

“LHAASO 天体辐射与宇宙线成分谱观测研究及新探测技术研究” 课题三

河外TeV伽马射线源观测 及其物理性质研究

报告人：邢祎

课题承担单位：中国科学院上海天文台

课题参与单位：中国科学院高能物理研究所

国家重点研发计划2026年度会议，2026/08



报告提纲

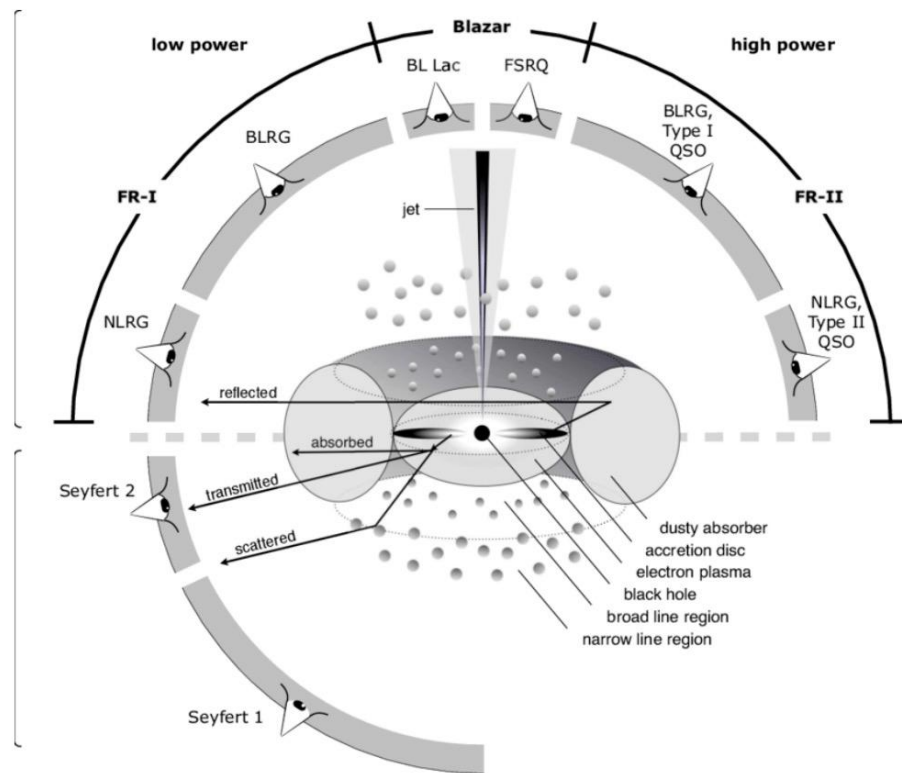
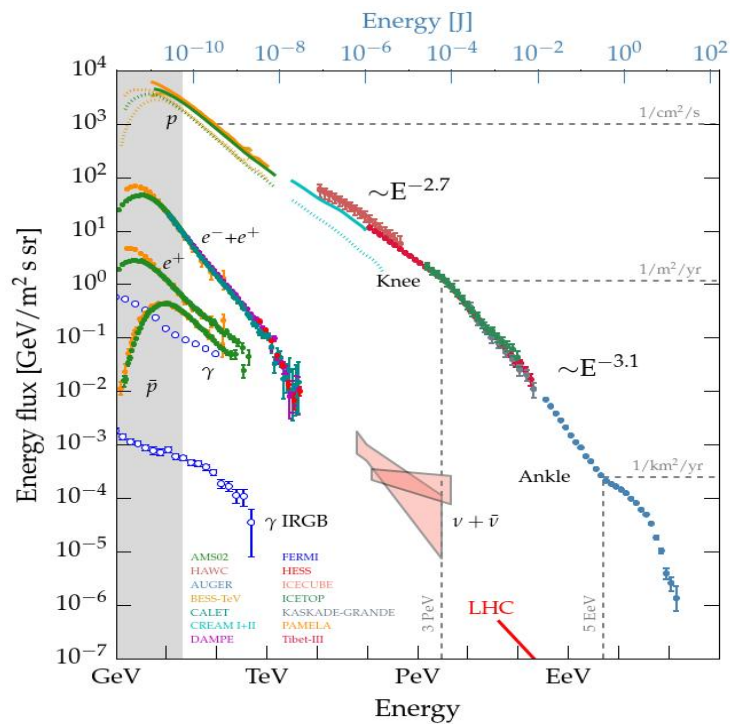
Contents

- 1 研究目标及研究内容
- 2 预期成果与研究计划
- 3 研究进展
- 4 下一年度研究计划
- 5 总结

1. 研究目标及研究内容

研究目标

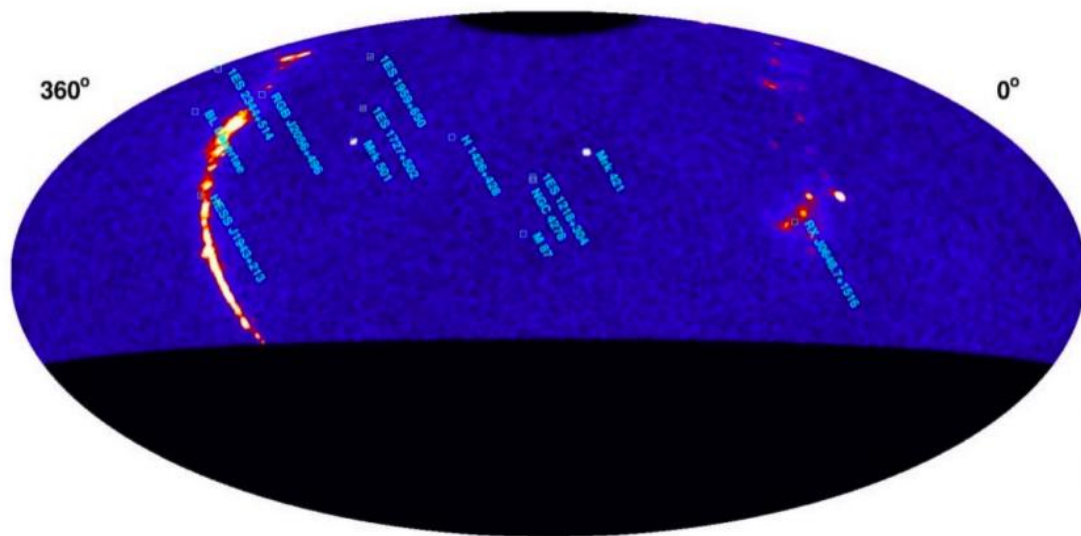
- 本课题将依托高海拔宇宙线观测站（LHAASO），对活动星系核（AGNs）、耀变体（blazars）等河外天体源开展观测，理解它们的物理机制和演化规律、黑洞及相对论性喷流等极端物理过程。
- 探索和研究河外甚高能（ >0.1 TeV, VHE）伽马射线辐射源对于理解极高能宇宙线起源、膝区结构成因至关重要。



1. 研究目标及研究内容

研究内容

- ① 充分利用LHAASO优势（大视场、全天观测、高灵敏度），对河外TeV辐射源进行系统性搜寻探测。
- ② 精确测量河外TeV辐射源的能谱及光变，依据测量结果、并结合多波段数据分析结果，研究它们的TeV伽马射线辐射起源和光变起源。
- ③ 利用LHAASO河外源测量红外宇宙背景光（EBL），深入理解星系演化历史。



2. 预期成果与研究计划

- **执行时间：**2024 年 12 月-2029 年 11 月，中期考核时间：2027 年 7 月。
- **预期成果：**对河外TeV辐射源进行巡天普查，探测河外伽马射线源增加至20个及以上，发布LHAASO河外伽马射线源表；获得不少于10个河外TeV伽马射线源的时变现象和能谱等关键信息，研究其物理性质和演化规律。
- **研究计划安排：**
 - ① **原定2026年研究计划：**
 - 完成对天体源1ES 1959+650、Mrk 421、Mrk 501、IC 310的精确测量工作。
 - 完成一期河外源源表相关工作。
 - ② **中期考核前：**
 - 发布LHAASO一期河外伽马源源表，包括天体源约17个。
 - 完成4-6个天体源的细致分析与辐射机制研究。
 - 完成河外背景光（EBL）首轮测量。
 - ③ **结题验收前：**
 - 发布LHAASO二期河外伽马源源表，包括天体源不少于20个。
 - 完成不少于10个天体源的细致分析与辐射机制研究。
 - 完成EBL第二轮测量。



3. 研究进展

研究进展总体概览

- 巡天观测：样本更新至18个TeV河外源
- 精细测量：已完成7个TeV河外源的精细能谱及时变测量（含立项时已完成的3个）
EBL测量—已有初步结果
- 方法进展：WCDA目标源实时监测稳定运行
全天监测系统测试中
AI赋能
- 科学产出：1篇已发表（Mrk 421; Cao et al., 2026, ApJS, 285, 36）
1篇已投稿（1ES 1959+650; Cao et al., 2026, submitted to ApJL）
3篇即将投稿



3. 研究进展

河外源巡天普查：样本规模持续增长

- 基于1180天WCDA数据更新河外TeV辐射源样本：

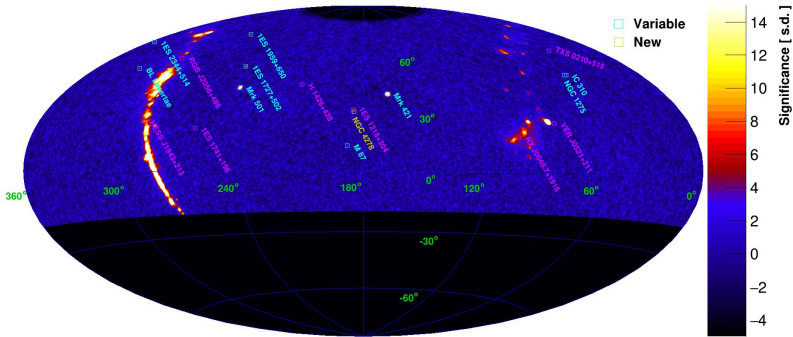
- 列表源数：18个
- 显示时变：10个

- 一期河外源源表

- 相关工作基本完成，准备发布

- 观测数据积累驱动精细测量：

- Mrk 421（已发表）
- 1ES 1959+650（已投稿）
- IC 310
- Mrk 501



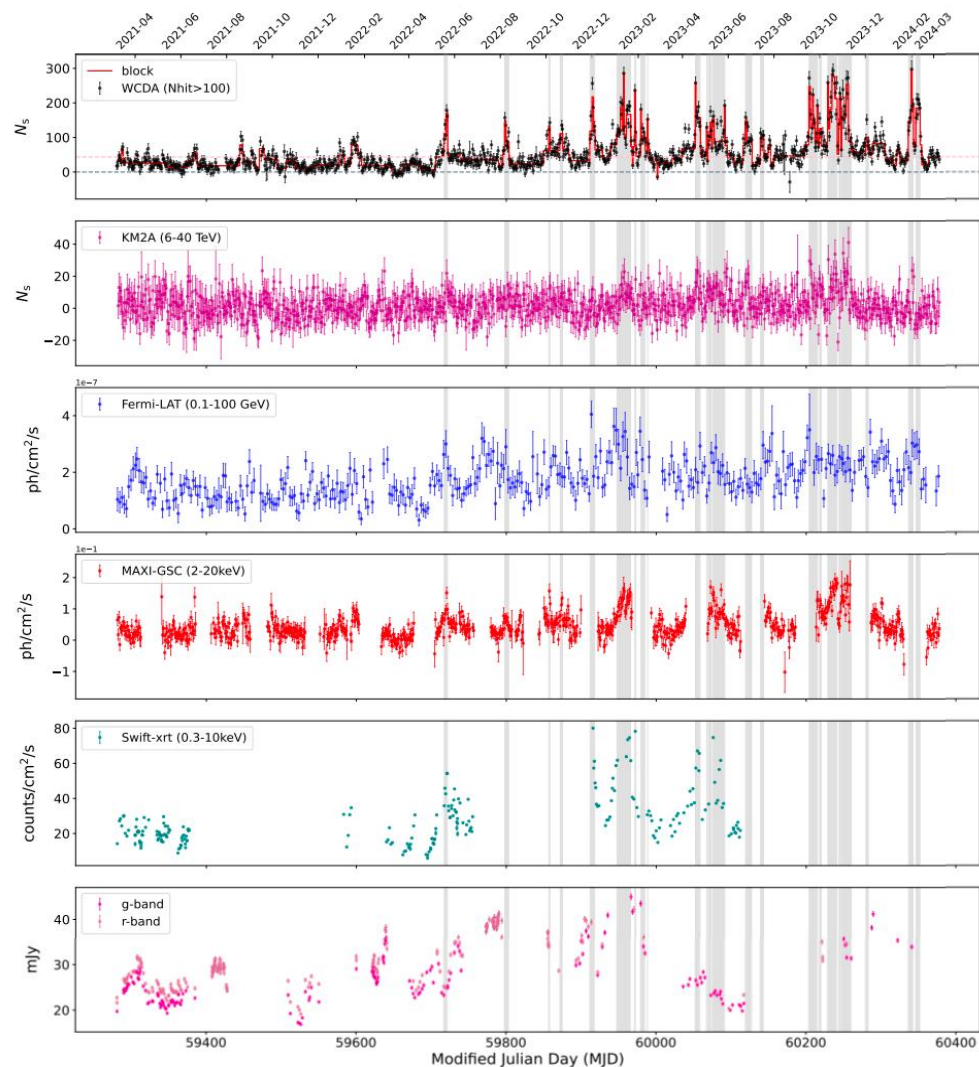
updated extragalactic sources @ 1180 days

Total number : 18
Variable : 10

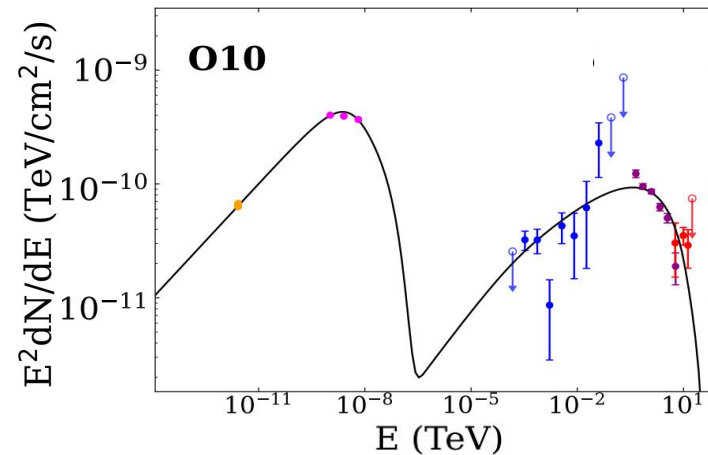
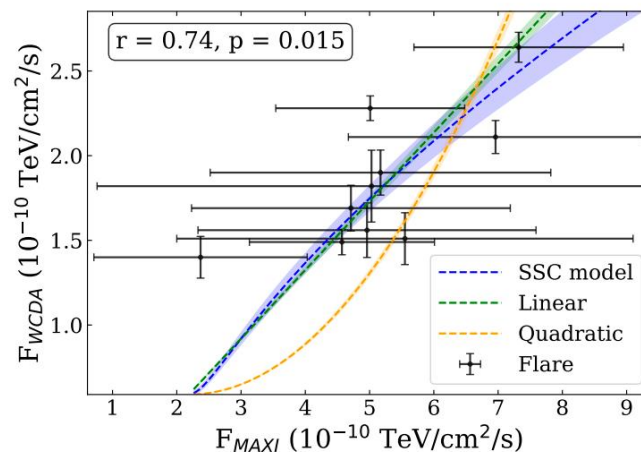
➢ Preliminary results

ID	Name	Type	RA	DEC	Sig	Dist [deg.]	Z	Variability	Time scale
1	NGC 4278	LLAGN	185.05	185.05	8.71	0.03	0.0038	✓	Months
2	M 87	FRI	187.75	12.45	8.38	0.07	0.0044	✓	Days
3	IC 310	Unknown type	49.05	41.25	-/22σ	<0.1	0.0189	✓	Days
4	NGC 1275	FRI	49.95	41.45	-/8σ	<0.1	0.0175	✓	Days
5	Markarian 421	HBL	166.05	38.15	221.38	0.05	0.031	✓	Days to months
6	Markarian 501	HBL	253.45	39.75	92.54	0.02	0.034	✓	Days to months
7	1ES 1727+502	HBL	262.05	50.15	12.08	0.07	0.055	✓	Days
8	1ES 1959+650	HBL	299.95	65.15	11.33	0.02	0.048	✓	Days
9	HESS J1943+213	HBL	295.95	21.35	10.34	0.06	~0.2		
10	1ES 2344+514	HBL	356.75	51.75	9.33	0.04	0.044	✓	Days to weeks
11	1ES 1218+304	HBL	185.25	30.05	8.54	<0.1	0.182		
12	RX J0648.7+1516	HBL	101.75	15.15	7.34	<0.1	0.179		
13	H 1426+428	HBL	217.05	42.55	6.86	<0.1	0.129		
14	RGB J2056+496	Blazar	314.25	49.65	6.71	0.05	?		
15	1ES 1741+196	HBL	266.05	19.55	5.97	0.05	0.084		
16	TXS 0210+515	HBL	33.55	51.75	5.60	0.01	0.049		
17	BL Lacertae	IBL	330.75	42.15	7.79	<0.1	0.069	✓	Days
18	VER J0521+211	IBL	80.45	21.05	5.28	<0.1	?		

3. 研究进展



Mrk 421



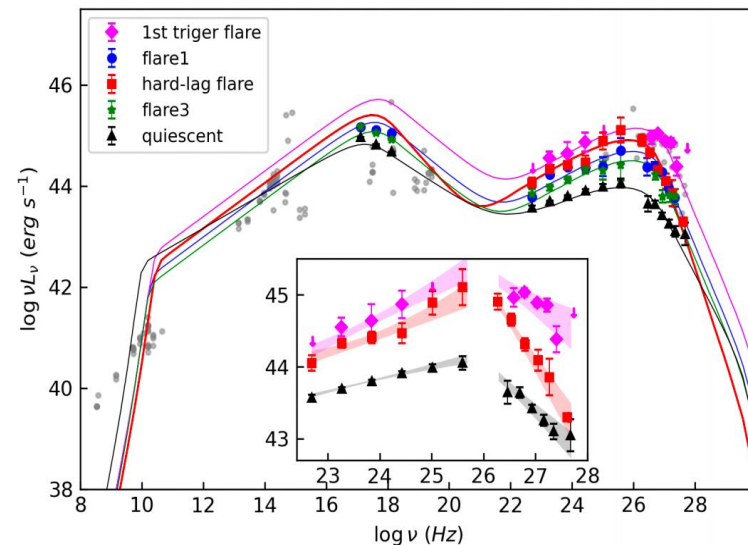
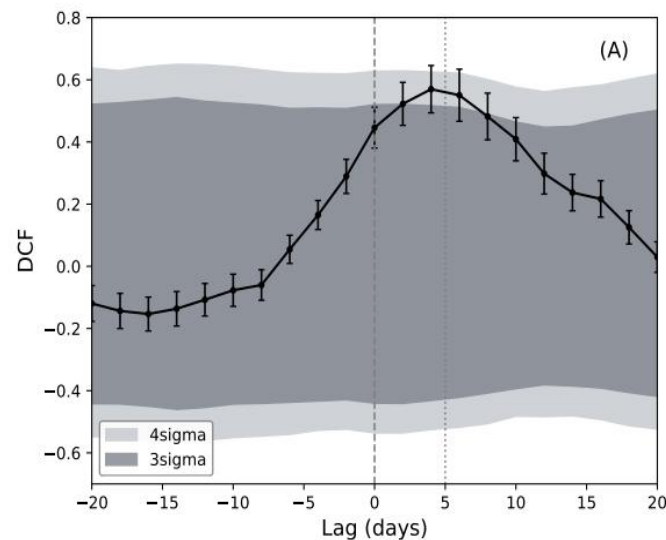
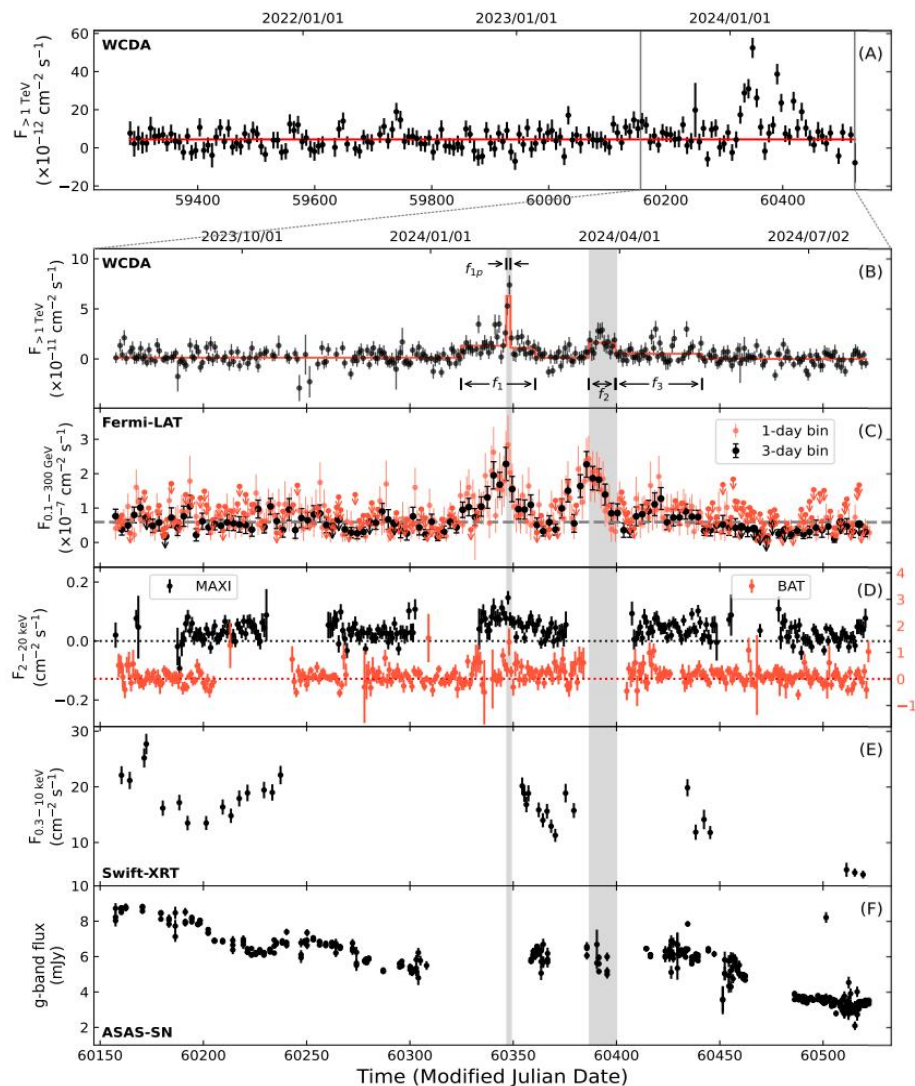
➤ WCDA连续观测（2021.4-2024.4）：

- 3年识别到23次耀发（0.4-20 TeV），持续时间为1-19天
- 最高日显著性 20σ （ ≈ 3.3 Crab）
- 宽能段时间相关性/能谱研究：单区SSC模型及能量耗散模式

➤ LHAASO-WCDA观测优势在耀变体研究中起到重要作用

3. 研究进展

1ES 1959+650



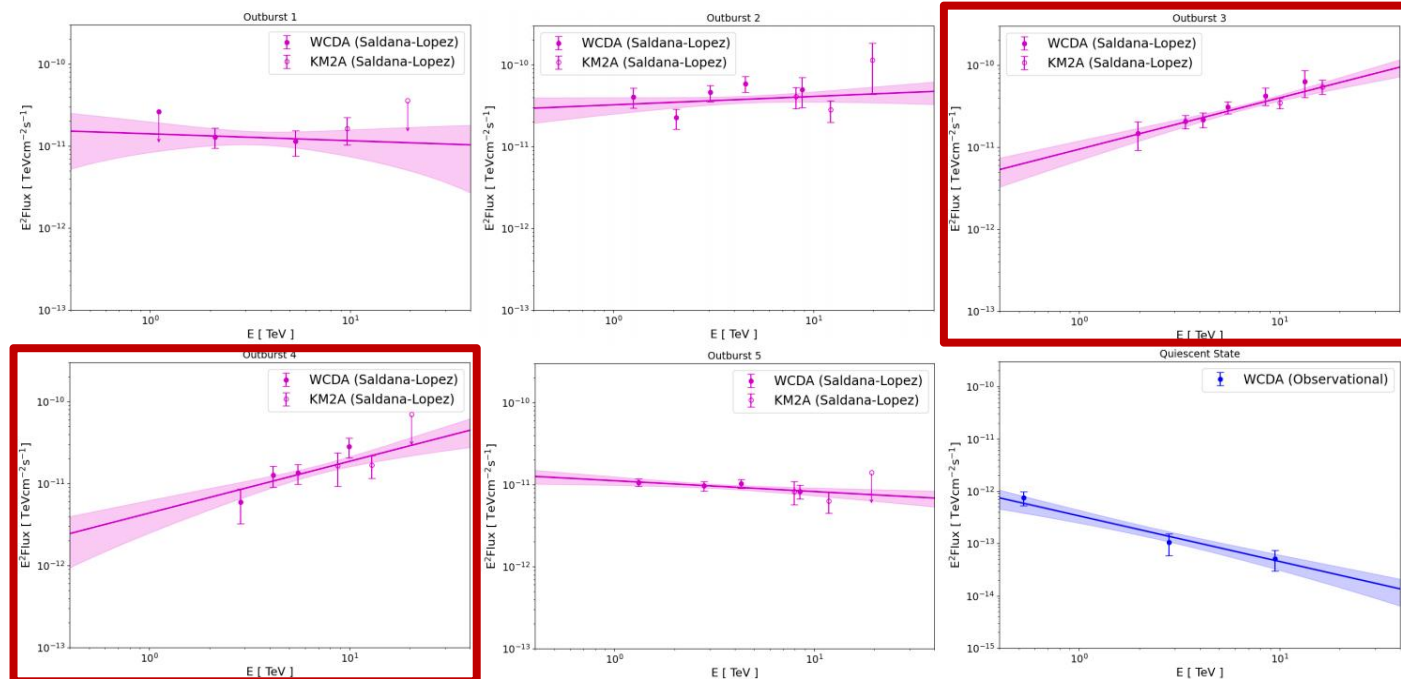
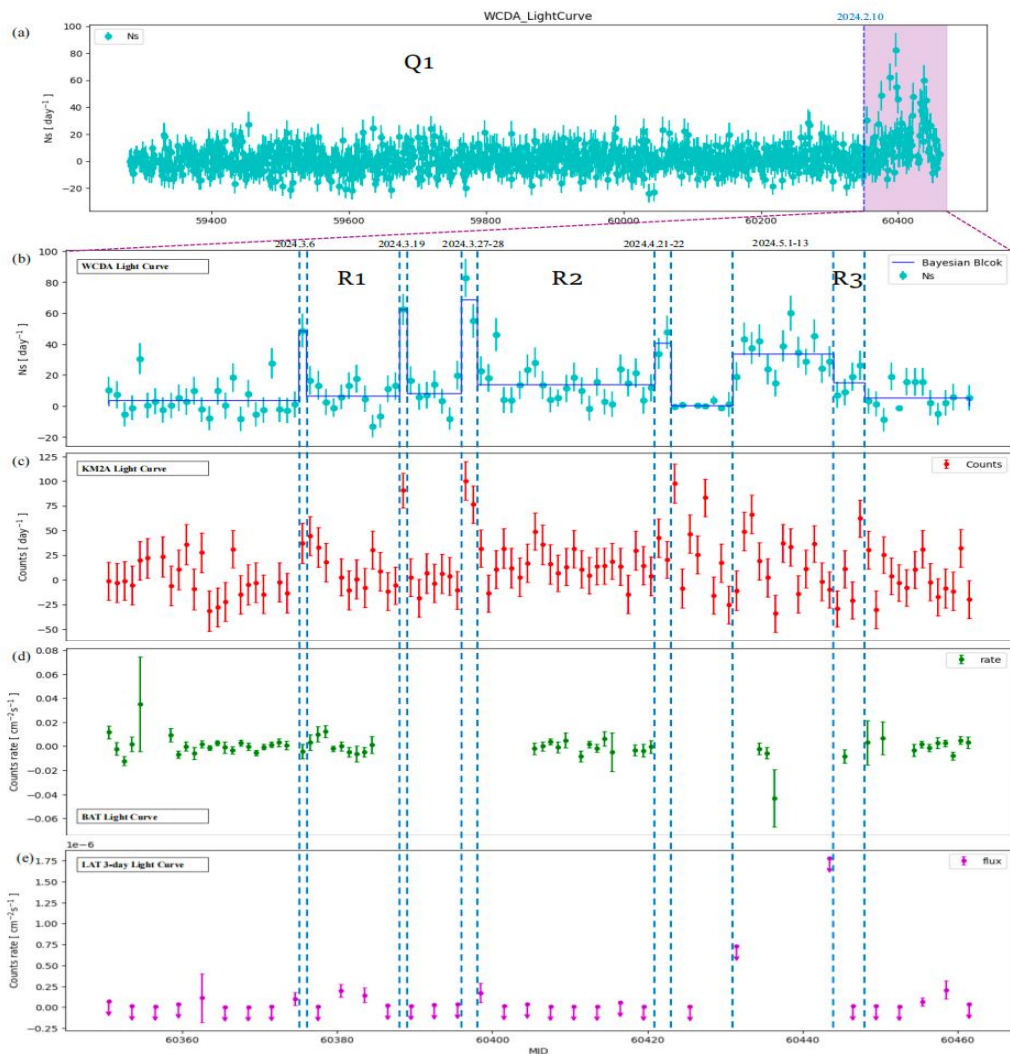
➤ 发现日尺度硬延迟现象:

- 2024年WCD A识别到3次耀发
- 多波段观测结果表明，第二次耀发具有日尺度硬延迟，TeV辐射相对于GeV辐射晚出现约5天 (3.4σ)
- 粒子持续加速、传播、多个辐射区演化

➤ 这一少见现象为研究喷流内部的粒子演化提供了新的观测证据

3. 研究进展

IC 310



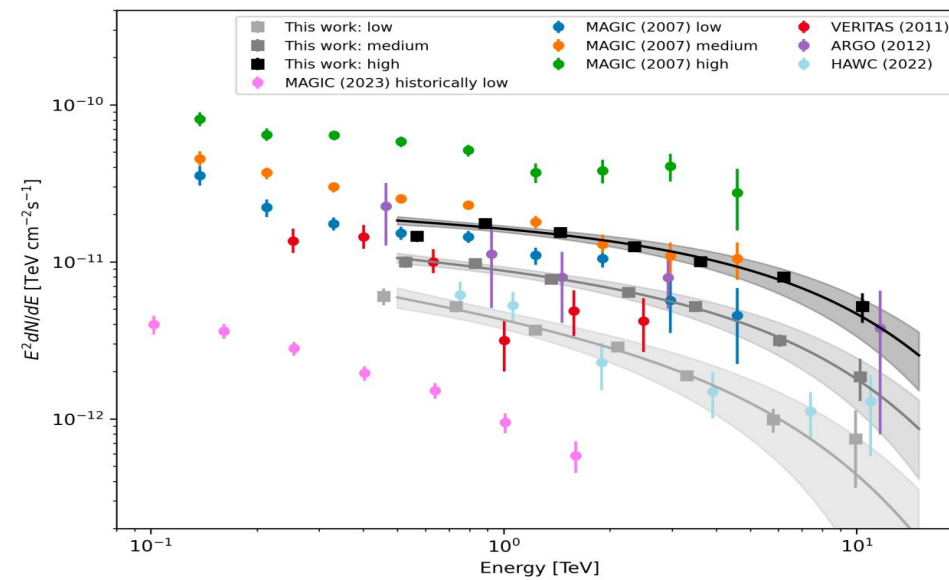
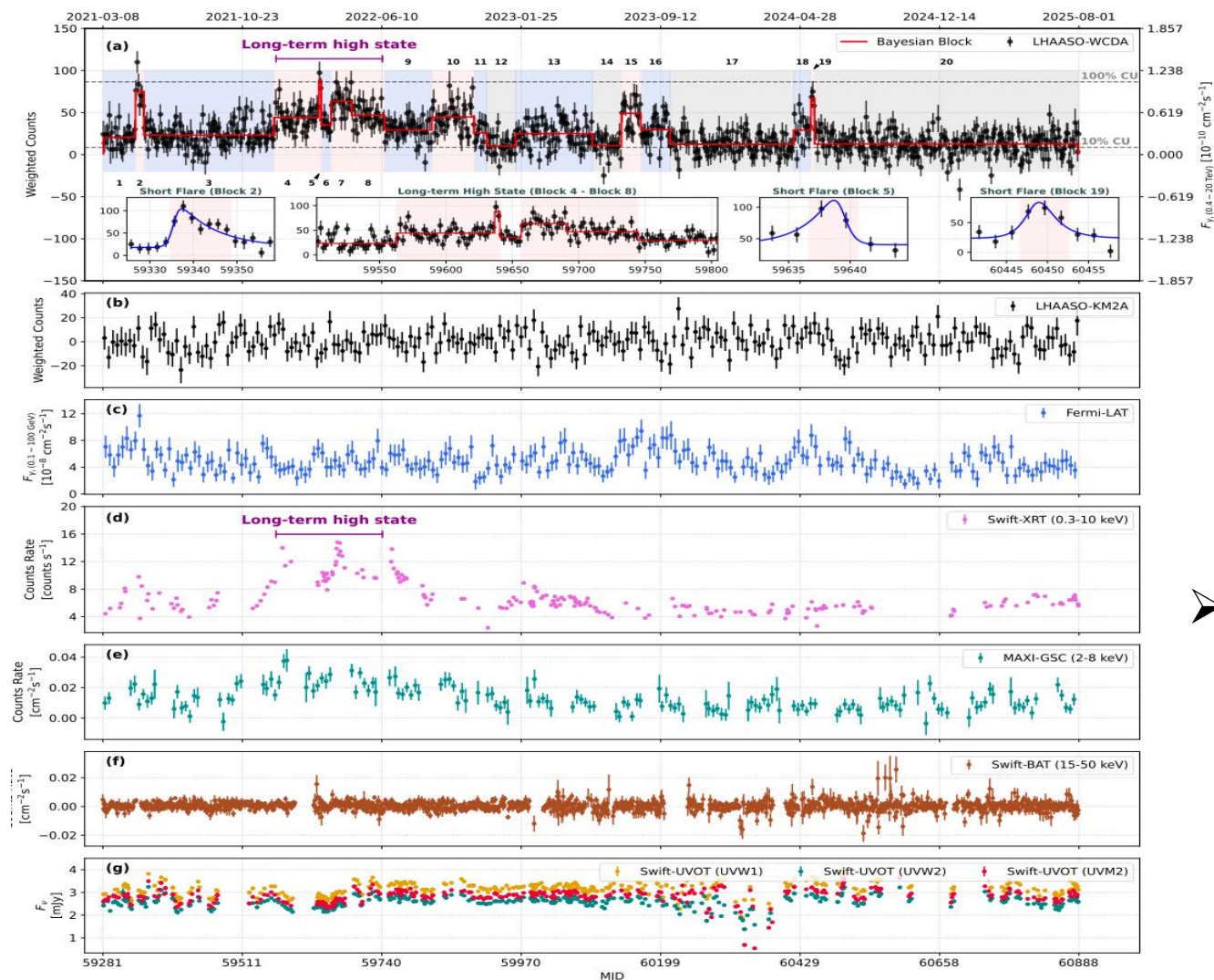
➤ 活跃期WCDa-KM2A联合观测：

- 2024年3月至5月，5次TeV耀发总体显著性 36.5σ
- 部分耀发本征光子谱指数硬至约1.4，辐射延伸到20 TeV以上

➤ 已知能谱最硬的河外TeV辐射源之一，挑战标准单区模型

3. 研究进展

Mrk 501



➤ WCDA连续观测 (2021.3-2025.7):

- WCDA整体探测显著性达到 90σ
- 20个活动区间，低、中、高三种活动状态；首次测得甚高能耀发占空比约为17.6%
- 能段之间光变相关性不同活动状态下的SED限制辐射区参数



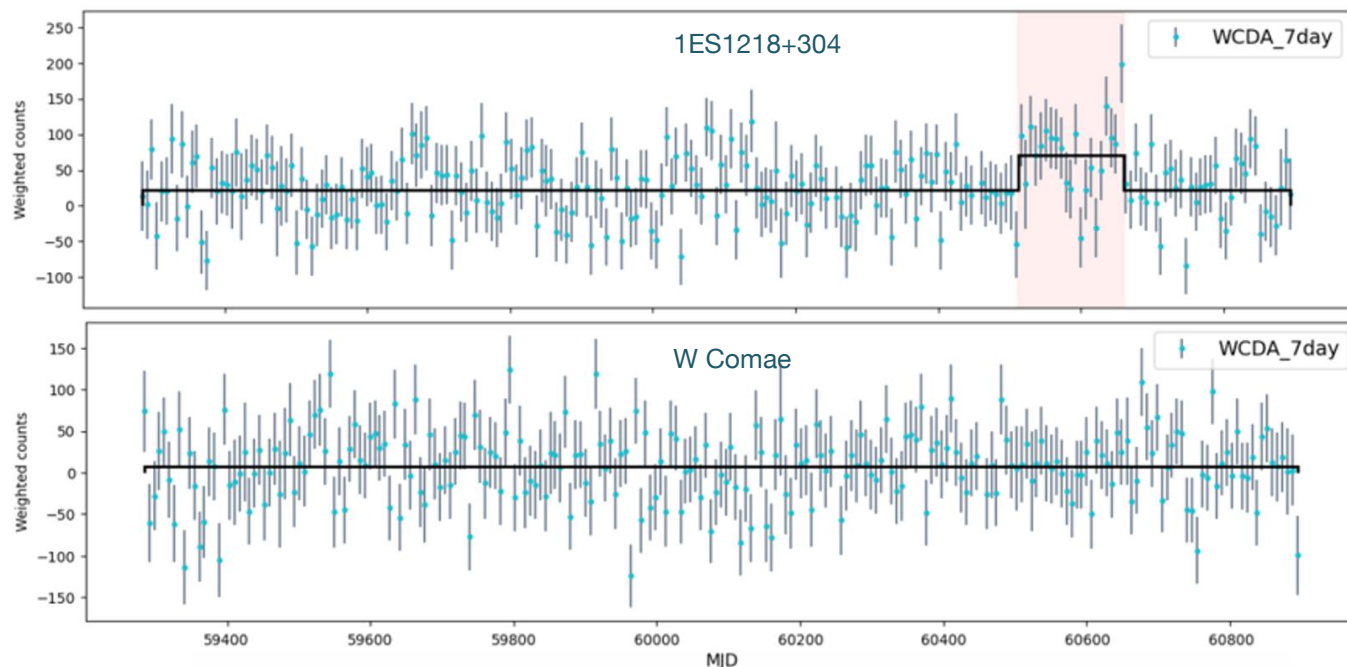
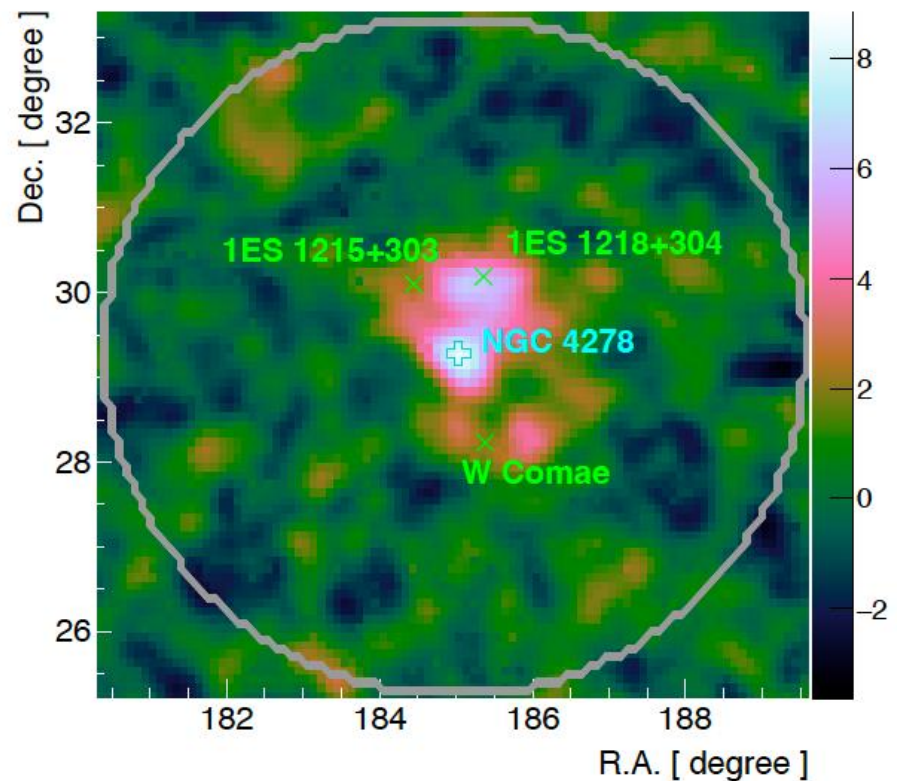
3. 研究进展

9个TeV辐射源精确测量

源名称	WCDA观测初步结果
NGC 4278区域 (1ES 1215+303、1ES 1218+304、NGC 4278、W Comae)	1ES 1218+304达到14.7 σ ，并识别出一次8.3 σ 耀发；W Comae达到4.1 σ ，与IACT位置相距约0.23°；同步分析。
BL Lacertae	超过4年数据中达到约9 σ ；识别4次耀发，持续时间从2天到6个月，其中第4次耀发流强为历史最高；多波段数据提示第3次耀发可能存在SED演化。
RX J0648.7+1516	基于2021.03–2026.03数据，持续显著性约5 σ ；能谱指数约3.3。
RGB J2056+496	观测TS=30；尚未发现显著耀发。源位置同时接近未知红移耀变体和微类星体候选体LS III +49 13，源对应关系仍需研究。
H 1426+428	观测TS=133，能谱指数约3.5；未发现显著耀发，SED中尚未看到明确的逆康普顿峰。
HESS J1943+213	基于2021.03–2025.01数据得到TS>25，整体能谱指数为3.19 $\pm$ 0.19；半年时间尺度光变未显示显著变化，正在利用AI辅助分析细化结果。
1ES 2344+514	获得WCDA长期光变和能谱，并与IACT历史观测进行比较；正在开展分时段能谱、HBL–EHBL演化及辐射模型研究。
1ES 1741+196	在1–20 TeV达到7.0 σ ，能谱指数2.4 $\pm$ 0.2；观测期内未发现高流强耀发。
TXS 0210+515	在1–20 TeV达到6.5 σ ，能谱指数2.2 $\pm$ 0.3；观测期内未发现高流强耀发。

3. 研究进展

NGC 4278 区域深度观测



➤ WCDA深度观测识别出4个TeV辐射源

- 1ES 1218+304整体显著性约 14.7σ ，单次爆发期间显著性约 8.3σ
- W Comae附近整体显著性约 4.1σ ，距离IACT位置 0.23°

➤ 同步分析正在进行

[Previous] [Next] [ADS]

LHAASO detects rapid variability of the TeV Gamma-ray Activity of BL Lacertae

Atel #16850; *Guangnan Xiang (SHAO, IHEP), Min Xia (IHEP), Zhiguo Yao (IHEP), Jianqiang Zhou (SHAO) and Yi Xing (SHAO) report on behalf of the LHAASO Collaboration*
on 8 Oct 2024; 01:23 UT
Credential Certification: Jianqiang Zhou (zjn@shao.ac.cn)

Subjects: Gamma Ray, TeV, UHE, AGN, Blazar, Variables

Referred to by Atel #: 16854, 16855, 16856, 16861, 16865, 16890

% Post

Utilizing the LHAASO-WCDA real-time alert system, here we report the detection of a TeV gamma-ray flare from AGN BL Lacertae. LHAASO-WCDA observed a gamma-ray flux enhancement from the active galactic nuclei BL Lacertae, commencing at MJD 60588.43. By MJD 60588.77, the accumulated significance reached 7.0 standard deviations, with a flux of approximately 0.5 Crab Unit above 1 TeV. We strongly encourage multi-wavelength observation. LHAASO is a multi-purpose extensive Air Shower (EAS) array designed to detect air showers induced by gamma-rays.

Related

16890 BL Lacertae gamma-ray flare: Upper limits from a monitoring search with IceCube

16895 LAST optical observations of the blazar BL Lacertae in bright optical state

16891 Detection of flaring very-high-energy gamma-ray emission from BL Lacertae with the MAGIC telescopes

16856 The blazar BL Lacertae is brightening in Optical bands

16855 Swift follow-up observations of BL Lacertae

16854 VERITAS Detection of Gamma-ray Flaring Activity from BL Lacertae

LHAASO detects rapid variability of the TeV Gamma-ray Activity of BL Lacertae

16848 Fermi-LAT detection of enhanced gamma-ray activity from the blazar BL Lacertae

ICECUBE, Neutrino

LAST, Optical

MAGIC, TeV

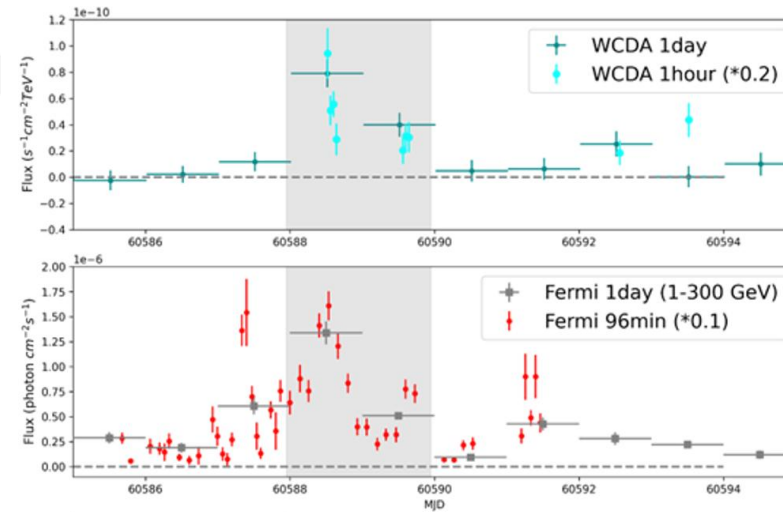
Optical

Swift, X-ray

VERITAS, TeV

LHAASO, TeV

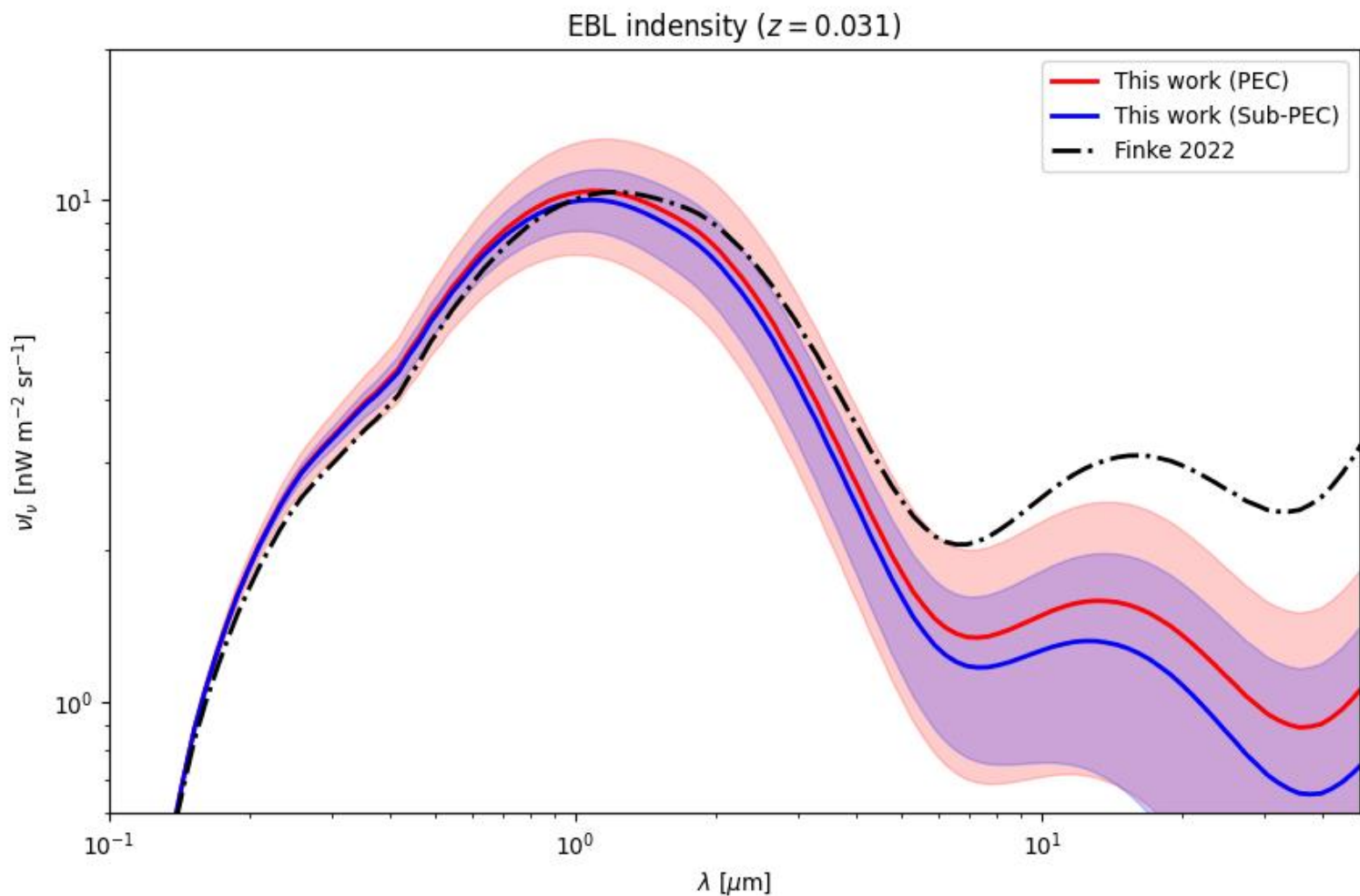
Fermi-LAT, GeV



- 总体探测显著性达到 9σ
- 共识别出4次耀发（2天-6个月）
- 第4次耀发流强历史最高，多波段观测结果丰富
- 多波段分析揭示有趣特征，如耀发内能谱演化，第4次耀发可能和GeV光变不同步

3. 研究进展

EBL测量：Mrk 421



➤ 利用LHAASO对Mrk 421的长期监测数据及新方法，开展EBL测量工作：

- 35个耀发时段数据
- 迭代多项式修正新方法
- 现有模型可能高估了约 $5 \mu\text{m}$ 以上波段的宇宙红外背景（CIB）强度

➤ 后续将针对Mrk 421耀发本征能谱（SED）的不同假设，给出LHAASO测得的EBL谱强度

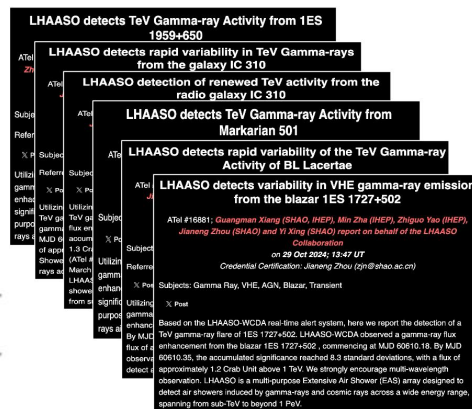
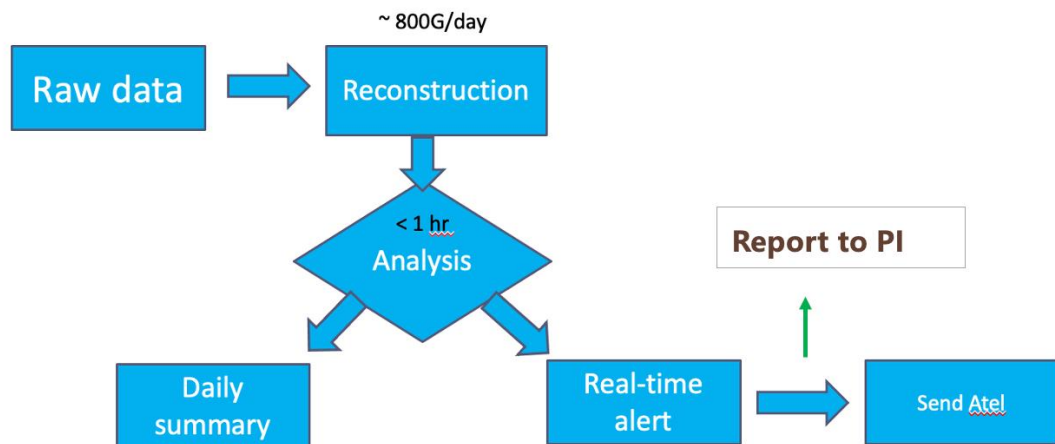
3. 研究进展

实时监测系统

Phase 1: 指定候选源

- Duration: 0.5, 1, 2, 4 transits
- Alert threshold $\leftrightarrow$ the false alarm rate

Category	number	$TS_{Threshold}$
Mkn 421, Mkn501	2	18.79
TeVCat Extragalactic sources	65	26.37
Nearby 3FHL Extragalactic sources($z < 0.2$)	85	27.03
Total	152	



Phase 2: 全天监测

原始重建数据 (ROOT)
EOS · /eos/lhaaso/rec/wcda

多尺度天图生产
4 h 全天区 / 30 min 监控

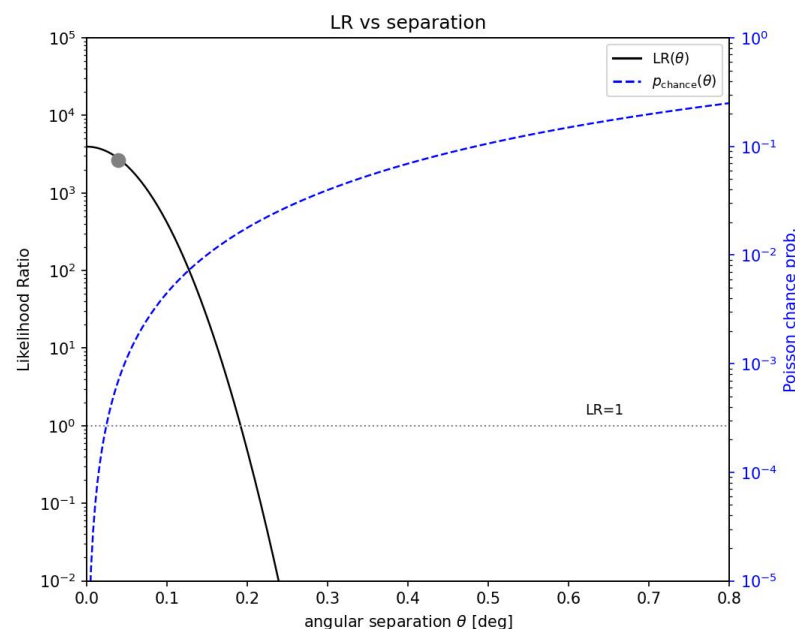
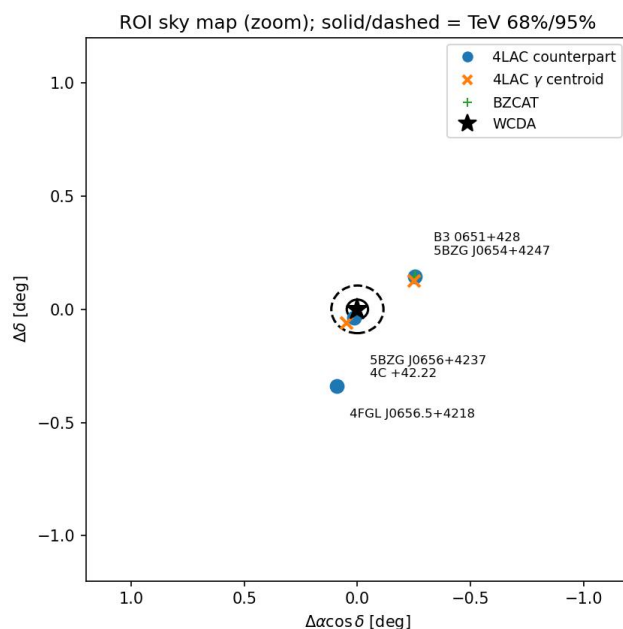
科学监测
盲搜索 · Follow-up · 光变

智能告警
邮件 · GCN/ATel 自动响应

3. 研究进展

科学亮点：新TeV源4C+42.22

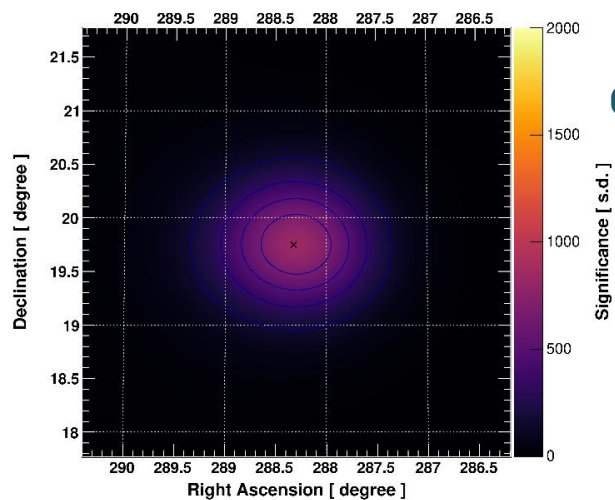
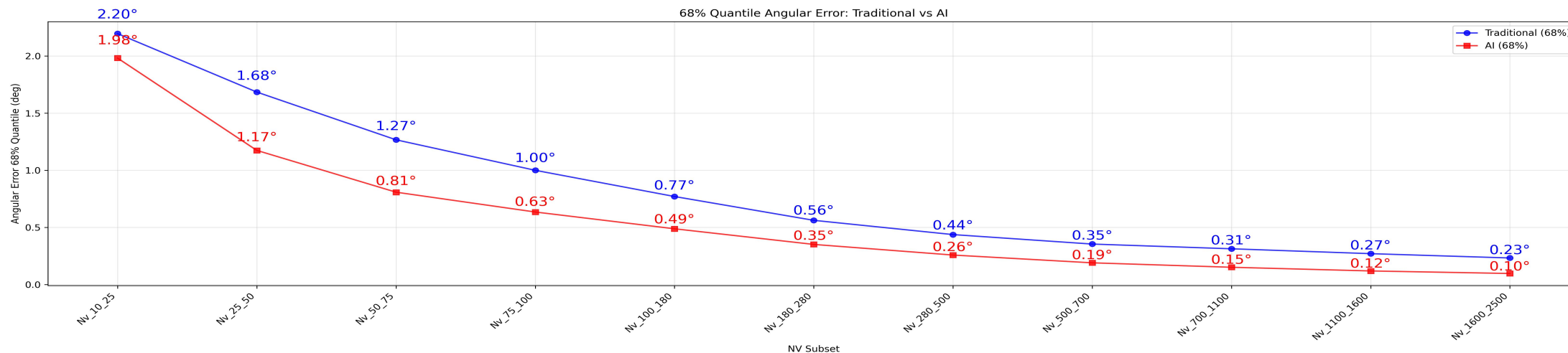
- 盲搜捕获一个持续约 8 天的暂现河外 TeV 源，单点显著性 8.5σ （全局 5.2σ ）
- 位置与 blazar 4C+42.22（红移 $z=0.059$ ）相符，偏差仅 0.03° ，流量约 42% Crab
- 似然比 + 泊松偶然符合概率完成对应体认证——监测系统实现「数据 → 发现」闭环
- 草稿已经基本完成，即将提交PCC讨论。



左：ROI 局部天图（WCDA 位置与 4LAC/BZCAT 对应体）；右：似然比与偶然符合概率 vs 角距离

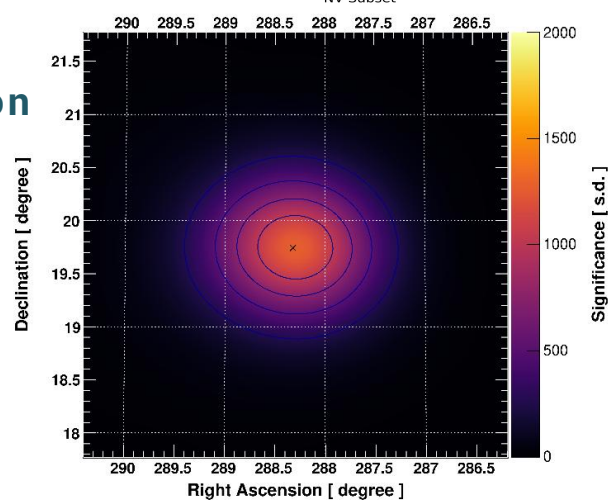
3. 研究进展

AI 赋能



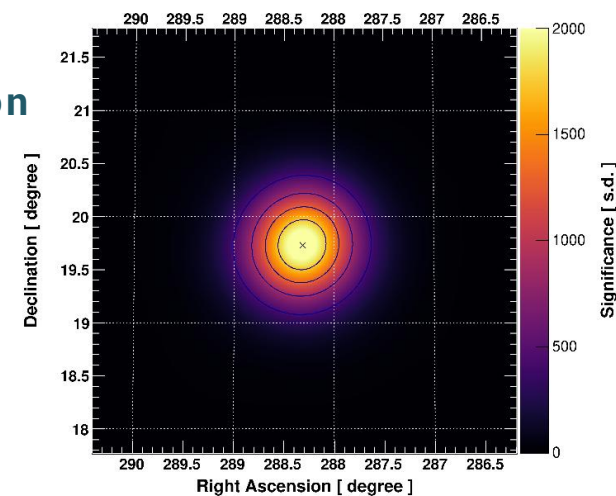
Classification

1.5 ×



Reconstruction

1.7 ×



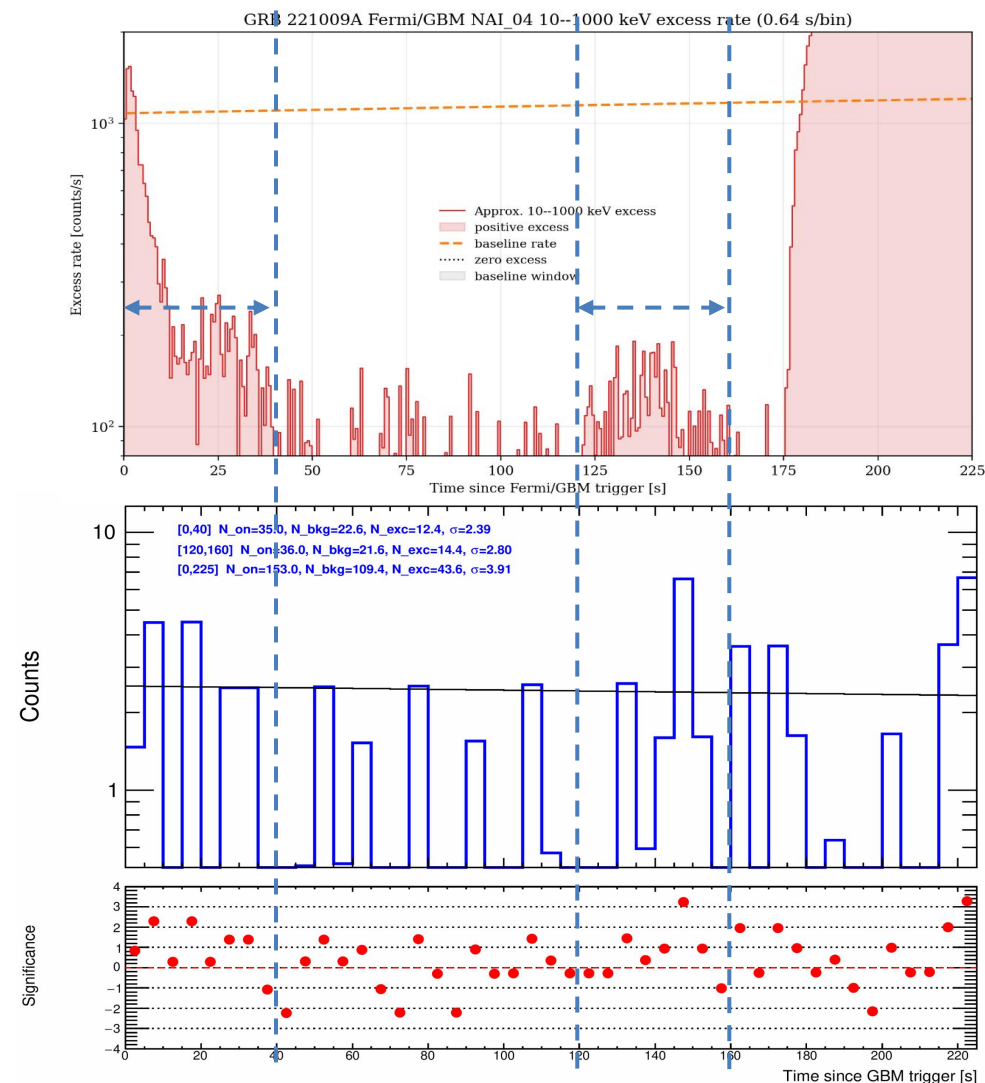
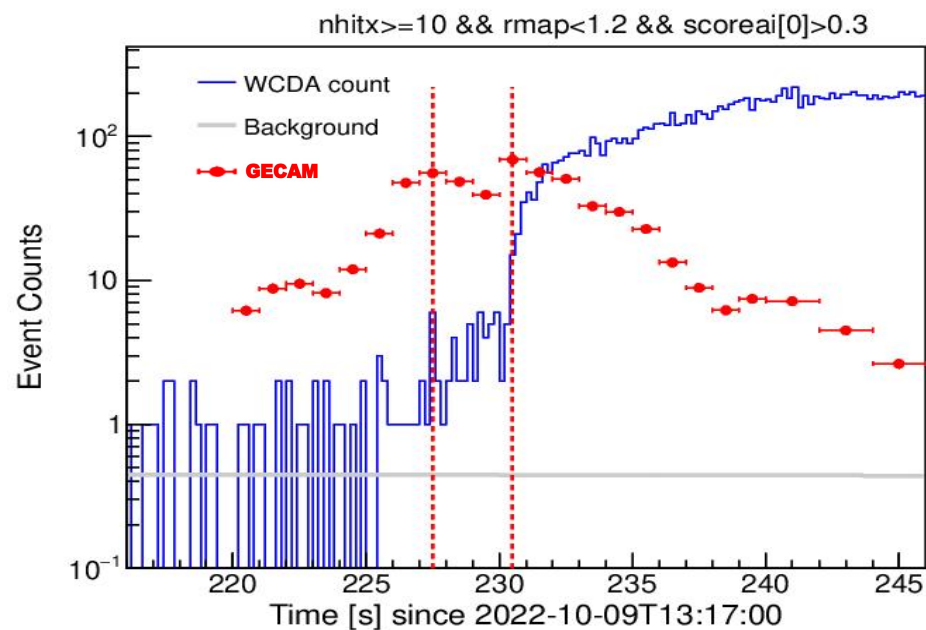
➤ 灵敏度及角分辨率均显著提升，有望探测到更多TeV辐射源

3. 研究进展

AI应用：GRB 221009A

➤ 伽马暴TeV辐射信号提取

- Prompt emission (T_0 – T_0+226 s):
 - 探测显著性约 3.9σ
 - 与Fermi/GBM观测呈现可能的时间关联
- TeV余晖：
 - 极早期 (T_0+227 s– T_0+230 s) 局部显著性最优 11σ
 - 与GECAM具有时间关联



4. 下一年度研究计划

➤ 原定研究计划安排：

中期考核前（2027 年 7 月）：

- ① 发布LHAASO一期河外伽马源源表，包括天体源约17个。
- ② 完成4-6个天体源的细致分析与辐射机制研究。
- ③ 完成EBL首轮测量。

➤ 下一年度重点研究计划：

- ① 完成一期河外源源表文章
- ② 发表1ES 1959+650、IC 310、Mrk 501、4C+42.22文章；
- ③ 推进9个单源分析研究工作
- ④ 完成EBL第一轮测量工作
- ⑤ 推进全天监测系统、AI赋能



5. 总结

- 原定年度研究计划：

- 完成对天体源1ES 1959+650、Mrk 421、Mrk 501、IC 310的精确测量工作。
- 完成一期河外源源表相关工作。

- 已完成

- 中期考核目标：

- 发布LHAASO一期河外伽马源源表，包括天体源约17个。
- 完成4-6个天体源的细致分析与辐射机制研究。
- 完成EBL首轮测量。

- 均有初步结果，保障中期考核顺利进行。

- 持续推进现有研究工作及论文转化；全天监测系统测试运行及AI分析方法开发应用；保证课题进一步顺利实施。



恳请各位专家批评指正

谢 谢！