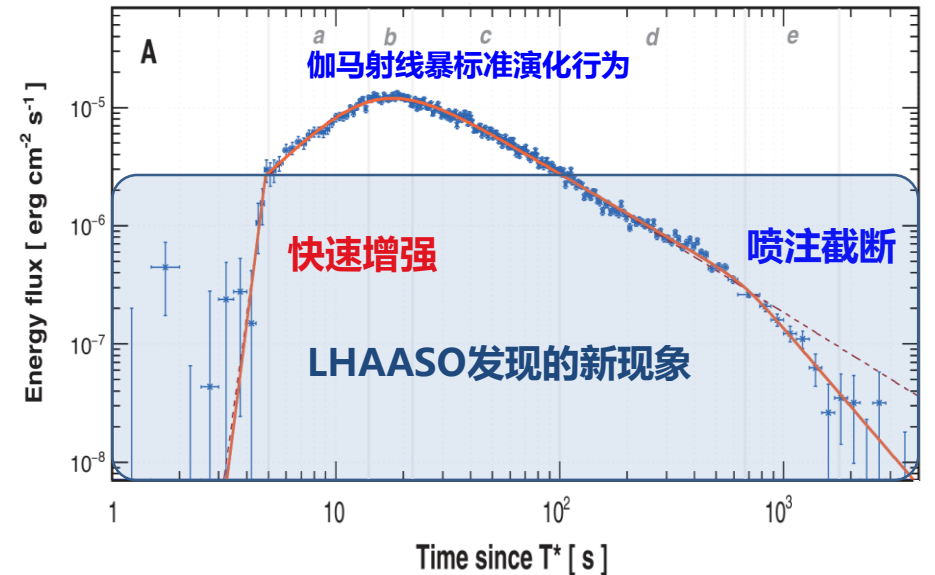
时
变
测
量

- 首次打开伽马暴10TeV观测窗口
- 能谱稳定延伸至13TeV挑战伽马暴余辉标准模型
- 揭示红外宇宙背景光对10TeV伽马吸收小于预期

能
谱
测
量

- 2023年中国科学十大进展

Science, 380:1390 (2023), Science Advances, 9: eadj2778 (2023)

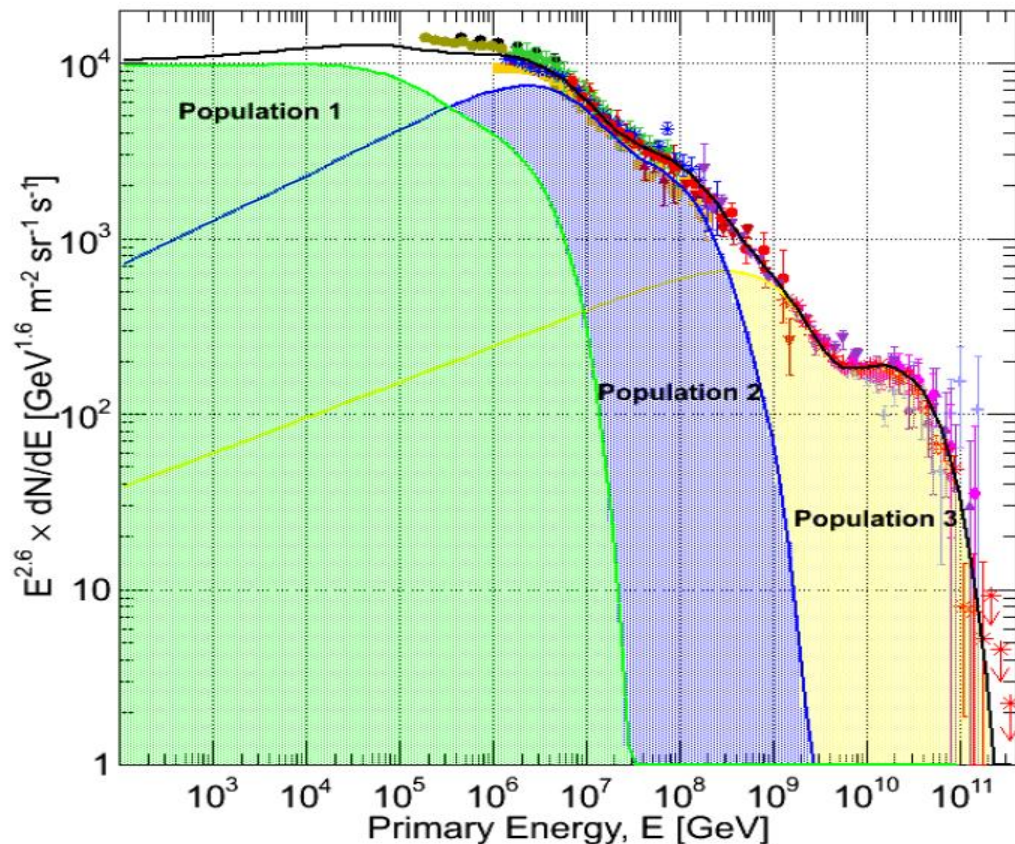




三、LHAASO对宇宙线研究进展

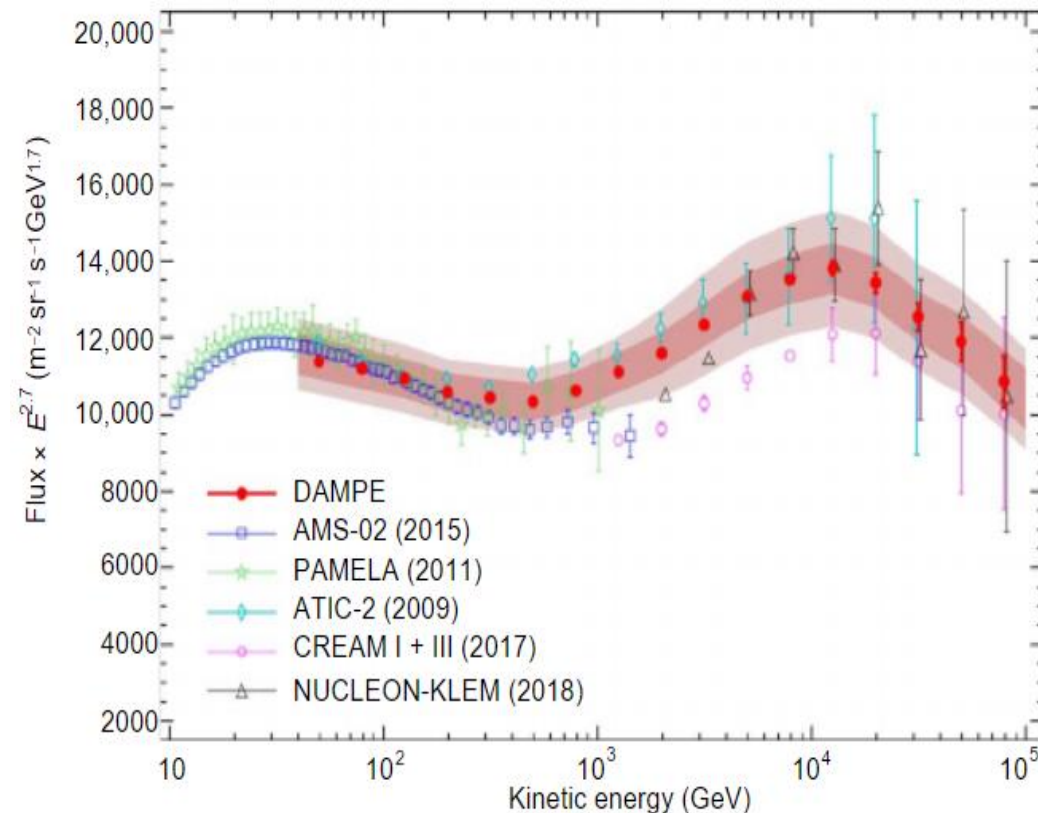
宇宙线能谱测量进展

宇宙线全粒子谱



Gaisser 2013

宇宙线质子子谱



DAMPE coll. 2019

膝区宇宙线全粒子谱精确测量

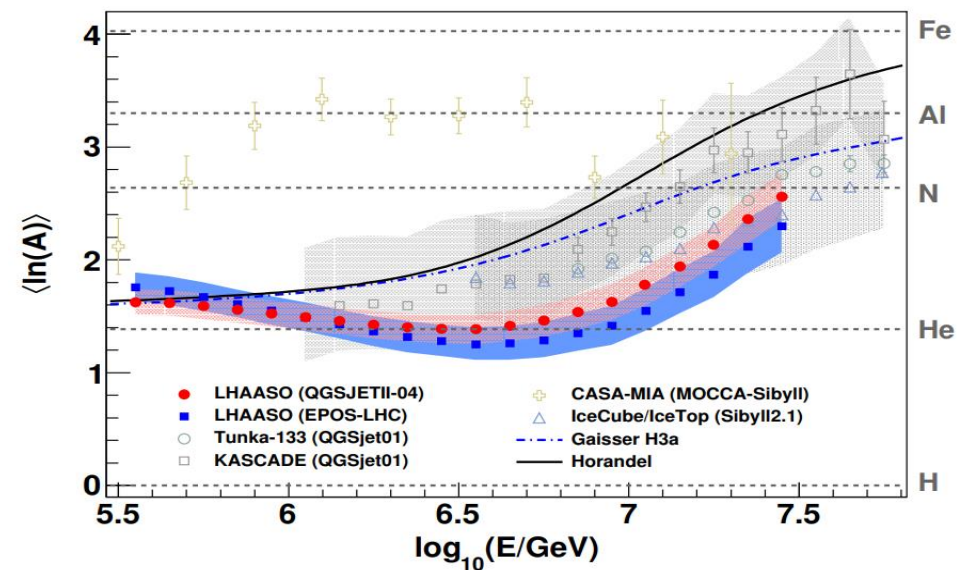
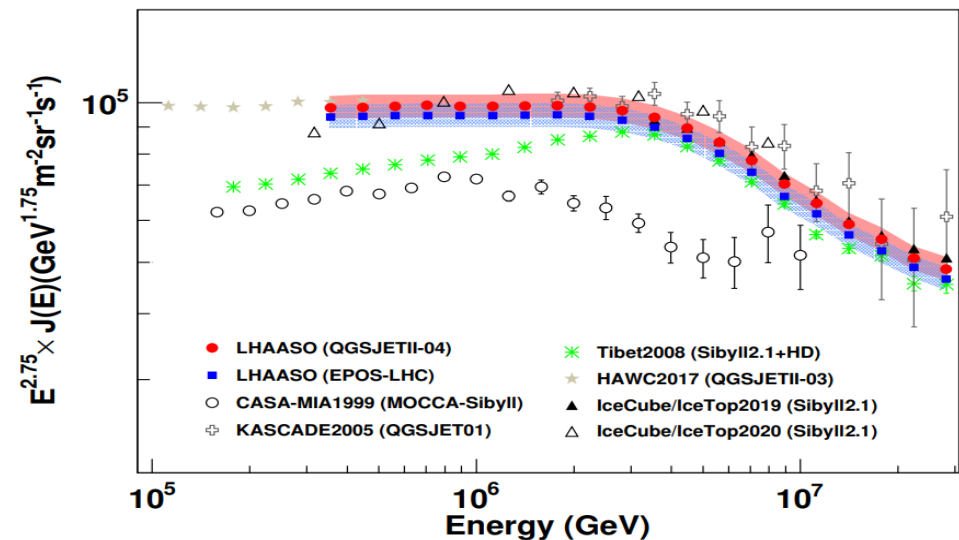
■ 0.3-30PeV最精确全粒子能谱

■ 0.3-30PeV最精确平均质量数

■ 发现新结构暗示膝区由轻成分主导

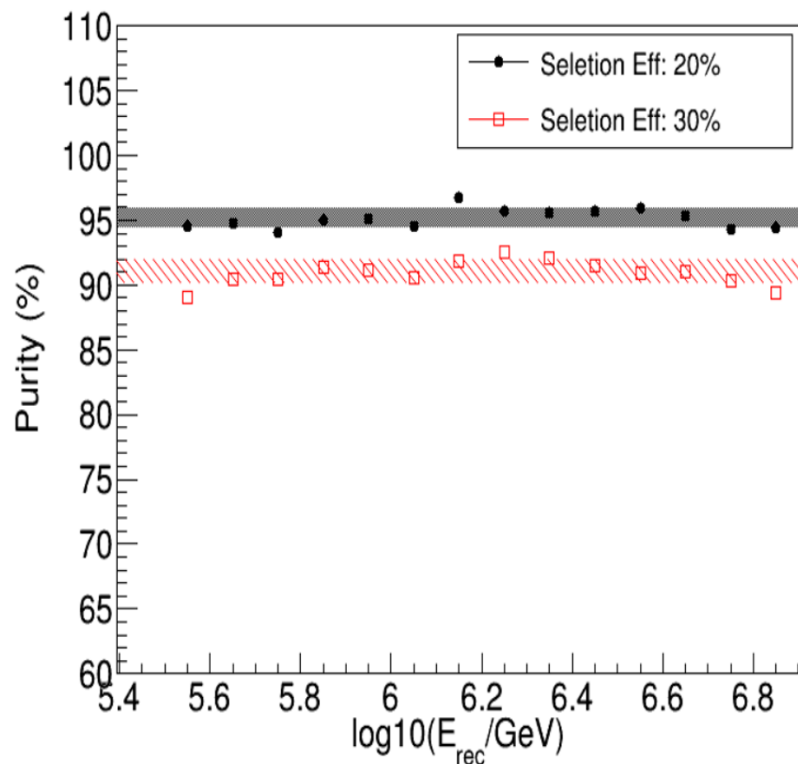
■ PRL编辑推荐论文

LHAASO coll. **PRL**, 132, 131002 (2024)

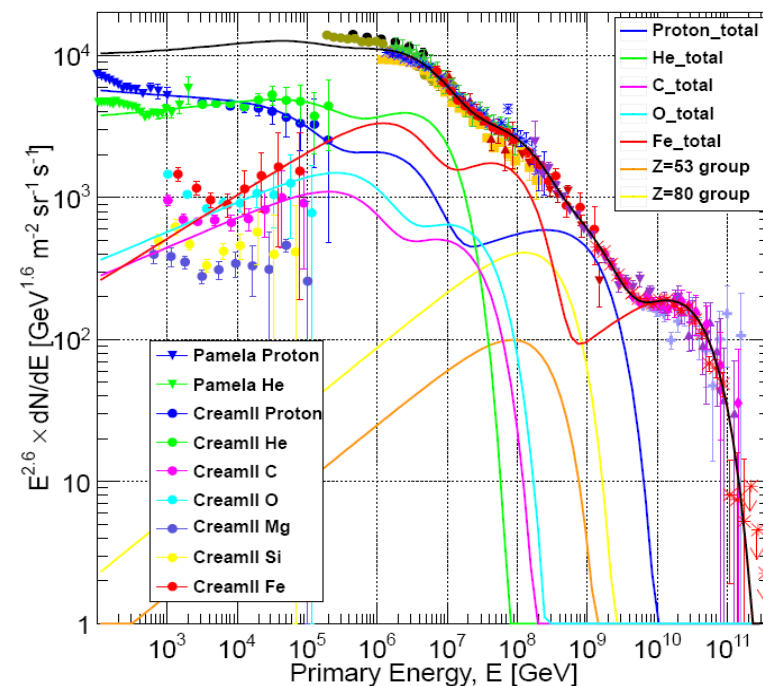
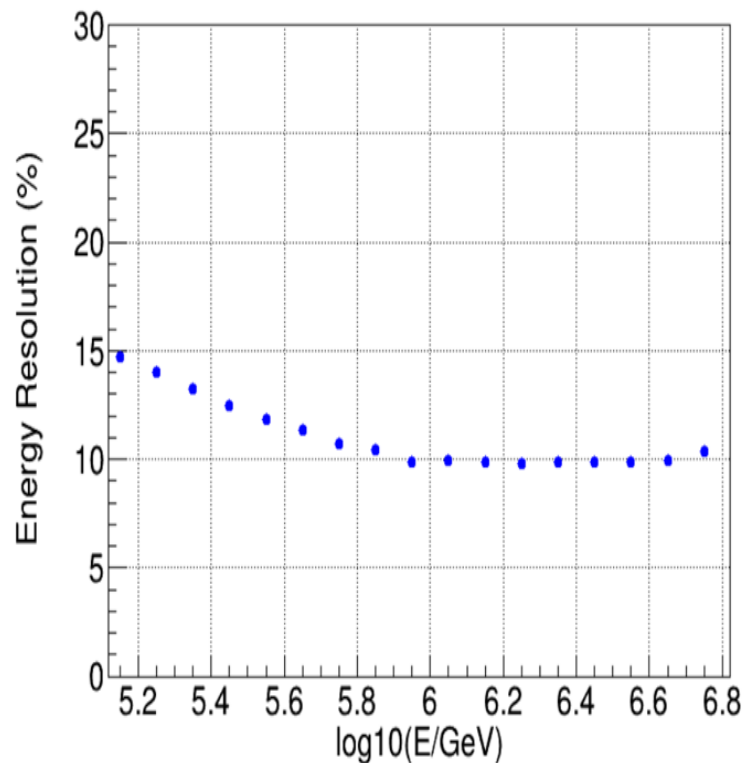


LHAASO对宇宙线成分能谱测量能力

■ 质子纯度 90-95%



■ 能量重建精度 10-15%



Gaisser 2013

LHAASO将在膝区进行**最干净、最精确**轻核能谱测量，揭示**膝区成因**提供关键证据！



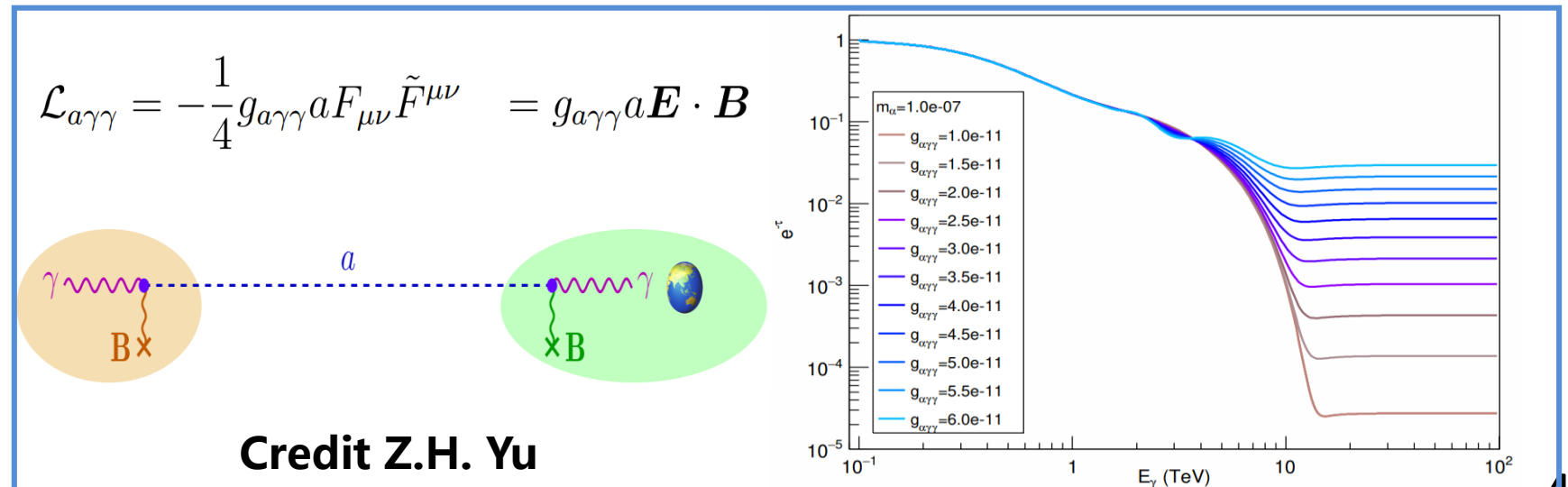
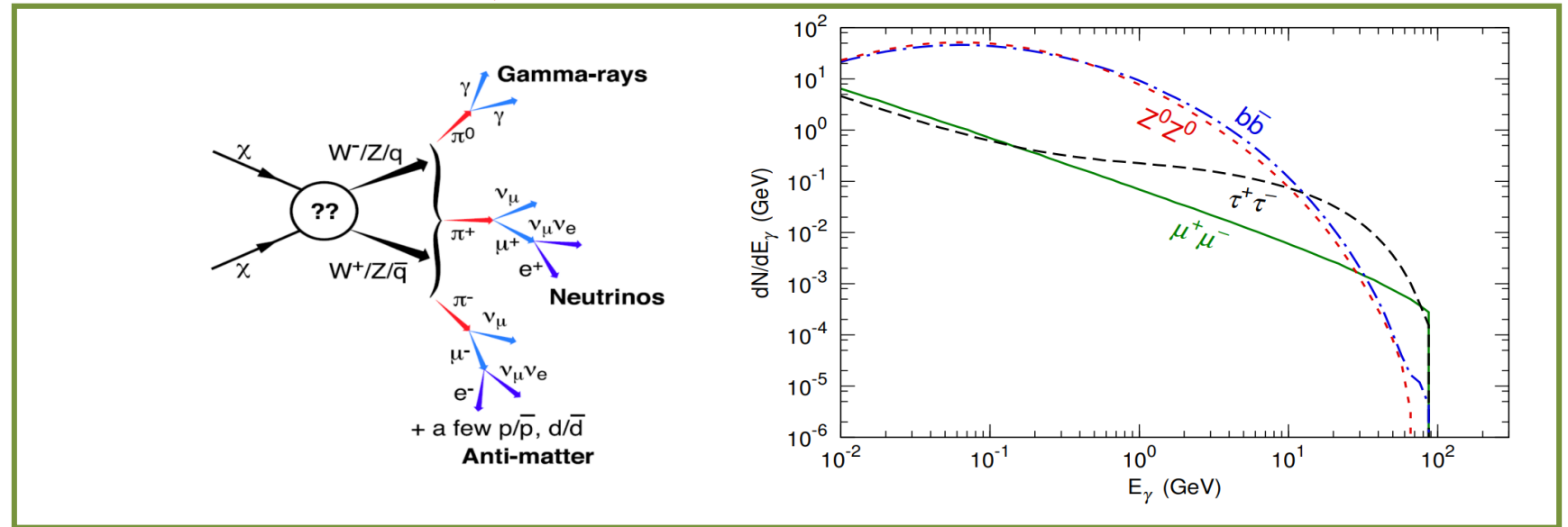
四、LHAASO对新物理研究进展

暗物质间接探测

- 暗物质衰变
- 暗物质湮灭
- 暗物质震荡

■ 目标天体

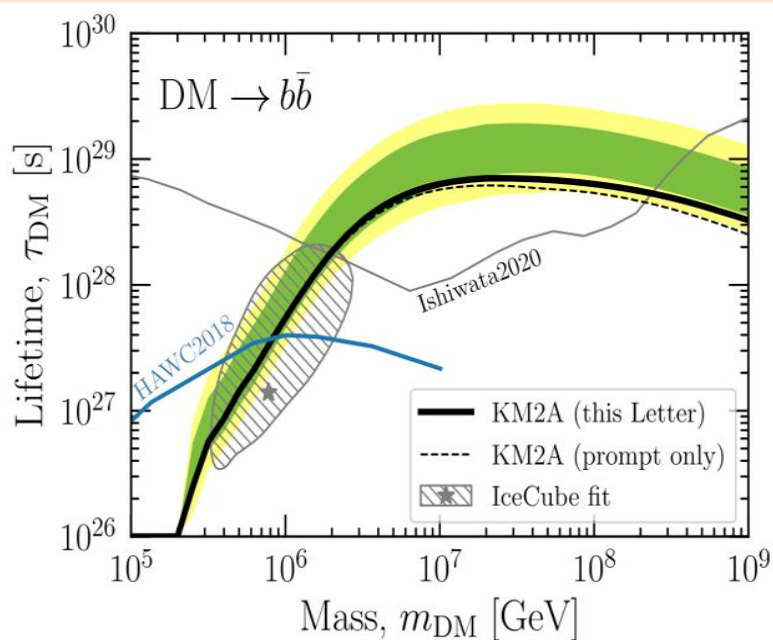
- 临近矮星系
- 银心
- 银晕
- 暗物质子结构
- 河外天体



LHAASO对暗物质探索

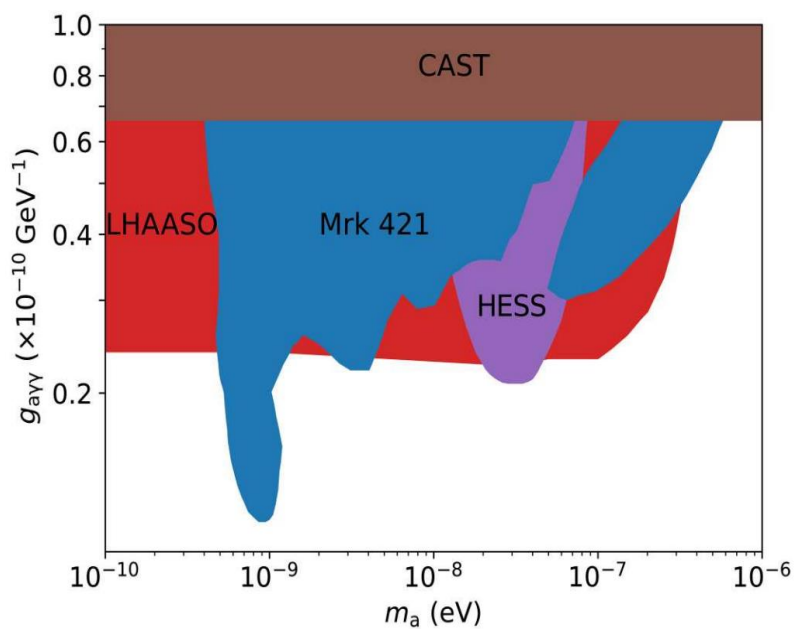
银晕超高能伽马观测

超重暗物质粒子寿命最强限制
($> 10^{21}$ 年)



PRL 129:261103(2022)

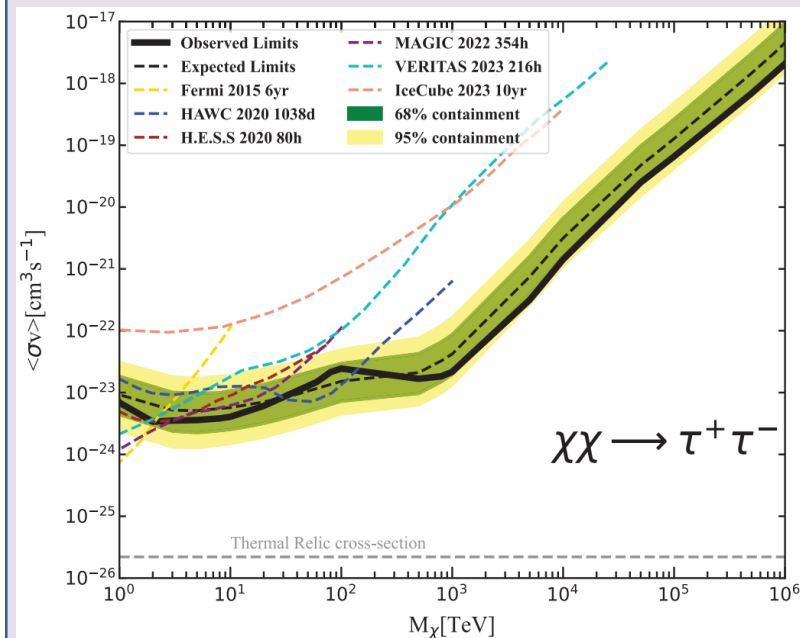
河外背景光对高能伽马吸收 对轴子与光子转换系数较强限制



Science Advances 9:eadj2778 (2023)

临近矮星系伽马观测

超重暗物质湮灭截面最强限制

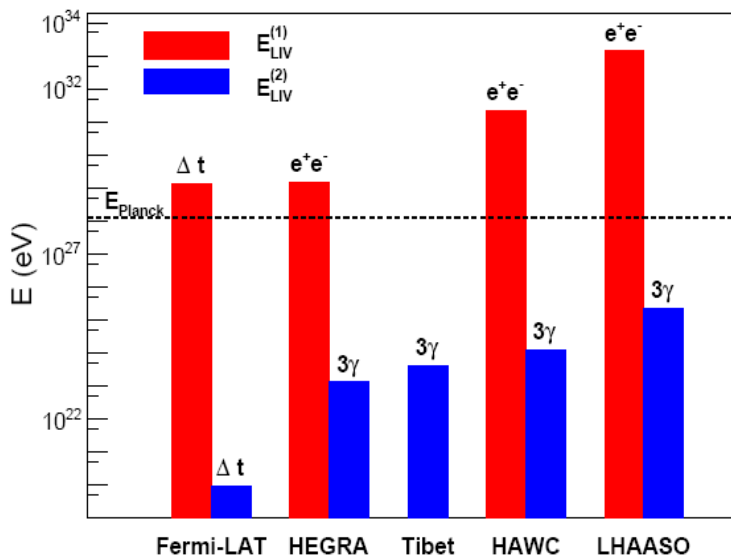


PRL 133:061001 (2024)

LHAASO洛伦兹对称性破缺的探索

高能光子衰变 (PeV光子)

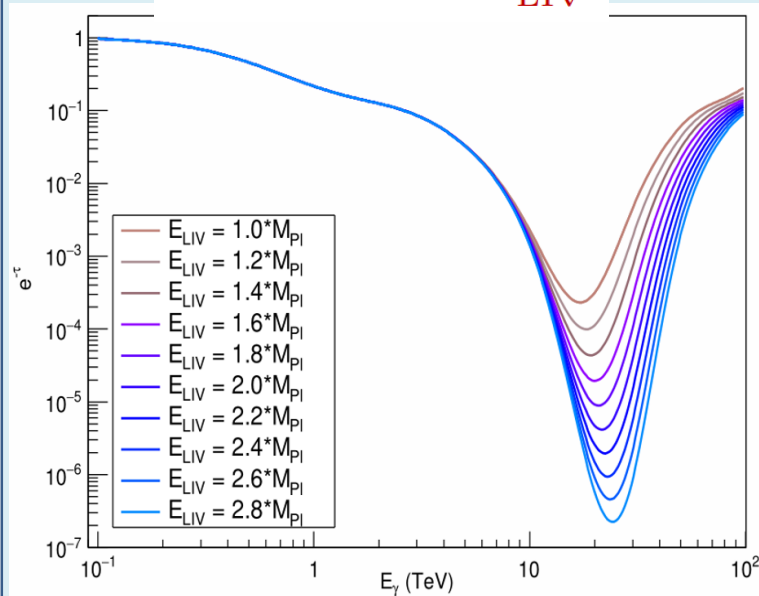
$$E_\gamma^2 - p_\gamma^2 = \pm |\alpha_n| p_\gamma^{n+2}$$



PRL 128:051102(2022)

伽马光子被背景光吸收的减少 (EBL)

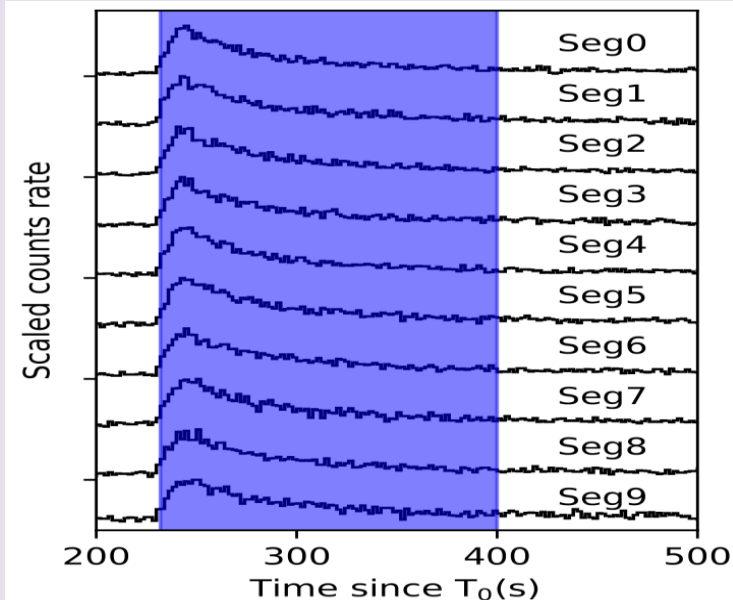
$$\epsilon_{thr} = \frac{m_e^2}{E} + \frac{E^2}{8E_{LIV}^{(1)}}$$



Science Advances 9:eadj2778 (2023)

光子速度随能量变化 (时延)

$$\Delta t_{LIV} = s \frac{n+1}{2} \frac{E_h^n - E_l^n}{E_{QG,n}^n} \int_0^z \frac{(1+z')^n}{H(z')} dz'$$



PRL in press, arXiv:2402.06009

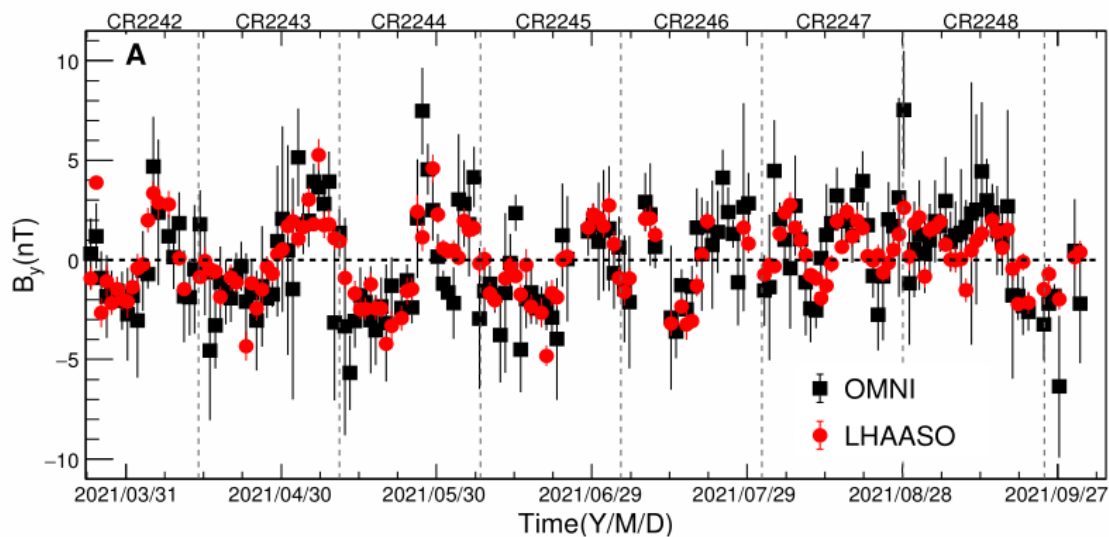
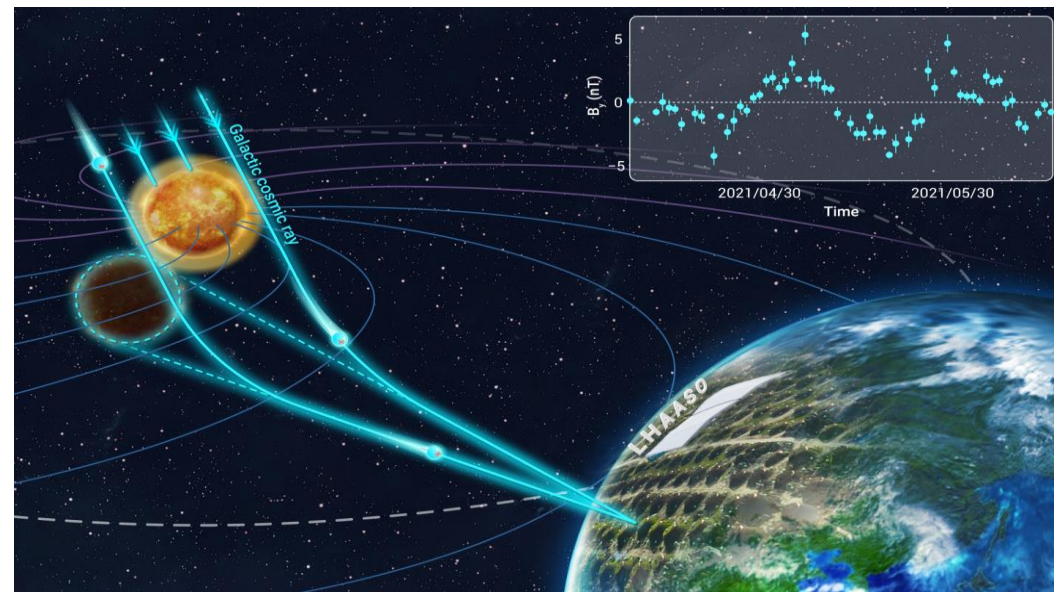


五、LHAASO对交叉学科研究进展

预报式测量日地空间磁场

- 实现首次每天测量太阳宇宙线阴影
- 提前地球轨道卫星3.3天定量测量日地空间磁场强度
- 显著偏离现有行星际磁场模型预期
- 可以为空间天气研究提供重要信息

The innovation, in press (2024)





六、小结与展望

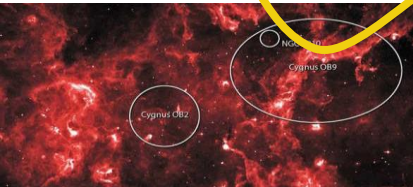
基于LHAASO全方位研究宇宙线相关问题

宇宙线起源候选天体

脉冲星
风云



年轻
大质量
星团



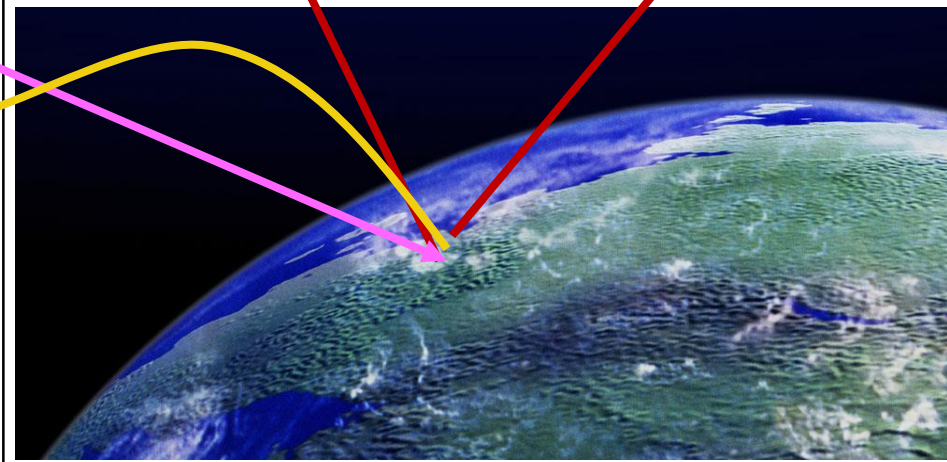
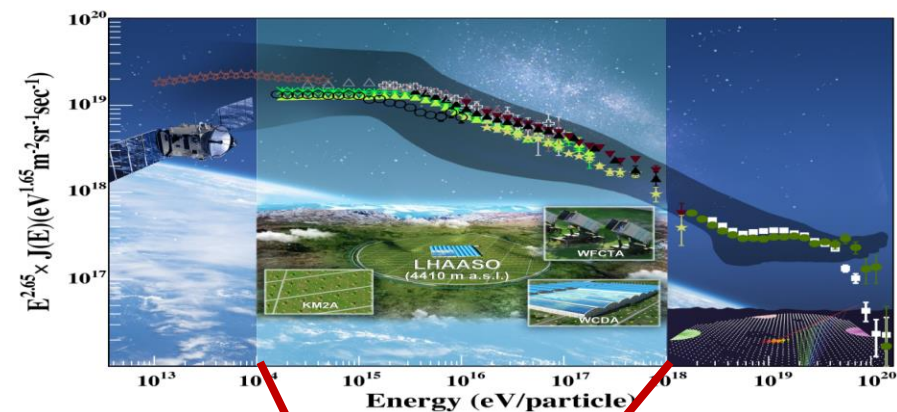
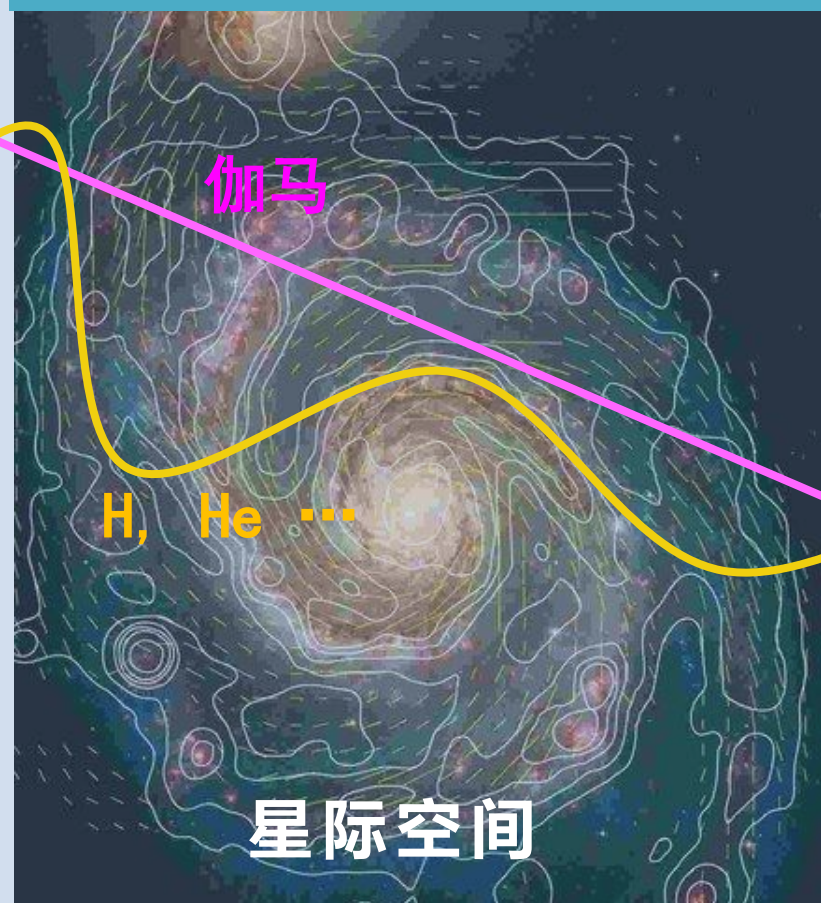
超新星
遗迹



微类
星体



起源天体和加速 (伽马射线) → 银河系内分布 (伽马射线) → 地球宇宙线测量 (宇宙线)



基于LHAASO的物理研究

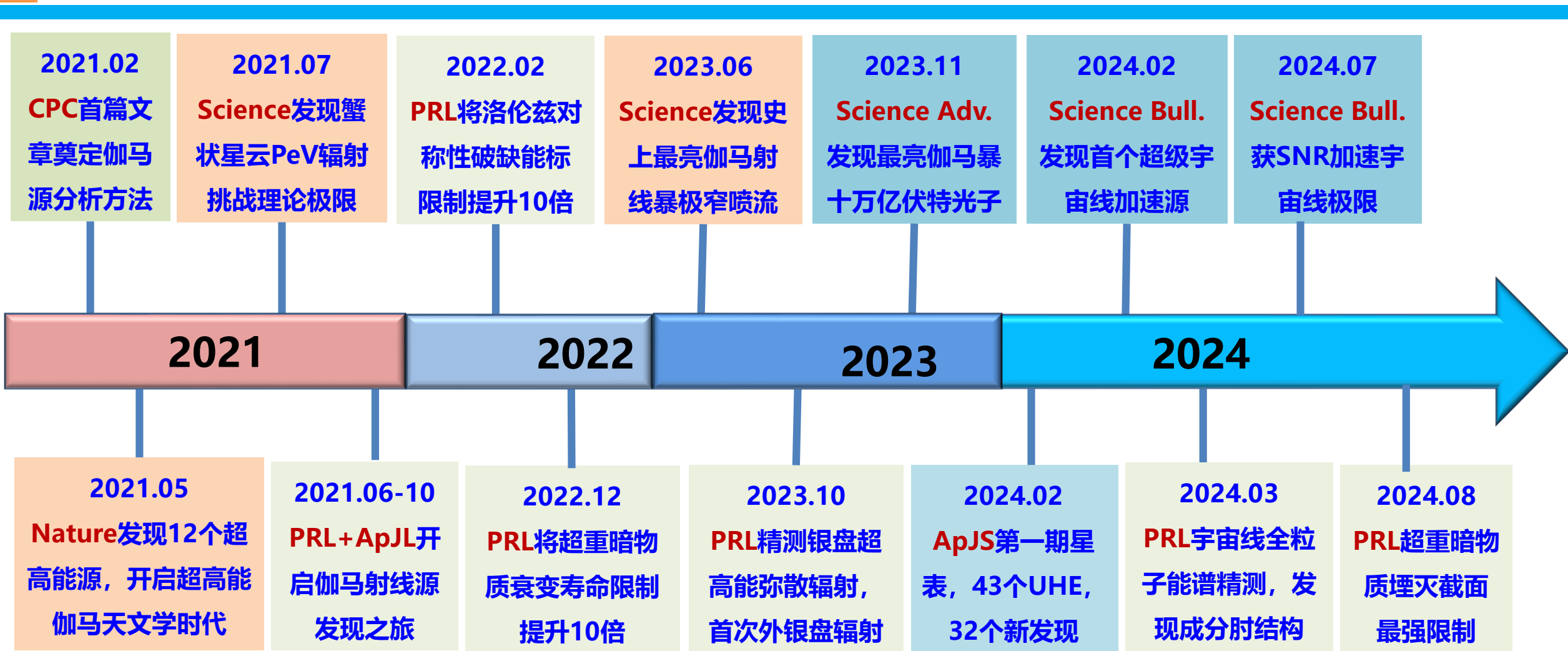
伽马射线天文

- 伽马射线源巡天: V0星表、V1星表、V2星表、.....
- 银河系内伽马源: PWN、Pulsar Halo、YMC、SNR、Micro quasar、Binary、Pulsar、Nova、.....
- 银河系外伽马源: GRB、EBL、AGN、Starburst
- 银河系弥散伽马辐射: 内银盘、外银盘、高银纬
- 前沿新物理: LIV、暗物质

宇宙线物理

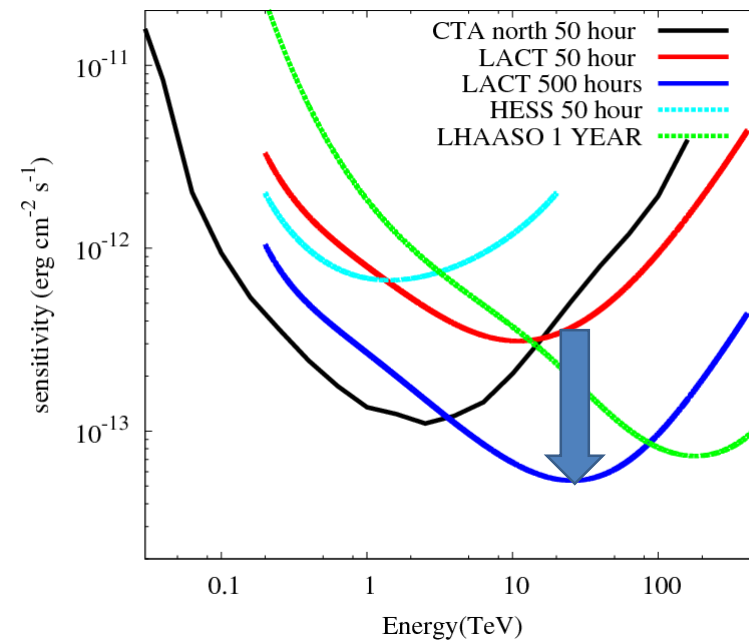
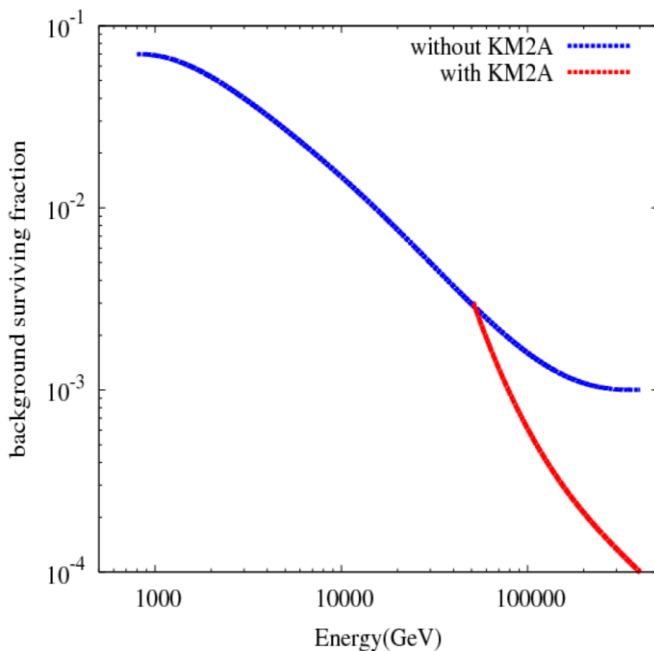
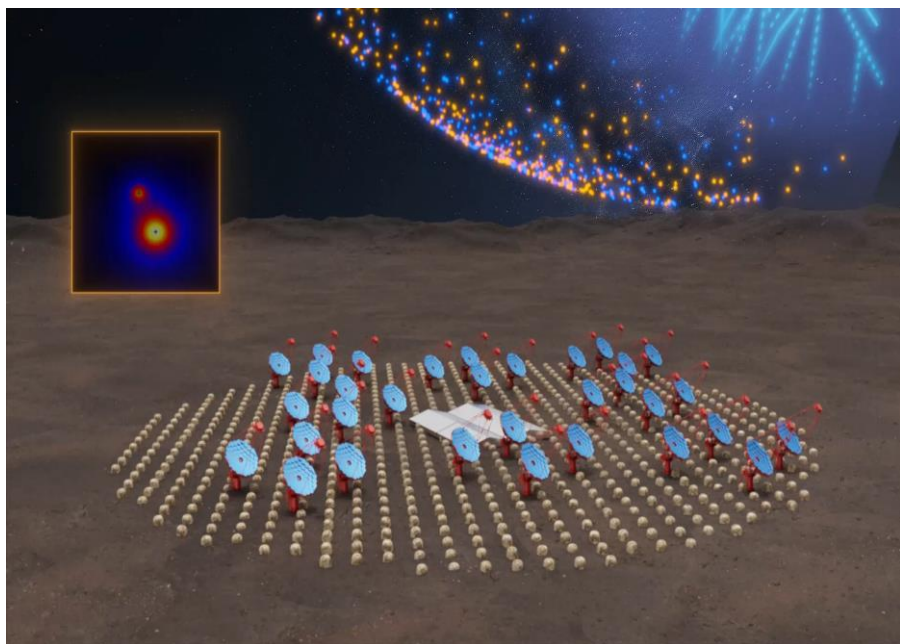
- 宇宙线能谱: 全粒子谱、质子谱、轻核谱、重核谱
- 宇宙线各向异性: 全成分各向异性、分成分各向异性
- 粒子物理: 作用截面
- 太阳物理: 行星际磁场、太阳磁场、空间天气
- 大气物理: 宇宙线与雷电

LHAASO的物理成果



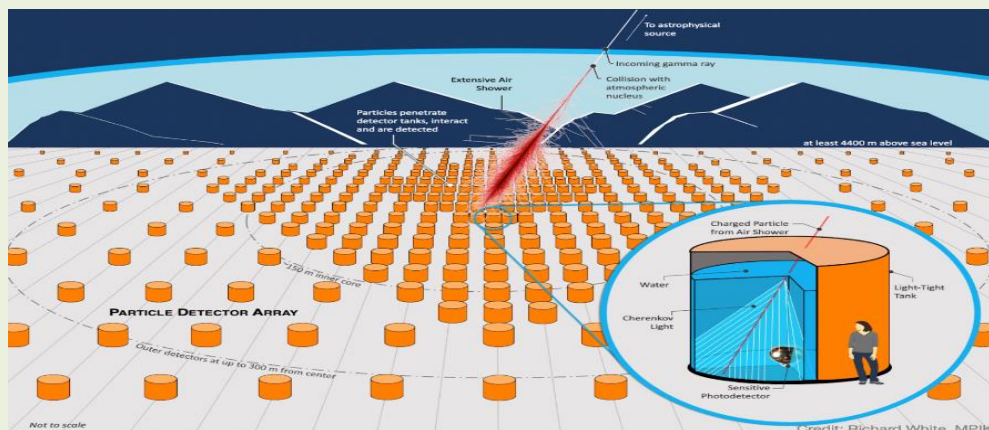
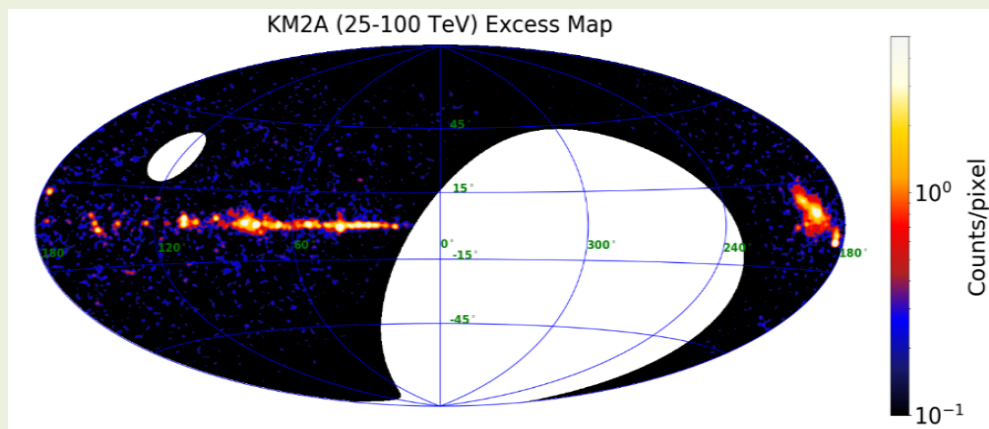
展望: LHAASO升级计划LACT

- LACT 提升角分辨 $< 0.05^\circ$
- LACT + KM2A 缪子阵列 \rightarrow 提升伽马挑选
- 建设周期: 2024.10 – 2028.9

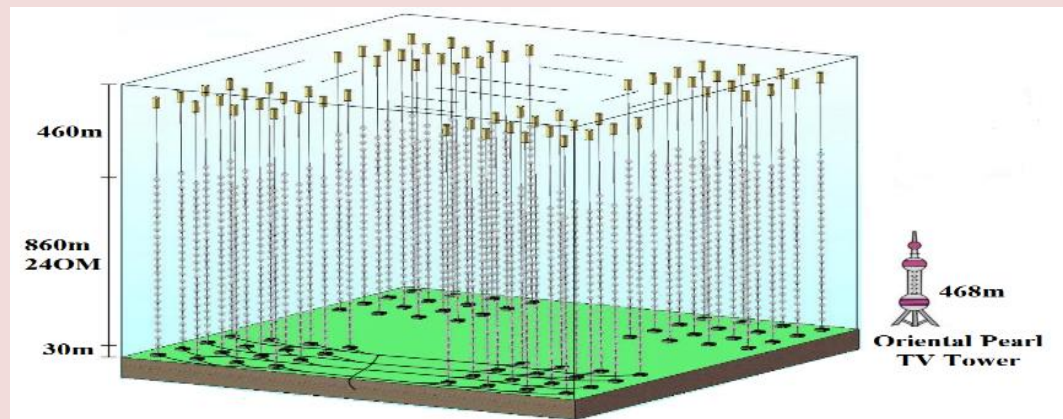


展望：未来计划

南方宽视场伽马天文台SWGO



高能水下中微子望远镜HUNT



**诚挚感谢高能物理学会同仁对LHAASO长
期以来的关心、帮助和支持！**

