

2016 talk for LHAASO

西藏羊八井 AS γ 实验和
100 TeV 以上能区宇宙线起源的研究

黄晶

中科院高能物理研究所

于南开大学 爱大会馆 (2016. 8. 15-18)

汇报提纲

- 研究背景；
- Tibet AS γ 实验重大升级改造；
- 新升级的 AS γ 实验核心科学目标；
- 100 TeV γ 射线源的探索；
- 膝区宇宙线成分和能谱的观测研究；
- 总结

研究背景

- 从1912年 Hess发现宇宙线以来，宇宙线起源（加速和传播），一直是一个至今未解的“世纪之谜”，被评为21世纪 11个重大前沿科学难题之一。
- 至今，通过空间和地面观测来自宇宙的 γ 射线，已发现2000多个 MeV 到 TeV的 γ 源，但被认为都是轻子起源（电子源）。
- 2013年，Fermi-LAT 卫星实验在《科学》杂志上，发表了0.1-100GeV γ 射线源观测（IC443和W44），初步确定两个超新星遗迹为强子宇宙线源，在银河宇宙线起源问题上取得初步的突破。
- 通过地面宇宙线实验寻找更高能的强子宇宙线源，必将成为下一步激烈的国际竞争的最前沿课题。

汇报提纲

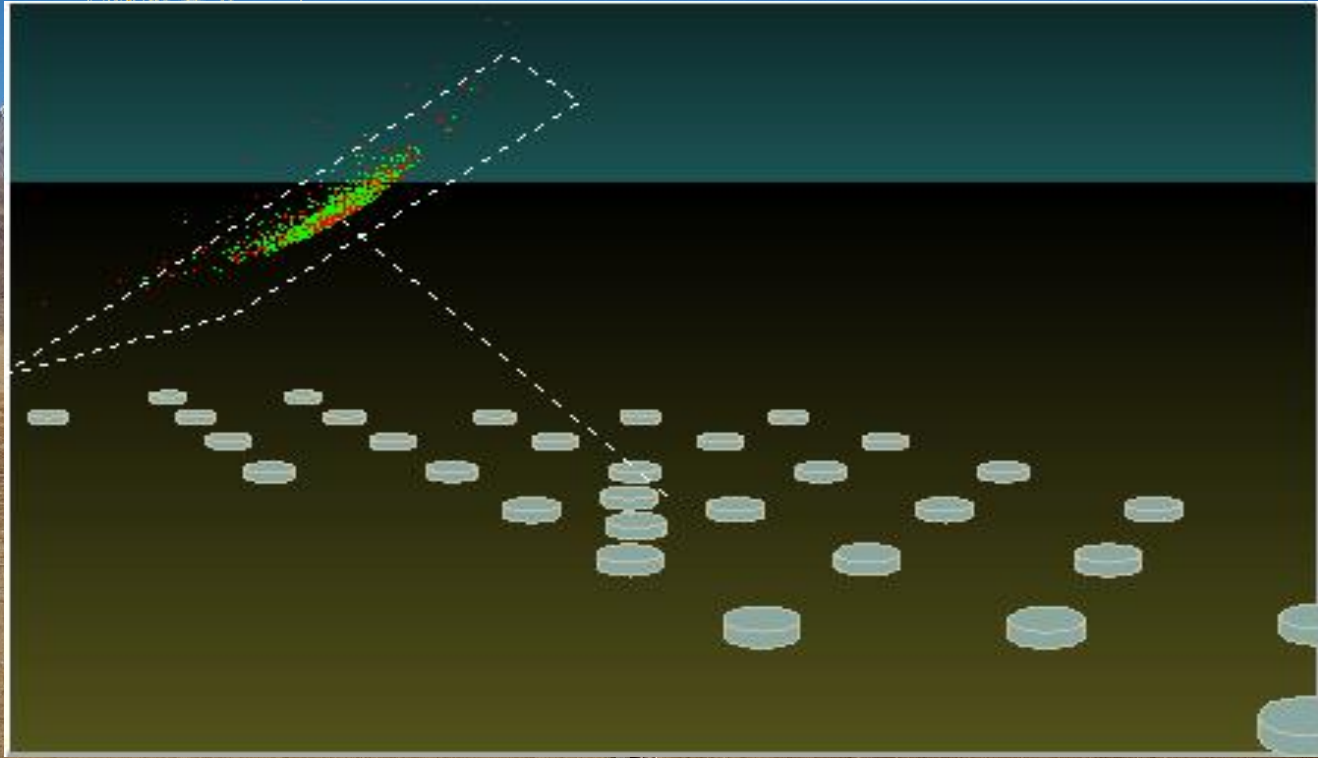
- 研究背景；
- Tibet AS γ 实验重大升级改造；
- 新升级的 AS γ 实验核心科学目标；
- 100 TeV γ 射线源的探索；
- 膝区宇宙线成分和能谱的观测研究；
- 总结

Tibet AS γ 实验完成重大升级改造

(2014年2月底开始正式取数至今)

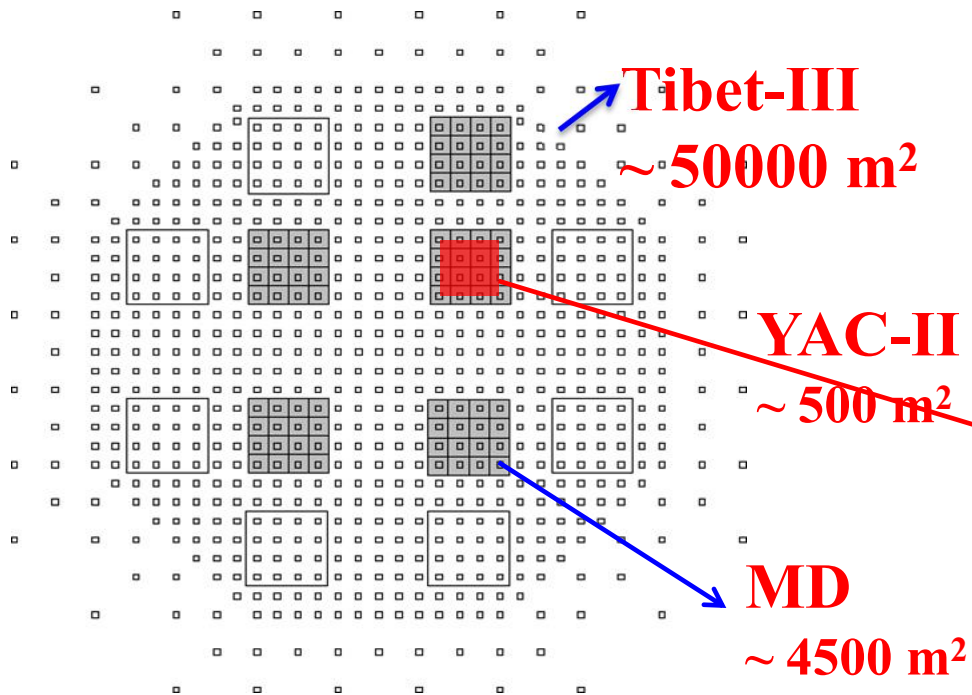
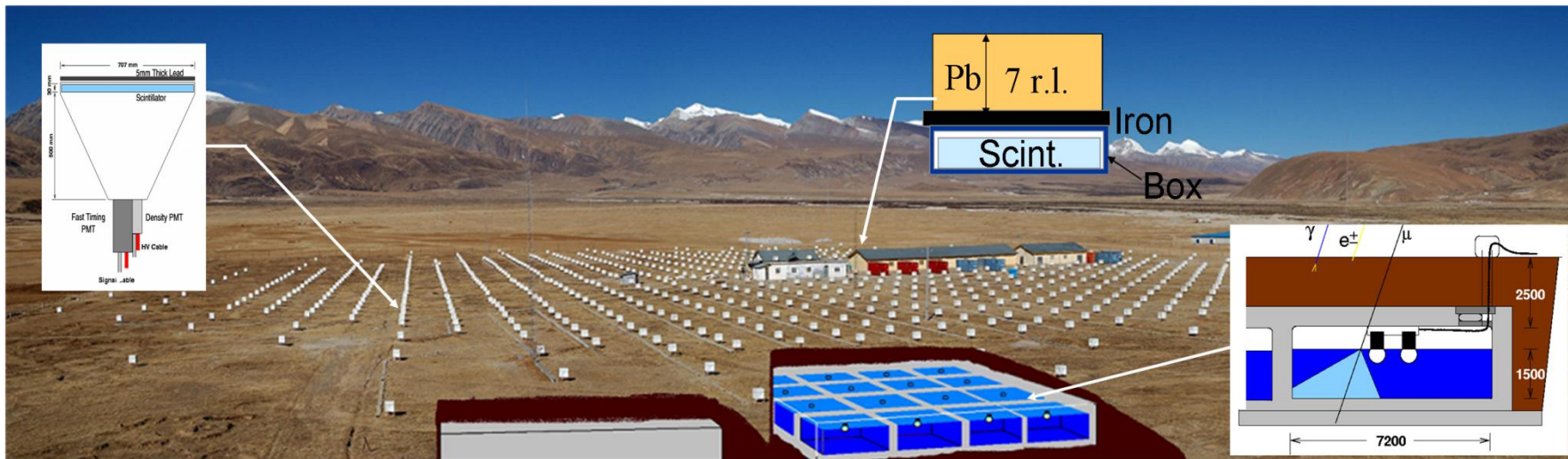
- 广延大气簇射阵列 (Tibet-III)
36900 m² → 50000 m²
- 空气簇射芯探测器阵列 (YAC-II)
YAC-I (10 m²) → 500 m²
- 地下水楔仑科夫探测器阵列 (MD)
无 → 4500 m²

AS γ 大型复合式阵列联合实验 (升级改造前)

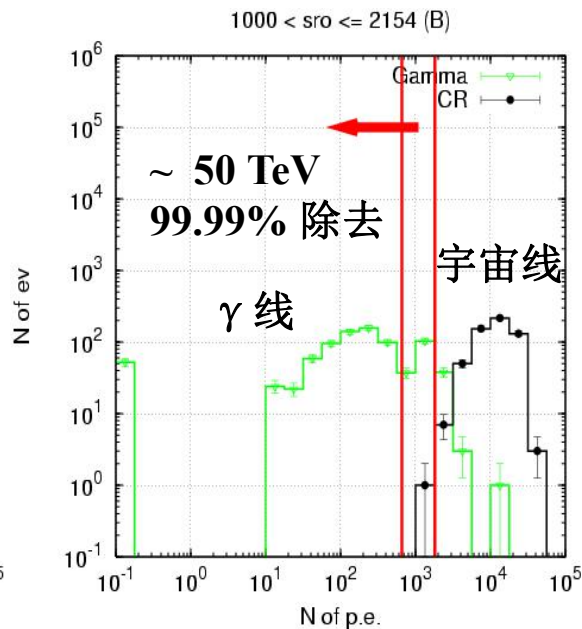
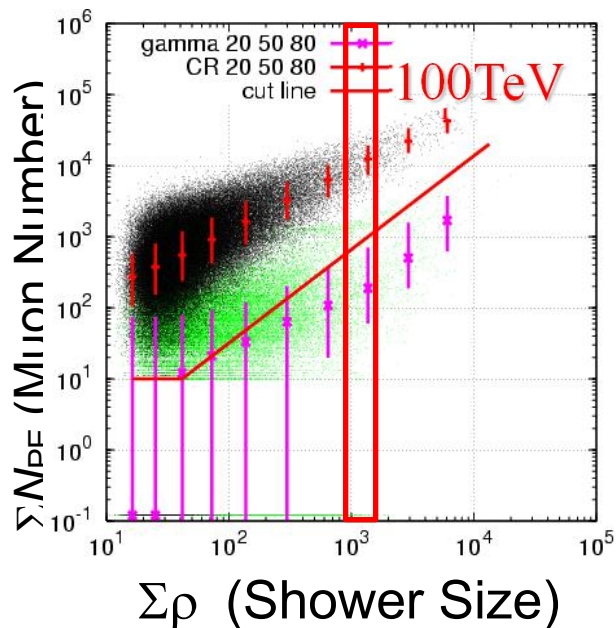
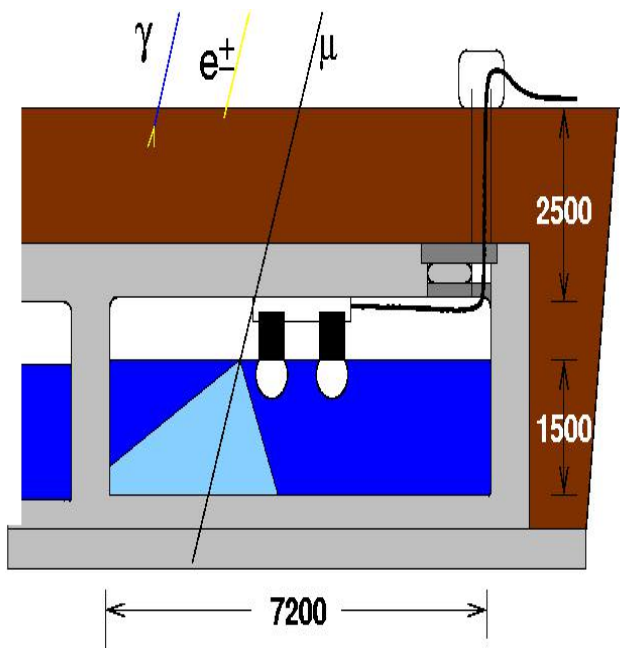


789台闪烁体探测器：测定次级粒子到达探测器时间及粒子数目
次级粒子到达不同探测器时间差 \rightarrow 决定宇宙线的到来方向
次级粒子数目 \rightarrow 决定宇宙线能量
缺点 \rightarrow 无法鉴别宇宙线的种类

完成重大升级改造后的羊八井AS γ 实验



升级改造 1 → 增设地下 Muon探测器



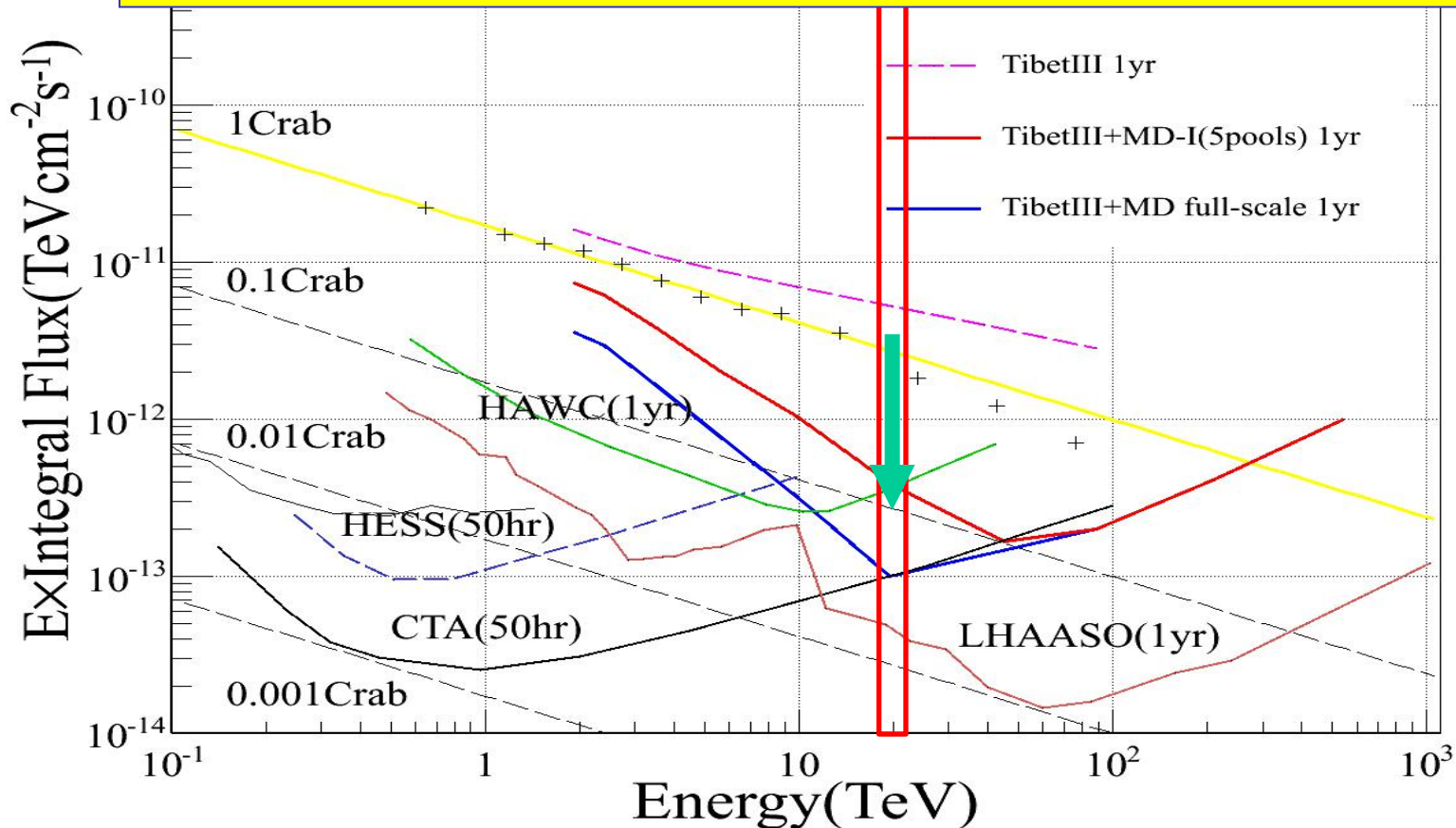
- 利用土层过滤低能电磁成分
- 高能Muon子穿过土层，在水中发出Cerenkov光，被PMT吸收。

γ 与宇宙线在相同能量下，产生的次级粒子中 Muon 子数目差异达到 2个量级的不同。

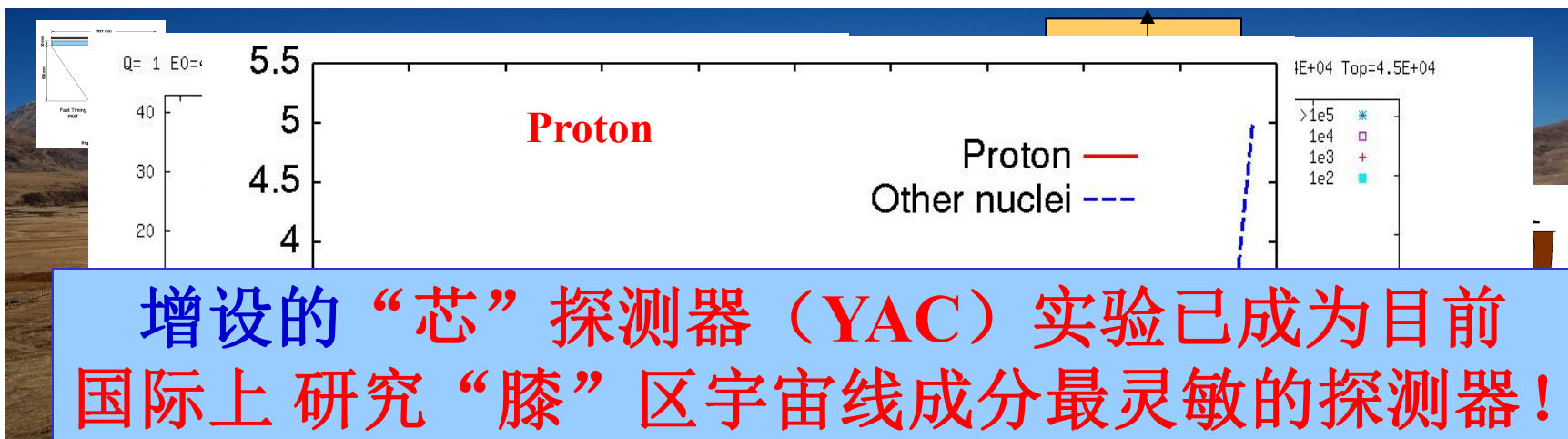
利用该特征，在 50TeV能域，探测器可以排除99.99%宇宙线本底，保留95%的γ事例，**灵敏度提高15倍！**

Tibet AS γ 升级后探测灵敏度曲线

(Tibet AS+MD) 实验已成为目前国际上,
20 TeV 以上能区最灵敏的 γ 天文望远镜!



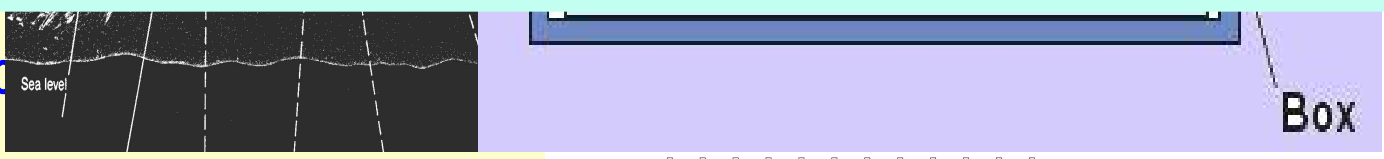
升级改造 2 → 增设簇射“芯”探测器



Tibet-A
量和到
YAC (showel
报 →

在 50 TeV-10000 TeV 能区，有望在膝区宇宙线成分研究方面，观测到国际最高精度的物理结果，在宇宙线加速及传播研究上做出重要贡献。

Tibet-MD (450
muon 数目



汇报提纲

- 研究背景；
- Tibet AS γ 实验重大升级改造；
- 新升级的 AS γ 实验核心科学目标；
- 100 TeV γ 射线源的探索；
- 膝区宇宙线成分和能谱的观测研究；
- 总结

AS γ 实验的核心科学目标

新升级的 AS γ 实验围绕一个核心问题，即探索“银河宇宙线的起源”（加速，传播），通过以下 2 个方向展开研究：

- 1) 100TeV γ 射线发射源寻找；
- 2) 膝区原初宇宙线单成分能谱及其精细结构的研究。

汇报提纲

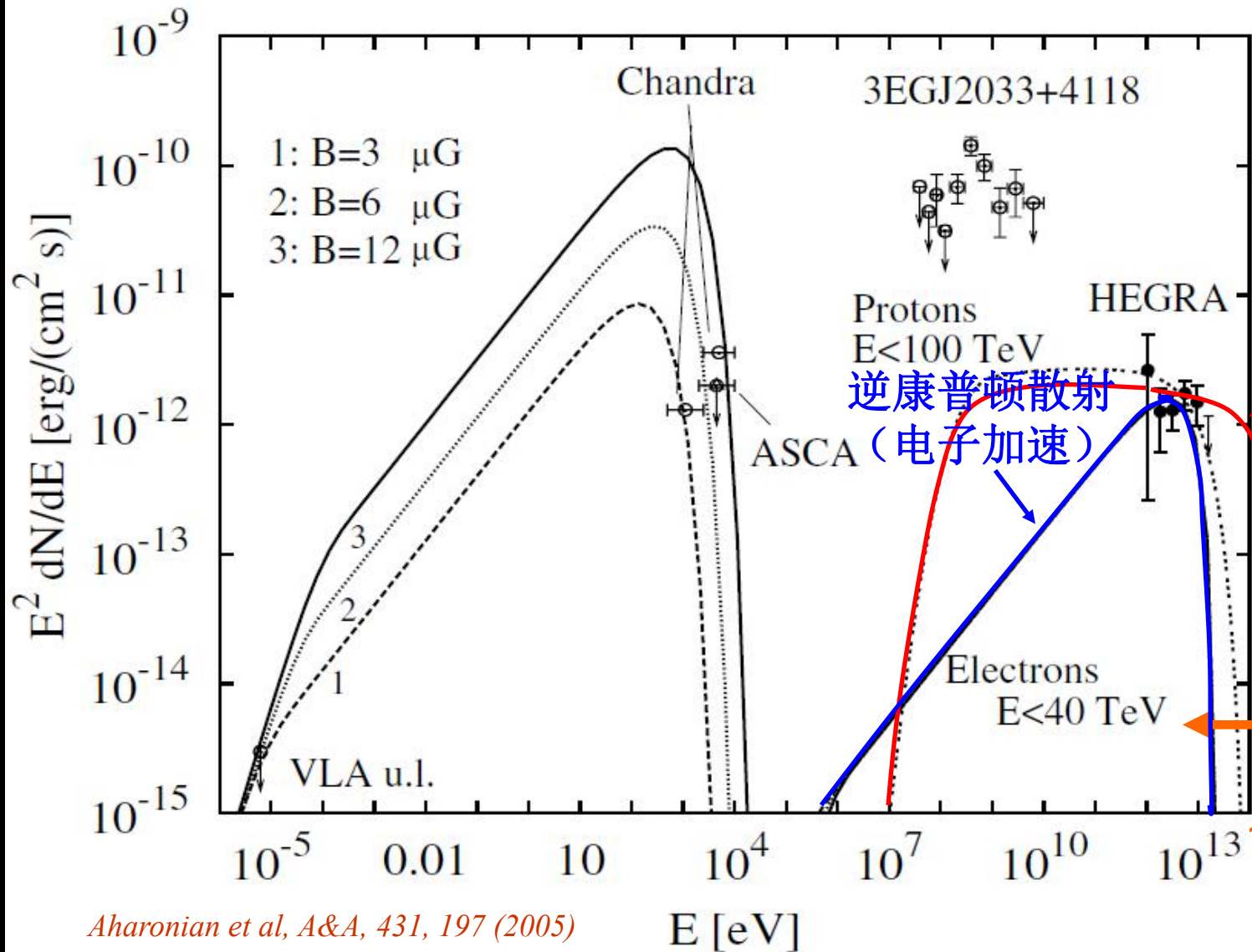
- 研究背景；
- Tibet AS γ 实验重大升级改造；
- 新升级的 AS γ 实验核心科学目标；
- 100 TeV γ 射线源的探索；
- 膝区宇宙线成分和能谱的观测研究；
- 总结

- 1) 100TeV γ 射线发射源寻找

寻找 100TeV γ 射线源的重要性

- 至今，对于任何一个可能的宇宙线源，我们仍然没有决定性的观测证据，证明其一定为一个宇宙线源。
- 而 100 TeV–PeV 的 γ 射线观测，是确认宇宙线源的最强有力的证据。因为，电子的逆康普顿散射，由于同步辐射冷却和 Klein–Nishina 截面，产生 100TeV 以上的 γ 射线已经非常困难。
- 而所有 100 TeV 以上的 γ 射线，主要产生机制是 Π^0 衰变，因此，找到 100 TeV γ 射线的发射源，也就找到了宇宙线源。

100 TeV 能区 γ 射线观测的重要性:



质子加速
 Π^0 衰变
 Protons
 $E < 1000 \text{ TeV}$

10-1000 TeV

提高灵敏度的方法

- 1) 扩大实验的有效面积100倍；
- 2) 延长观测时间 100 倍；
- 3) 提高角度分辨率 10 倍；
- 4) 排除 99% 的强子宇宙线本底。

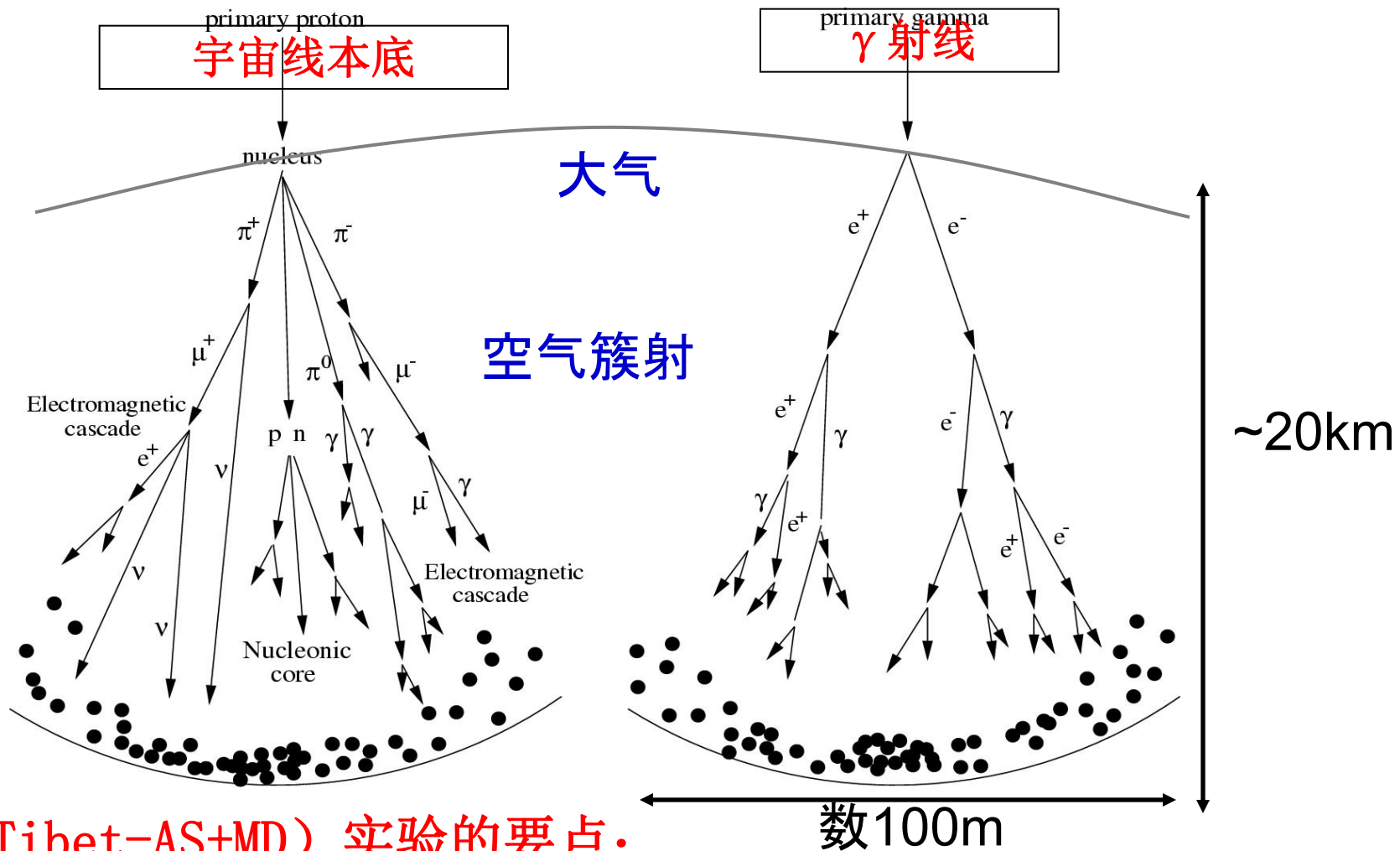


利用相同能量下， γ 射线簇射中，
Muon数目要比宇宙线强子簇射数目少约
一个量级的原理，排除强子宇宙线本底



大规模升级改造 AS γ 实验的目的

利用 Muon 数目的不同进行 P/ γ 鉴别 (排除宇宙线本底)



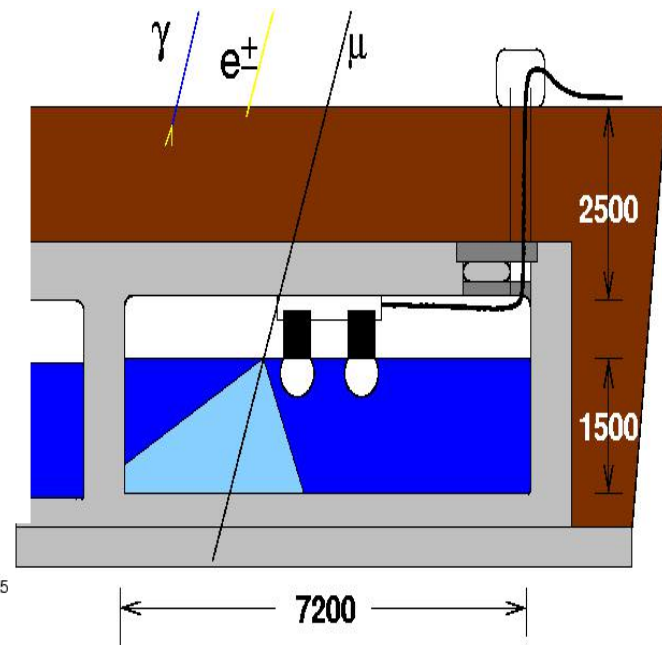
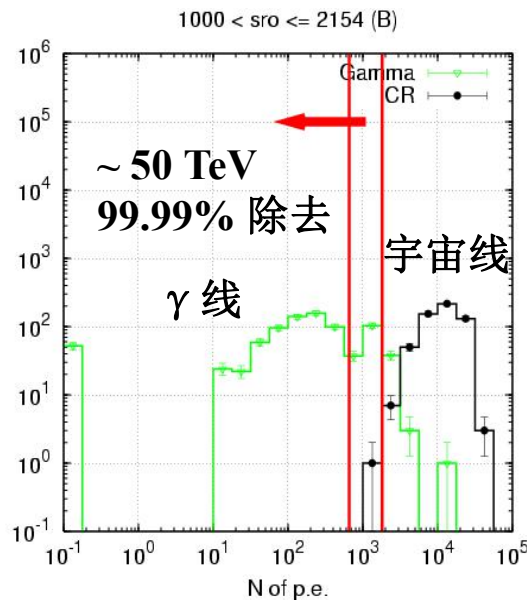
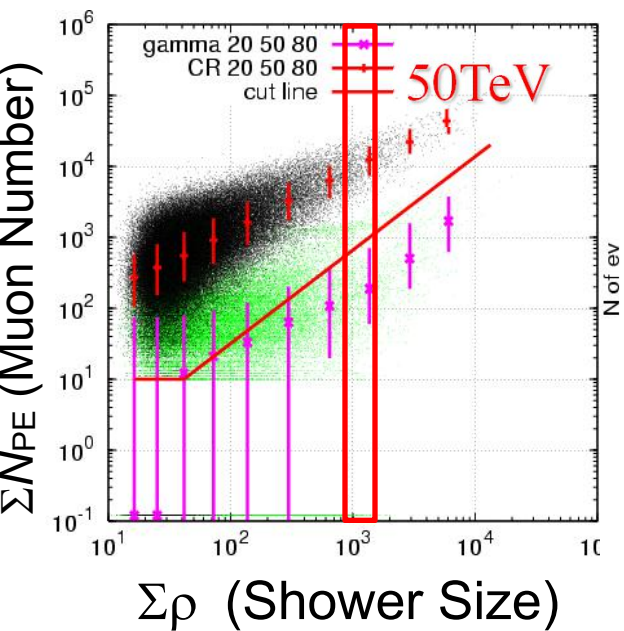
AS γ (Tibet-AS+MD) 实验的要点:

空气簇射中 Muon 数目 (距离芯位 < 100m, 4300m)

100TeV 质子
~100个

100TeV γ 线
~几个

AS γ 创新型地下 Muon探测器 (MD) 原理图



不同空气簇射大小下 γ 及宇宙线产生的次级 Muon 子数目

- 利用土层过滤低能电磁成分
- 高能Muon子穿过土层, 在水中发出Cerenkov光, 被PMT吸收。

100 TeV 能区 AS γ 可能观测到的 γ 射线源

□ 已知的 TeV γ 射线源 (北天区)

天体名称 种类 天顶角 (Tibet) [°]

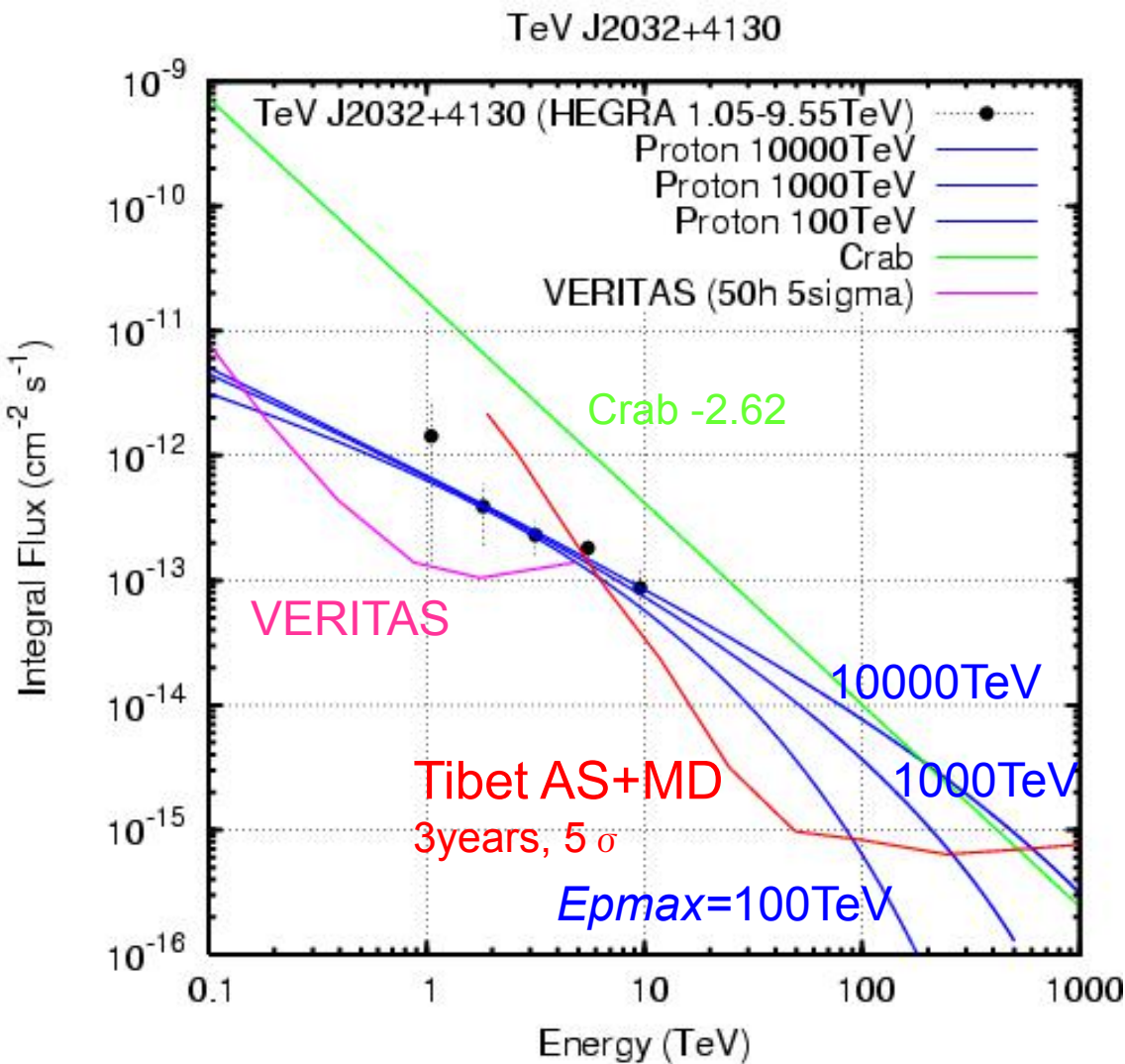
银河系内

Crab Nebula	PWN	8
Cas A	SNR	29
TeV J2032+4130	SNR? (vicinity of Cyg X-3)	11
MGRO J2019+37	Cygnus Diffuse γ rays	7
MGRO J2033+42	Cygnus Diffuse γ rays	12
MGRO J1909+06	SNR?	24
HESS J1837-069	SNR? (G25.5+0.0?, AX J1838-0655?)	37
HESS J1834-087	SNR? (G23.3-0.3 / W41?)	39
LS I +61 303	XRB	31

银河系外

M87	AGN (z=0.00436)	18
Mrk 421	AGN (z=0.031)	8
Mrk 501	AGN (z=0.034)	10
1ES 1959+650	AGN (z=0.047)	35
H 1426+428	AGN (z=0.129)	13
PG 1553+113	AGN (z>0.25)	11

TeV J2032+4130 和 π^0 衰变的比较



TeV J2032+4130

未同定的 TeV γ 射线源
在 Cyg X-3 in Cyg OB2 附近
HEGRA 观测时间 ~ 158 hours
谱指数 -1.9 π^0 衰变?
扩散的 γ 源 $\sim 6.2'$
MGRO J2033+42?
 $\rightarrow 350$ mCrabs @12TeV

π^0 衰变

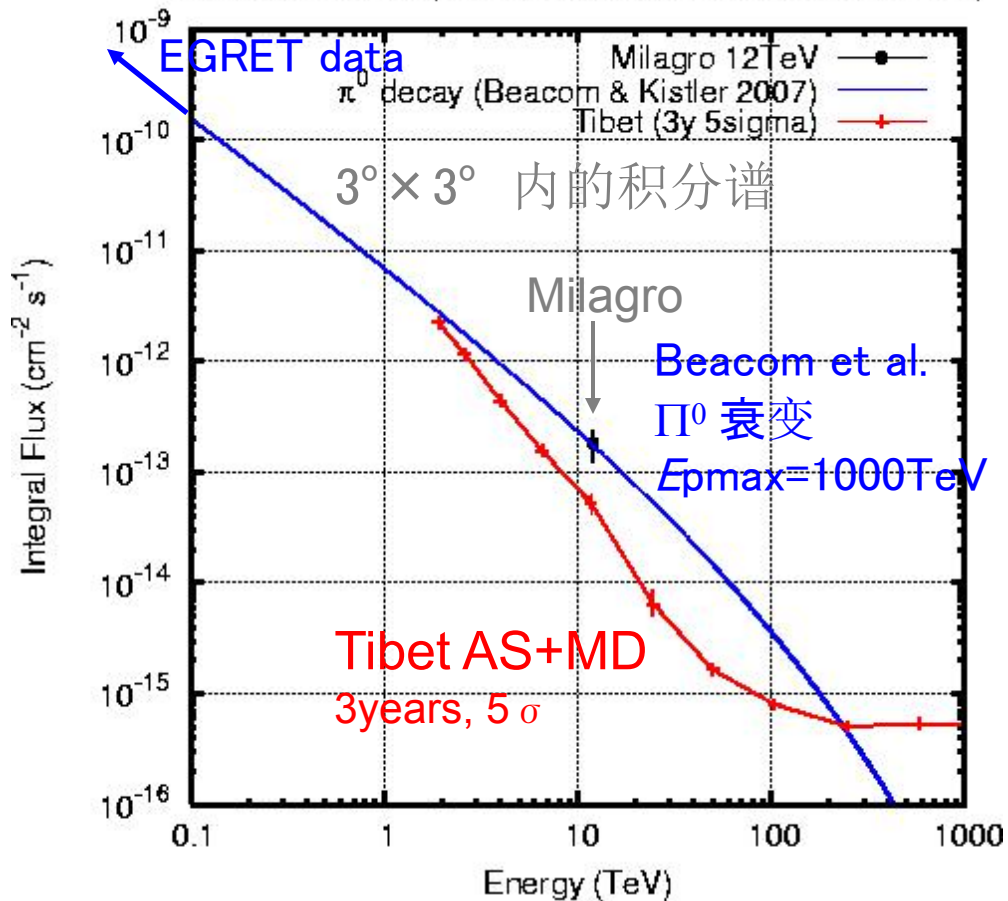
Aharonian et al. *A&A*, 464, 235(2007)
Kelner et al., *PRD* 74, 034018 (2006)

Aharonian et al, A&A, 431, 197 (2005)

MGRO J2019+37

Cygnus领域的 Diffuse γ 源

MGRO J2019+37 ($\sigma = 0.32$ deg., 1.7 radius analysis)



Beacom et al. astro-ph/070175 (2007)

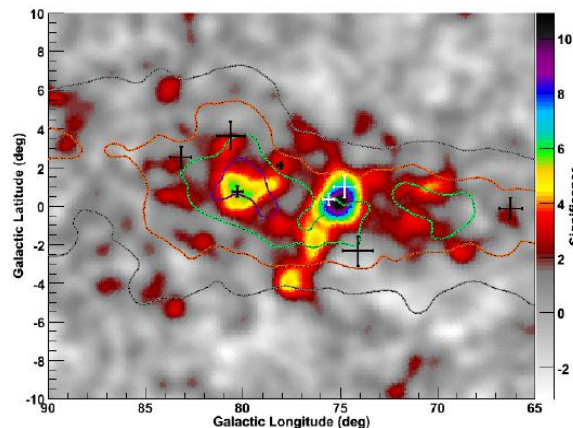
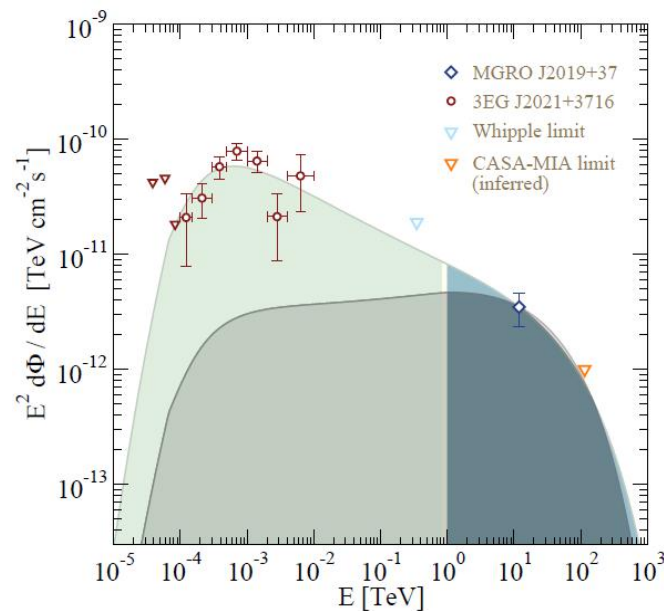
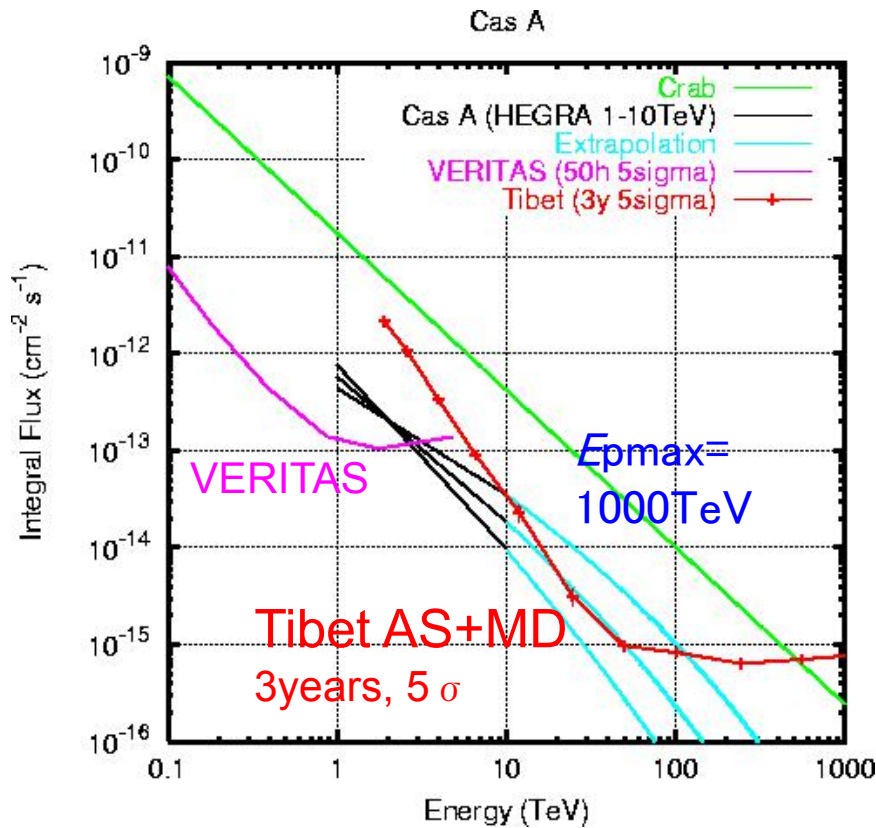


Figure 3 The Cygnus Region of the Galaxy as seen in TeV gamma rays. The color scale is the statistical significance of the gamma-ray excess at each location. Since the Milagro exposure and sensitivity are roughly constant over the region in the figure, the statistical significance is nearly proportional to the flux from each point. Superimposed on the image are contours showing the matter density in the region in steps of $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ starting at $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ with the outer grey contour. The matter density is a combination of atomic (HI) (Kalberla et al. 2005) and molecular hydrogen (H_2) (Dame et al. 2001). The 21 cm line survey data are used to determine the HI density and the CO J=1-0 survey data (Leung et al. 1992) are used to measure the H_2 density. The mass conversion factor $N_{\text{H}_2}/W_{\text{CO}}$ is taken to be $X = 0.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ km}^{-1} \text{ s}$, which is the value used in this region in the GALPROP model (Strong et al. 2004b). With the exception of MGRO J2019+37 the matter density is correlated with the TeV excess, indicating that some of the TeV emission is due to interactions of cosmic rays with matter in the region. The crosses show the location of EGRET sources and their corresponding location errors.

Abdo et al. astro-ph/0611691 (2006)

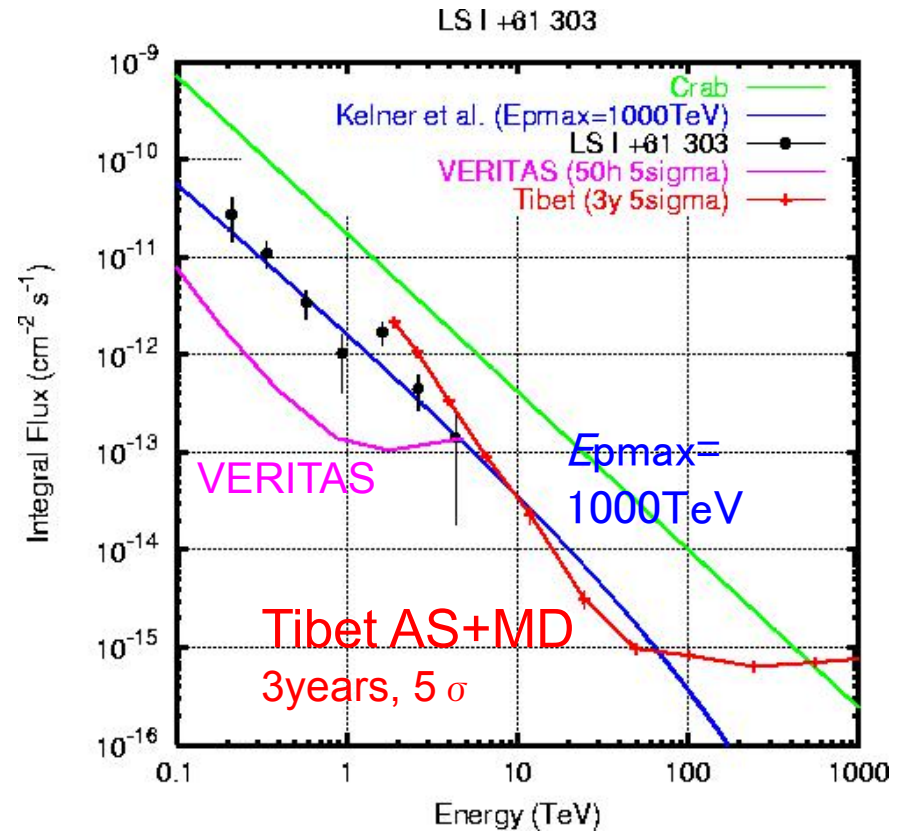




Cas A

电磁波段最亮的壳型 SNR
 距离 ~ 3.4 kpc
 年龄 ~ 300 years
 HEGRA 观测时间 ~ 232 hours
 流强 $\sim 3.3\%$ Crabs
 IC+bremsstrahlung? π^0 衰变?

Aharonian et al, A&A, 370, 112 (2001)

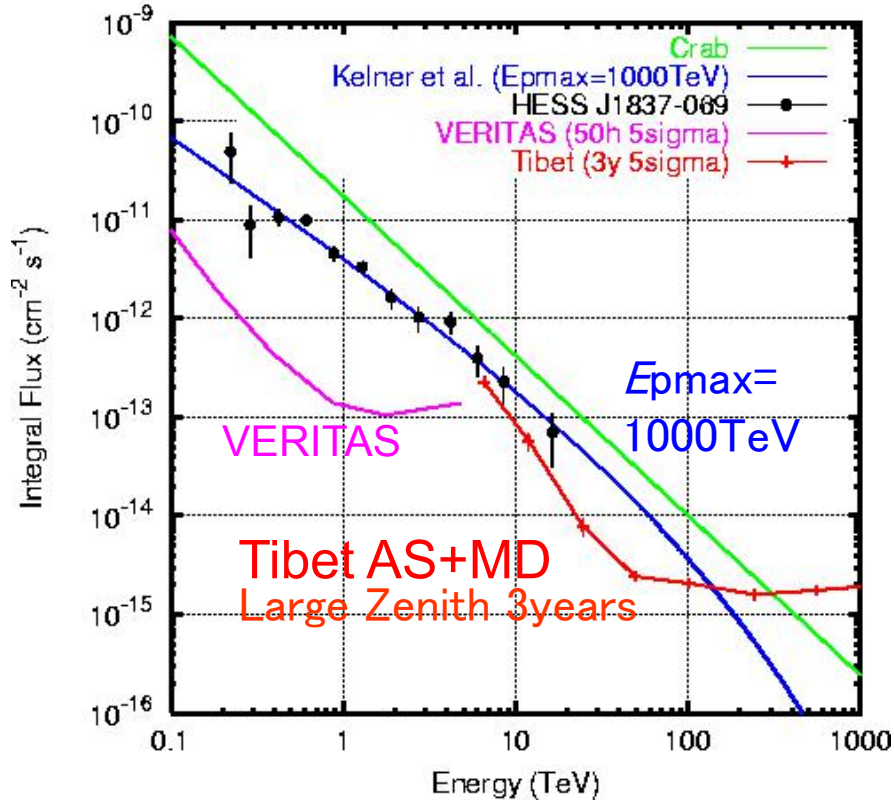


LSI +61 303

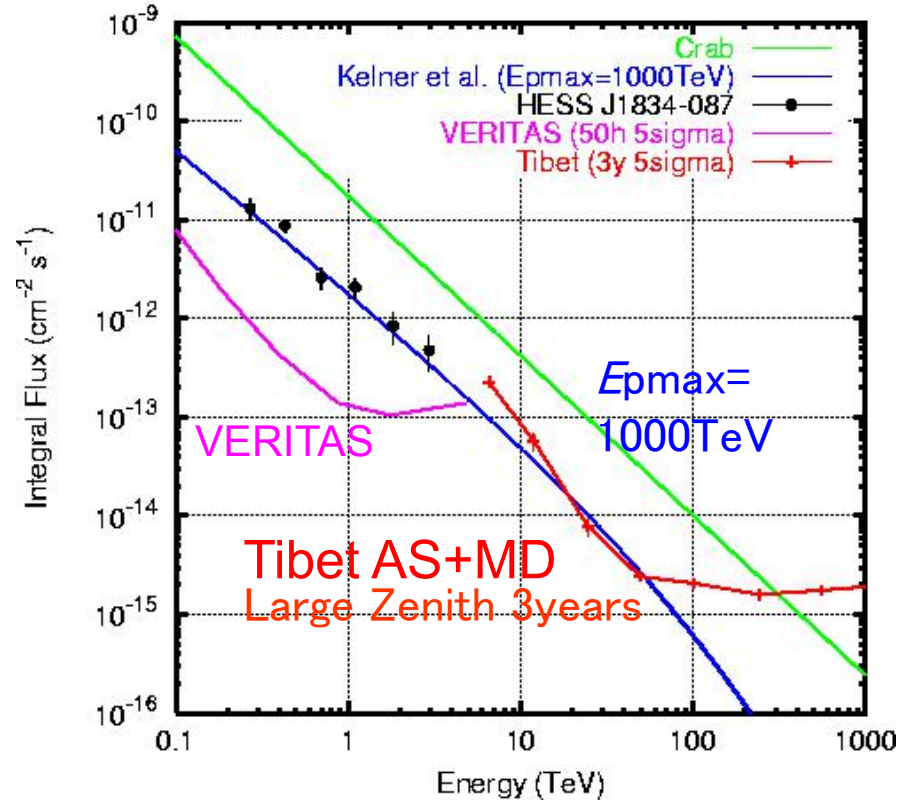
Discovered by MAGIC
 高质量 XRB
 轨道周期 26.5 days
 距离 ~ 2 kpc
 π^0 衰变?

Albert et al, Science, 312, 1771 (2006)

HESS J1837-069



HESS J1834-087



HESS J1834-087

同定天体 G23.3-0.3?

壳型 SNR

距离 ~ 4.8 kpc

Confirmed by MAGIC

天顶角 (Tibet) $\sim 39^\circ$

Aharonian et al, ApJ, 636, 777 (2006)

HESS J1837-069

同定天体 AX J1838 ? (X射线)

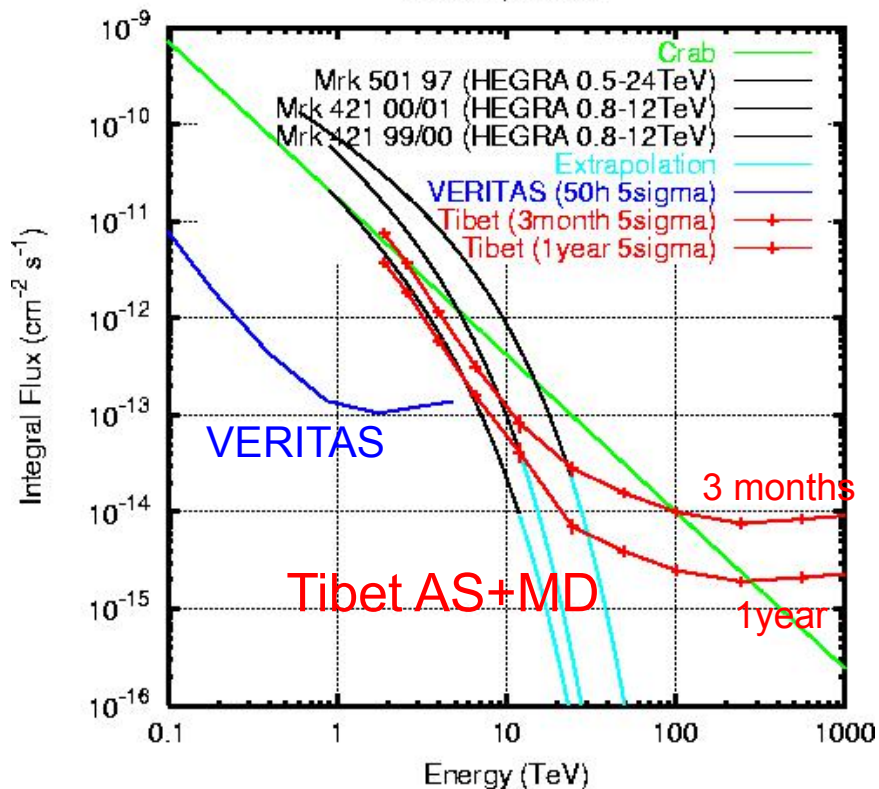
G25.5+0.0? (SNR)

Confirmed by MAGIC

天顶角 (Tibet) $\sim 37^\circ$

Aharonian et al, ApJ, 636, 777 (2006)

Mrk 421, Mrk501



Mrk 421 Mrk 501

AGN (BL Lac)

$z=0.031$ (Mrk 421)

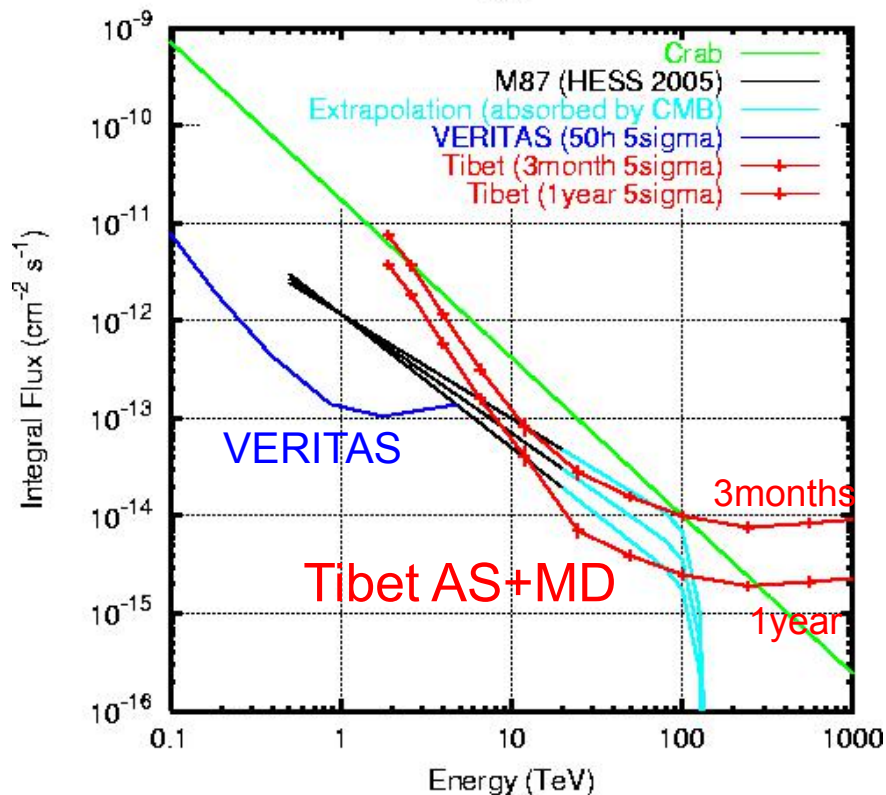
$z=0.034$ (Mrk 501)

HEGRA 几个月观测的平均能谱

SSC or ERC or PIC model?

Aharonian et al, A&A, 349, 11 (1999)

M87



M87

AGN (FR-I)

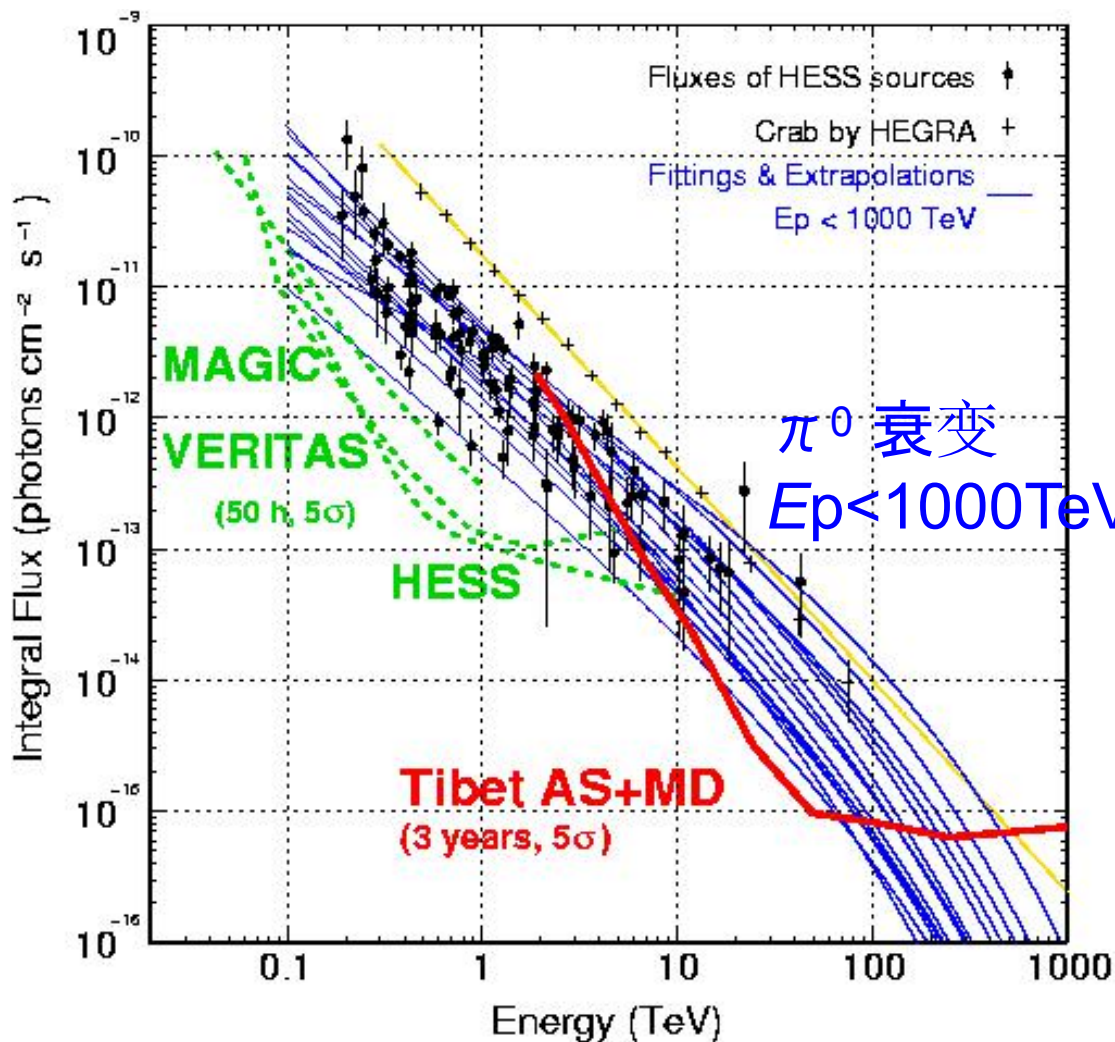
$z=0.00436 \sim 16$ Mpc

$l = 122.4, b = -50.5$

天顶角 (Tibet) $\sim 18^\circ$

Beilicke et al, New Astro. Rev., 48, 407 (2004)

14个 HESS 发现的新天体 (南半球)



Aharonian et al, ApJ, 636, 777 (2006)

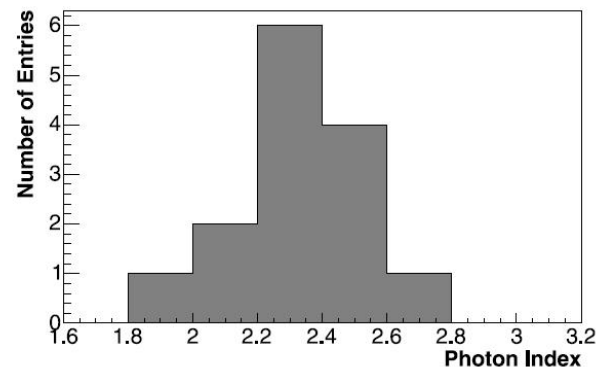


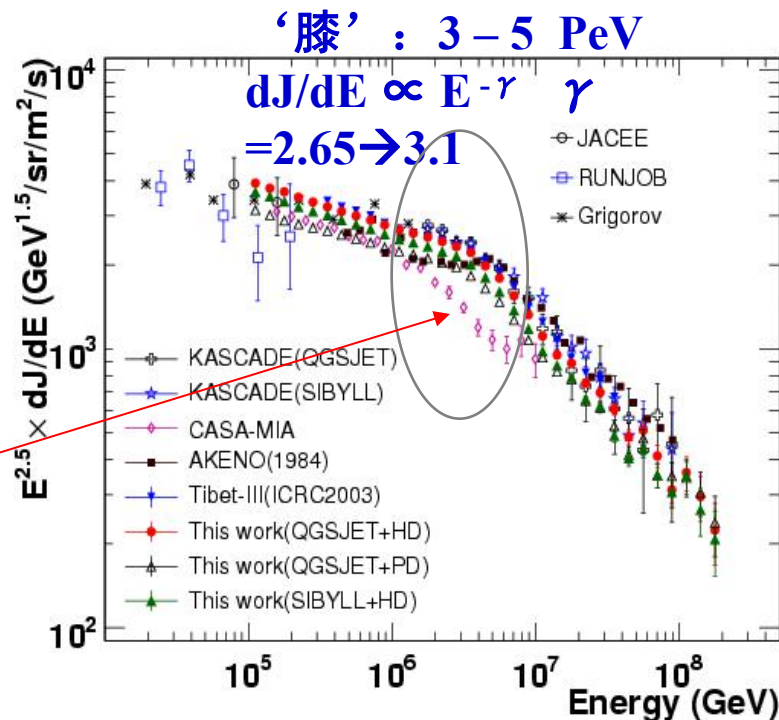
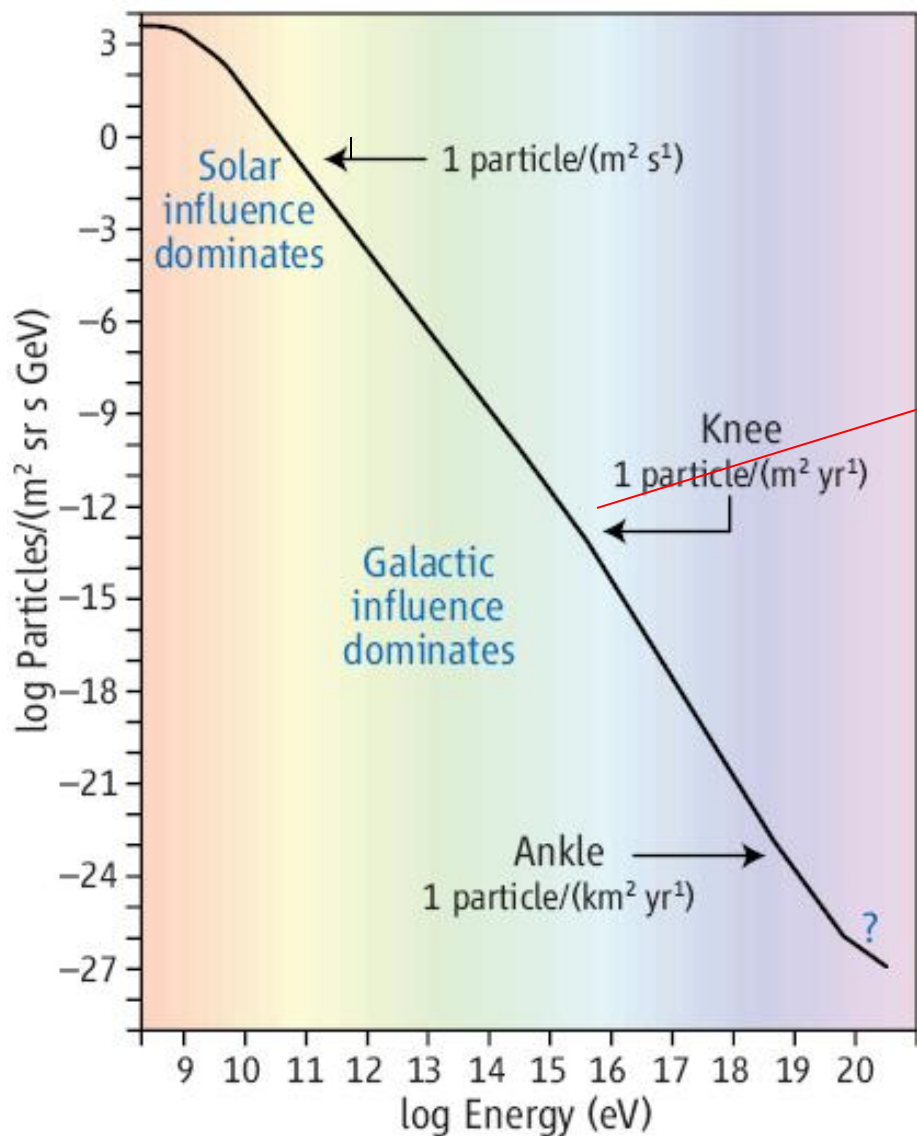
FIG. 8.—Distributions of the photon index of the new sources. The mean photon index is 2.32 with an rms of 0.2.

硬的谱指数: 平均 -2.3

北天区也将有新的天体可能被我们发现!

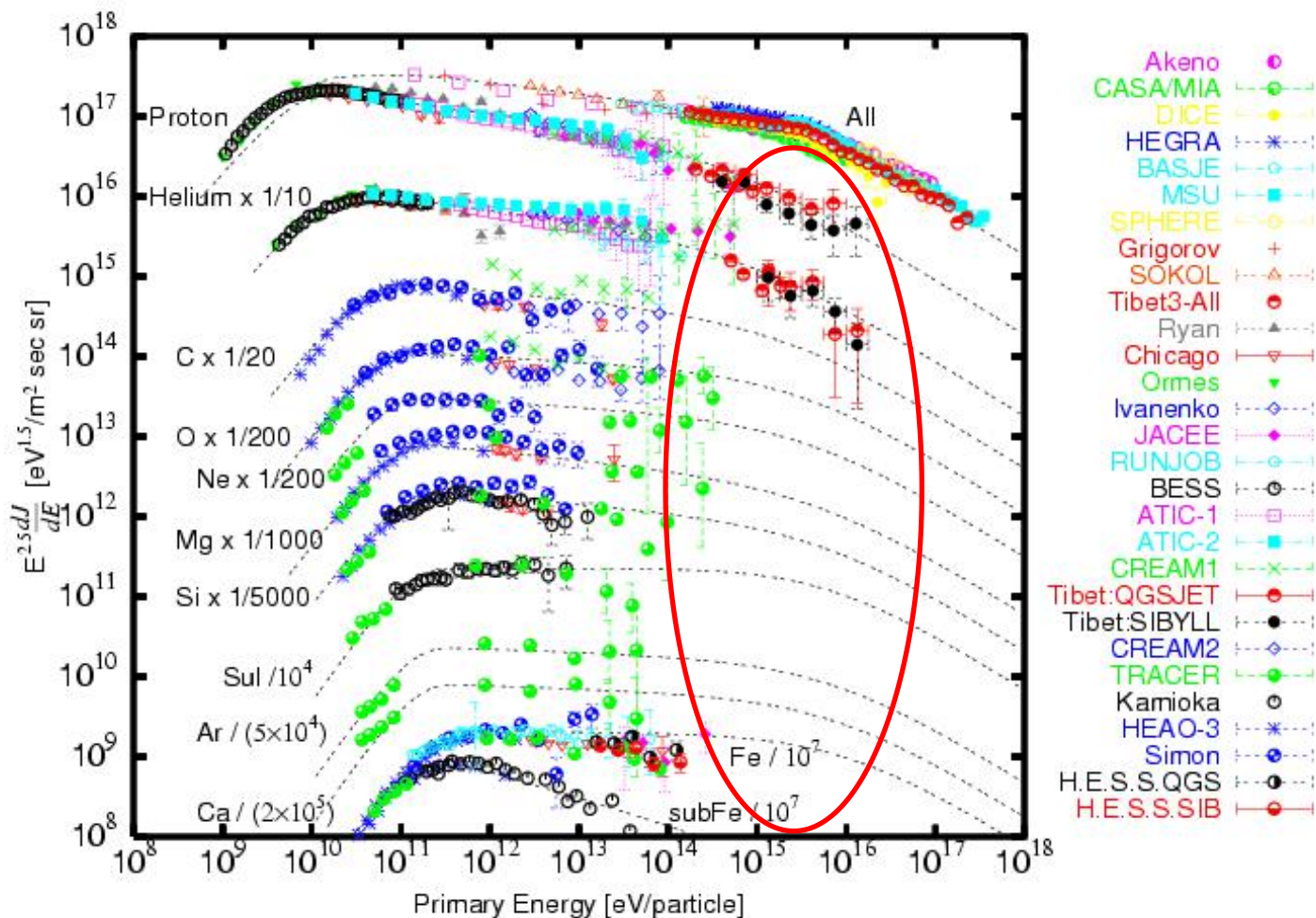
- 2) 膝区原初宇宙线单成分能谱
及其精细结构的研究

原初宇宙线能谱



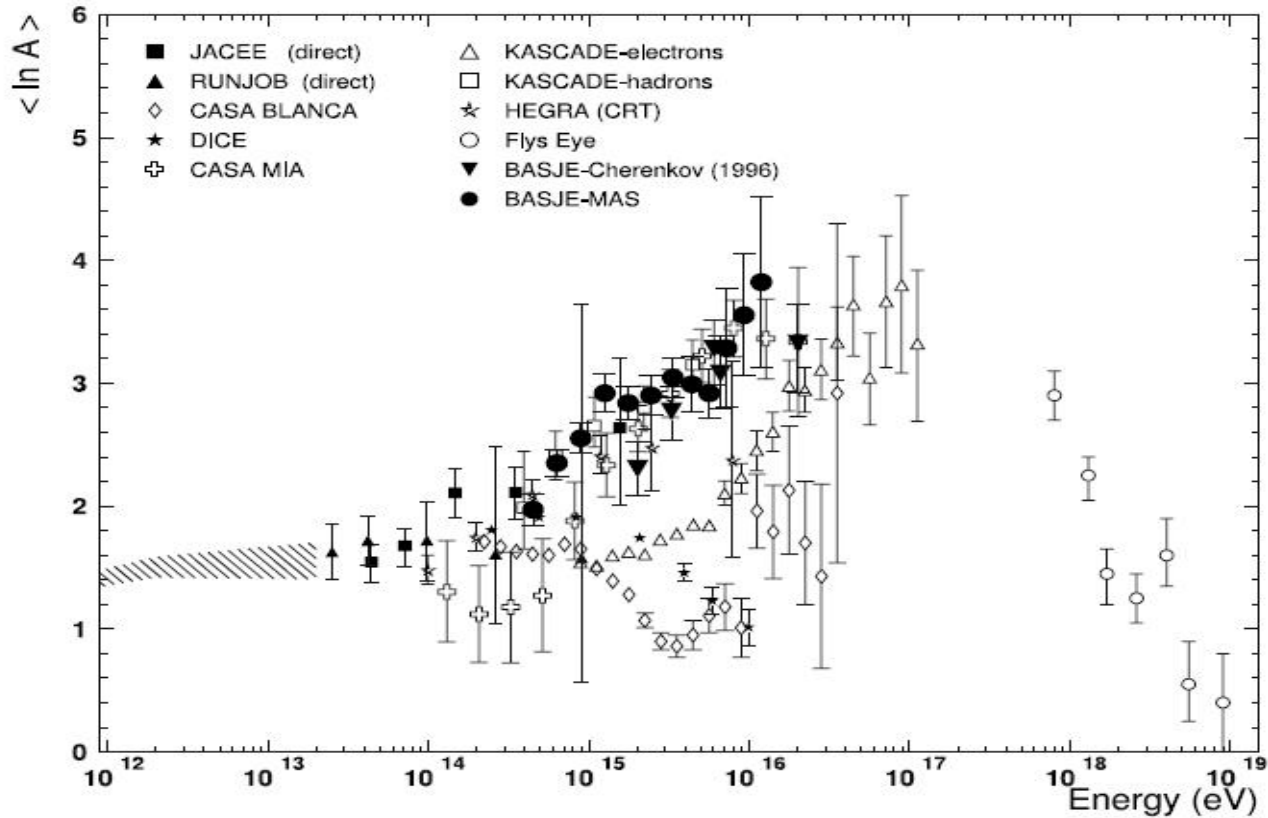
“膝”区能量高于空间直接探测的上限，需要的探测器面积远远大于空间探测器：**只能在地面，羊八井是最好选择。**

原初宇宙线的能谱与成分



膝区宇宙线成分

(S.Ogio et al. ApJ 612 (2004) 268)



地面宇宙线成分的观测手段

过去的探测器:

- Ne-N μ correlation - μ rich showers are induced by heavy primary
(例如: KASCADE/KASCADE-Grande (110m a. s. l), GRAPES-3 (2200m a. s. l) 等实验)
- Detection of high energy core events
(例如: AS γ 的 Tibet-EC 实验 (4300 m a. s. l)等)
- Cherenkov light in atmosphere
(例如: TUNKA-133 (675 m a. s. l.)
- Cherenkov light in water or ice
(例如: PAO (1400 m a. s. l.), Ice TOP (2835 m a. s. l.)
- Xmax -- fluorescence technique at VHE
(例如: Hires, Auger 等实验)

- 缺点:
- 1) 观测手段单一, 用于分离宇宙线成分的参量单一;
 - 2) 严重依赖强子作用模型;
 - 3) 无法能量定标;
 - 4) 成分分离精度差

新型探测器:

克服上述探测器缺点, 进行复合式阵列的多种观测手段, 多参量观测
(例如: 新升级的 AS γ (Tibet-III + YAC + MD),
将来的 LHAASO (KM2A + SCDA + WFCTA)

地面间接实验的难点

(强子作用模型, 能量定标, 成分分离精度)

- 1. 强子作用模型问题 → (已解决)

最新 LHCf 加速器实验对强子作用模型的修正已达 10^{17}eV , 宇宙线业界流行的 Corika 软件包已公布最新强子作用模型: EPOS-LHC, QGSJETII-04.

- 2. 能量定标问题 → (已解决)

要求地面观测实验所观测能谱与空间实验有一定的重叠观测区域是一种很好的标定手段。而这只有高海拔实验具备条件。

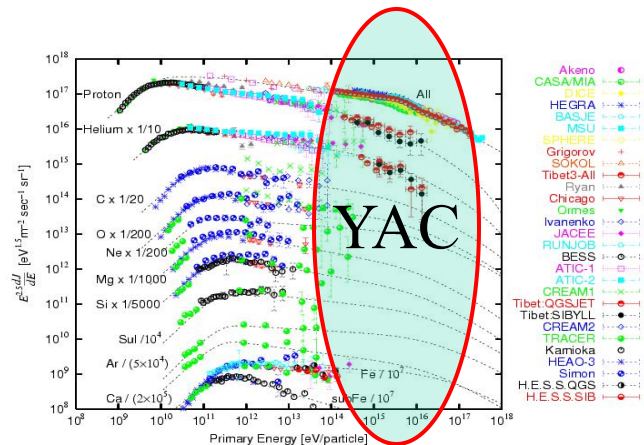
- 3. 宇宙线成分的分​​离精度要求 → (已解决)

要求运用多种手段, 多参量观测。新升级的羊八井AS γ 实验 (Tibet-III+YAC+MD) 对宇宙线成分的分​​离精度已达到 90% 以上, 为目前业界最高灵敏度。

方向二：“膝”区宇宙线单成分能谱研究 (目标：解决“膝”区 50 年老大难问题)

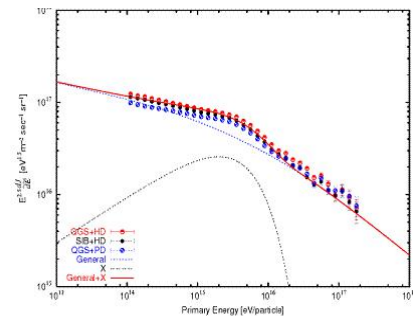
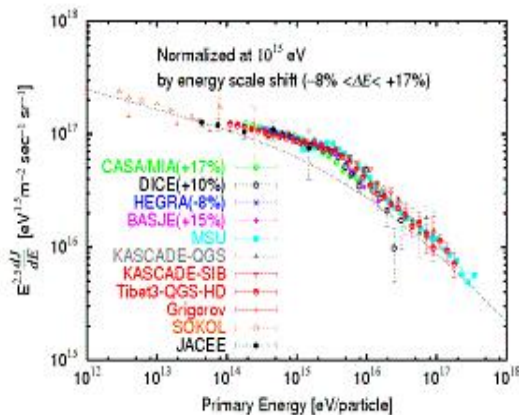
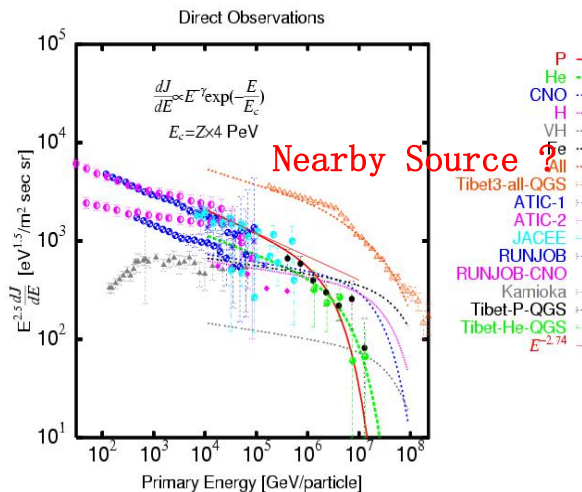


中方独立自主，建成了目前国际上最大的簇射“芯”区探测器，实现“膝”区宇宙线单成分能谱国际最高灵敏度观测。



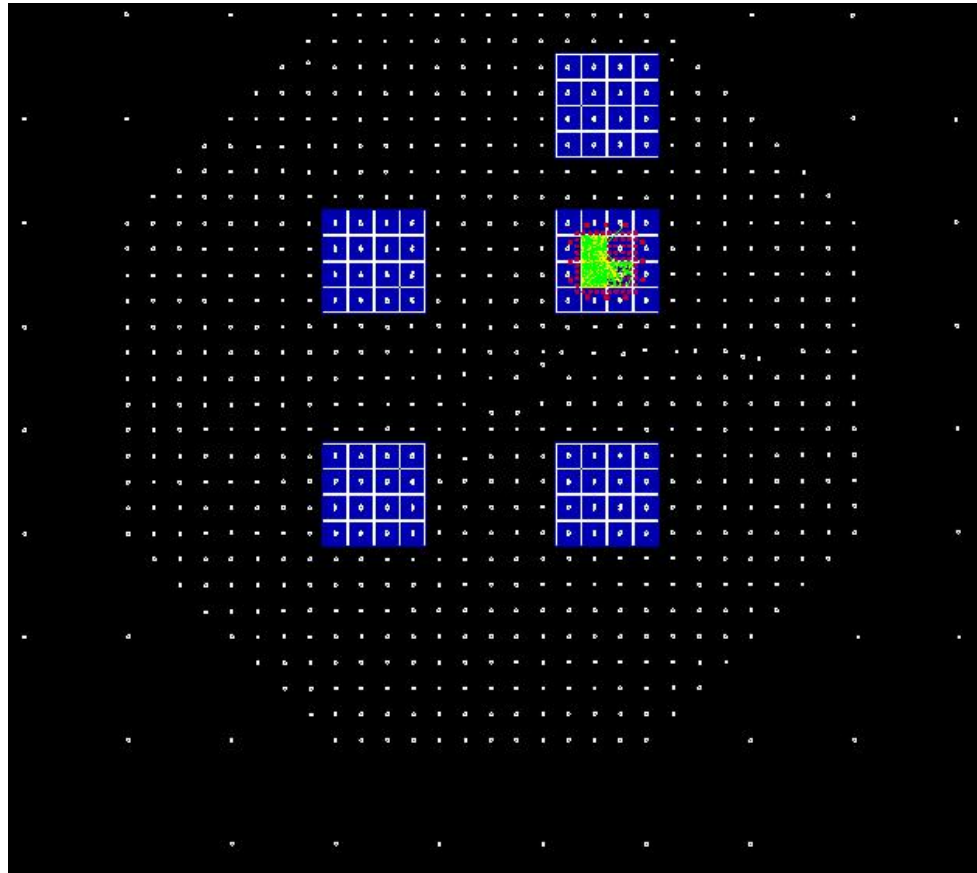
邻近宇宙线源的探索

(ApJ ,716:1076-1083 (2010))

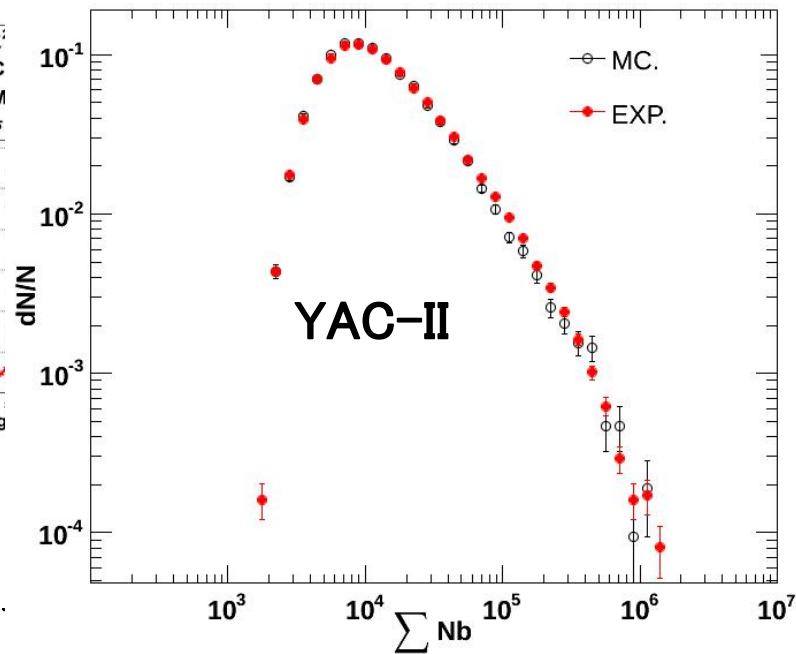
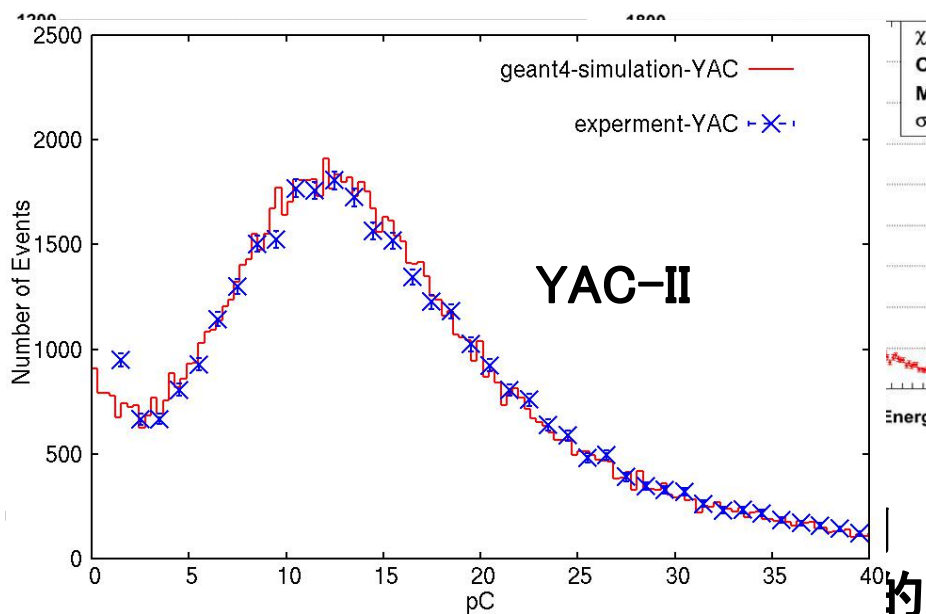


- 1) 我们发现宇宙线全粒子谱鼓包区的能谱的斜率为-2.1。
- 2) 尖锐的“膝”可能来自“邻近宇宙线加速源”

Tibet AS γ 三大复合式阵列蒙卡模拟 (Tibet-III + YAC-II+MD)

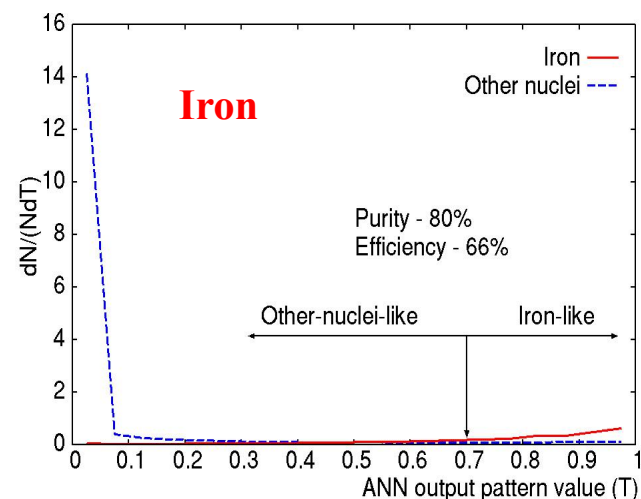
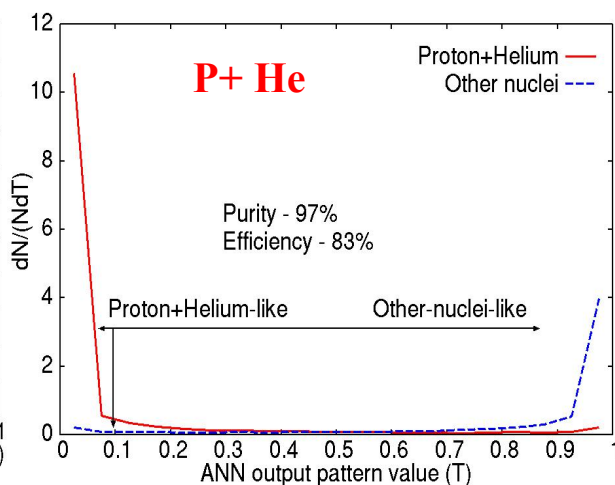
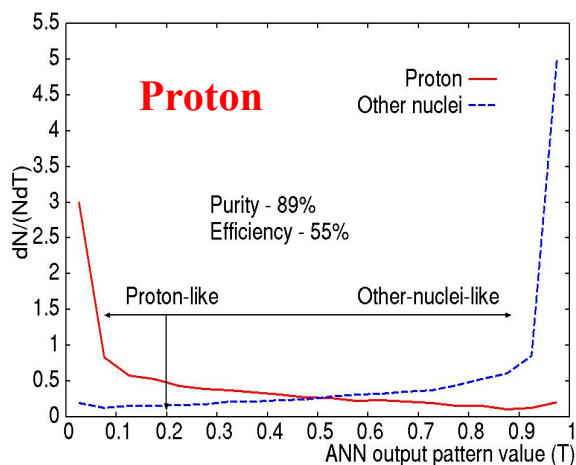


AS γ 3 大复合式阵列蒙卡模拟



验证了AS γ 新联合实验的蒙卡模拟方法的可靠性

方向二预期：“膝”区质子谱，氦谱，铁谱



◆能谱系统误差:

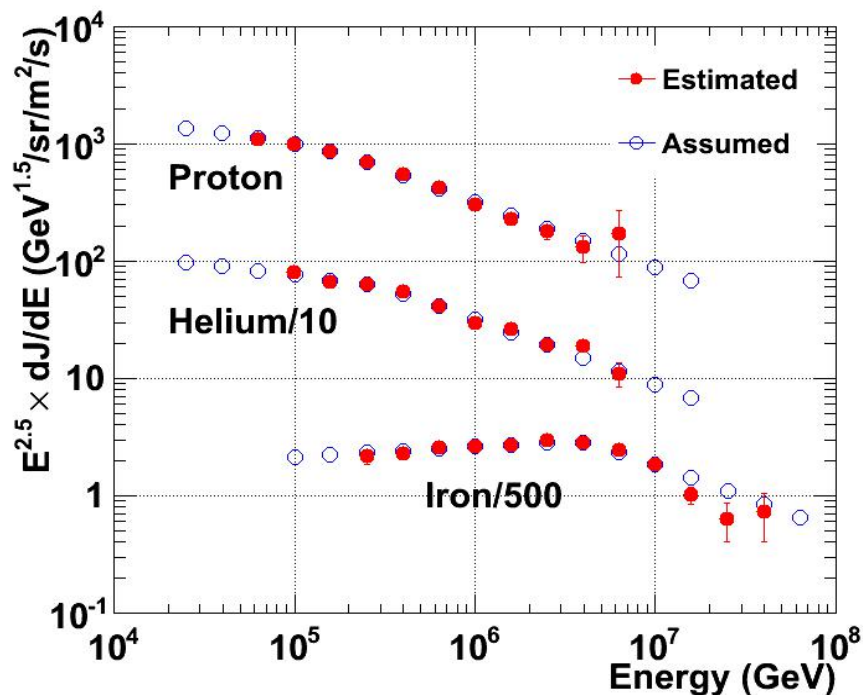
约10%

◆能量决定精度:

约12% (at 10^{15} eV)

◆宇宙线成分鉴别精度

约90%



总结

经重大升级改造的 Tibet AS γ 大型复合式阵列:

~50000 m² 表面阵列 +

~4500 m² 地下水切伦科夫 Muon 阵列 +

~ 500 m² 芯探测器阵列

→宇宙线背景去除率 (>99.99%@ 50TeV)

→ 50 TeV 以上实现无背景观测

预期对宇宙线成分的观测灵敏度:

(P+He) 分离精度达97%, Proton 分离精度达90%, 对铁的分离精度达 80%,
已成为目前宇宙线业界研究“膝”区宇宙线成分灵敏度最高的实验!

预期对 γ 射线的观测灵敏度:

$F(>50\text{TeV}) \sim 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

→~3% Crabs (> 50 TeV, 3y 5 σ)

已成为目前宇宙线业界 20 TeV 以上能区最灵敏的 γ 天文望远镜!

北天100TeV能区可能观测到的 γ 射线源如下:

可能观测到的天体: Crab, TeV J2032+4130,

MIGRO J2019+37, MGRO J2033+42, MGRO J1909+06

HESS J1837-069, Mrk 421

有意思的 γ 源: Cas A, M87, HESS J1834-087,

Mrk 501, LS I +61 303

可能发现的未知天体数 : 几个 ?

Thank you for your attention !