

宇宙线探测实验数据分析

1

陈松战 chensz@ihep.ac.cn

中科院高能物理研究所

9月10-14日 “粒子物理数据分析基础和前沿研讨会” @IHEP

内容

2

一、宇宙线入门

- 宇宙线基本知识
- 宇宙线研究的物理问题
- EAS及其探测
- 中国宇宙线实验发展历史
- 小结

二、EAS阵列宇宙线数据分析基础

- 实验数据的仿真模拟
- 实验数据的刻度
- 数据的重建
- 成分鉴别
- 数据质量监测（月影与标准烛光Crab）
- 小结

三、天体源相关数据分析

- 几个坐标系
- 背景估计
- 天图分析
- 显著性估计
- 伽马/质子鉴别品质因子
- 流强估计
- 能谱拟合
- 小结

四、几个物理分析实例

- GRB的寻找
- 全天区扫描
- 扩展源分析
- AGN的监测
- 宇宙线各向异性分析
- 日地空间磁场的测量
- 小结

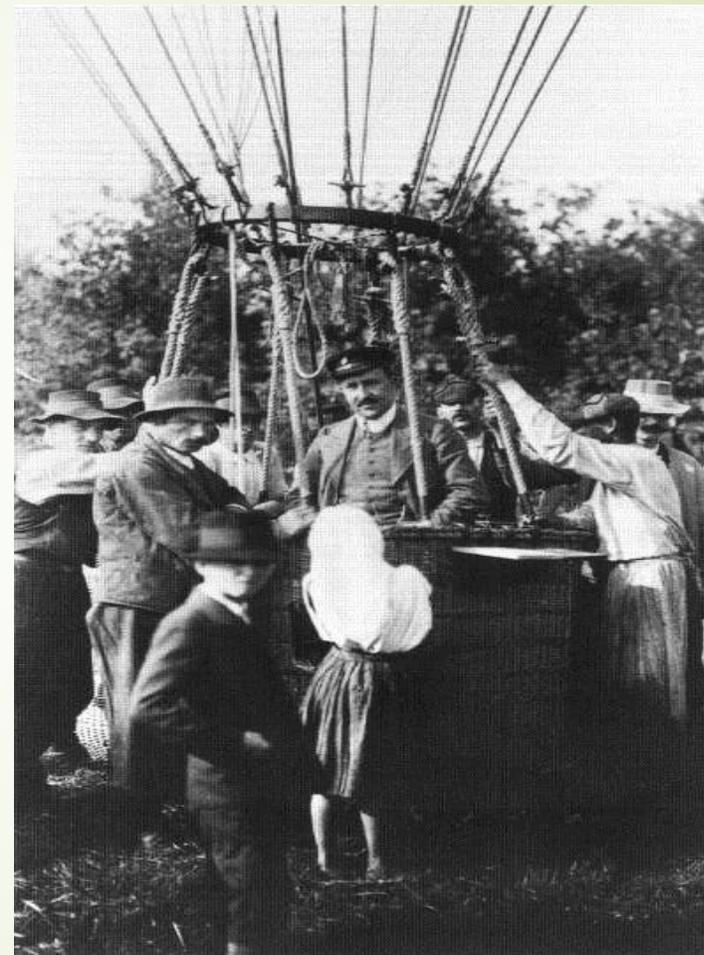
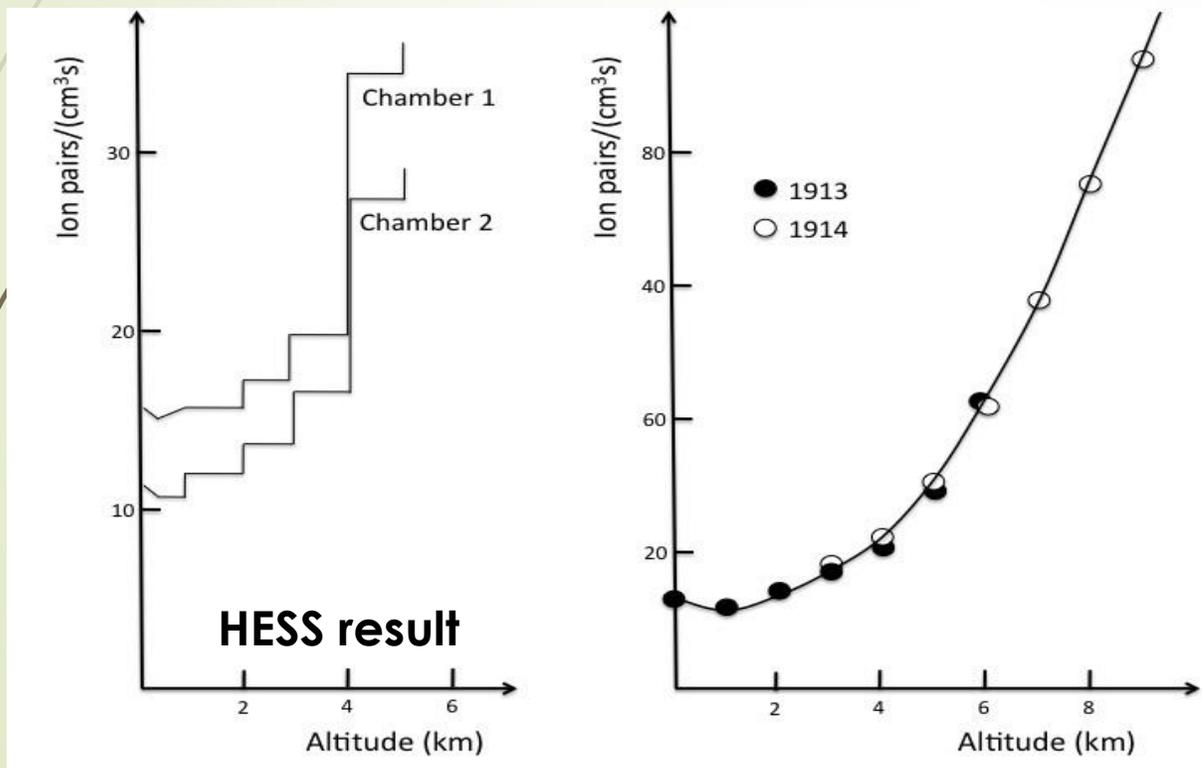
总结

一、宇宙线入门

- ▶ 宇宙线基本知识
- ▶ 宇宙线研究的物理问题
- ▶ EAS及其探测
- ▶ 中国宇宙线实验发展历史

1.1 宇宙线基本知识

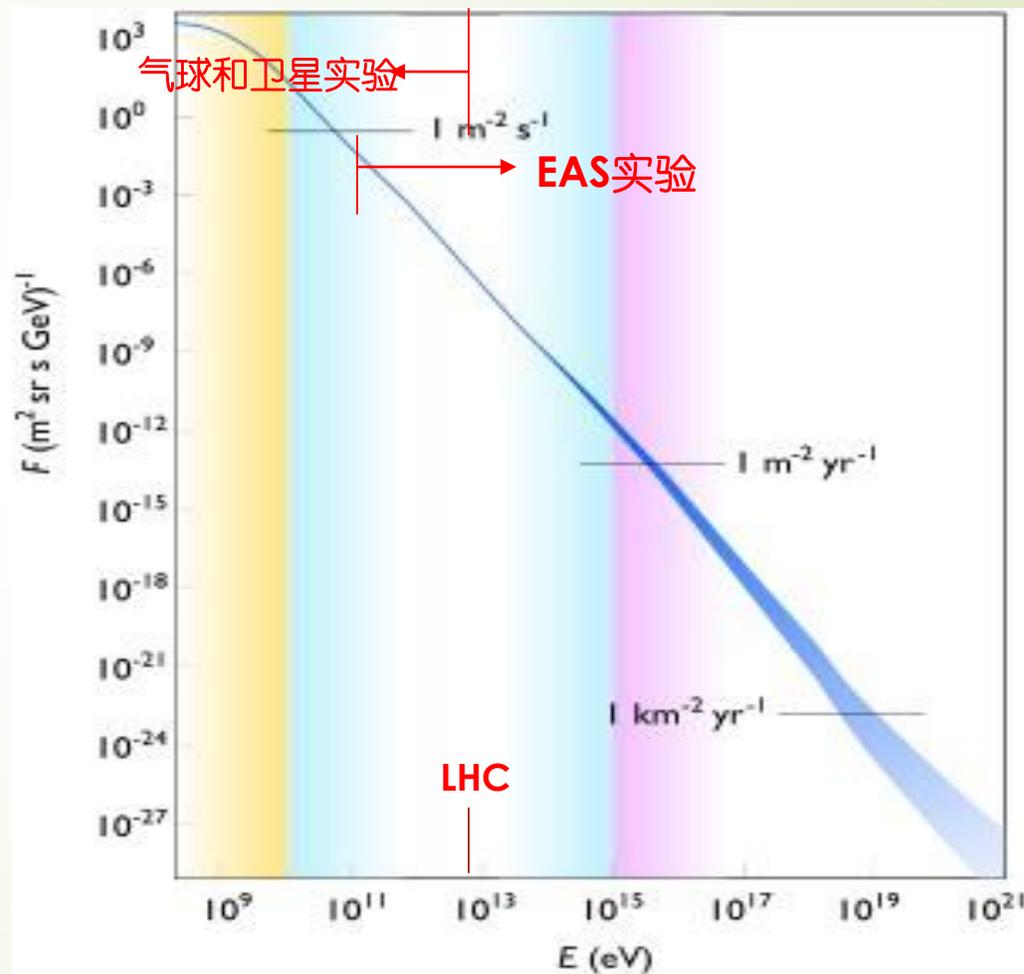
- 1912年，奥地利物理学家Hess乘坐气球五千米高空发现空气电离率升高，说明由地球外辐射（**宇宙线**）引起。



宇宙线的发现 (1912)

宇宙线全粒子能谱

- 宇宙线的能量从 10^9 到 10^{21} eV，跨越10多个量级，呈现一个简单的幂律形式，这表明其非热谱性质。
- 宇宙线：主要为核子，约87%质子，12% α 粒子（氦核子），少量锂、铍、硼、碳、氮、氧等原子核，以及电子、 γ 射线和中微子。



宇宙线能谱

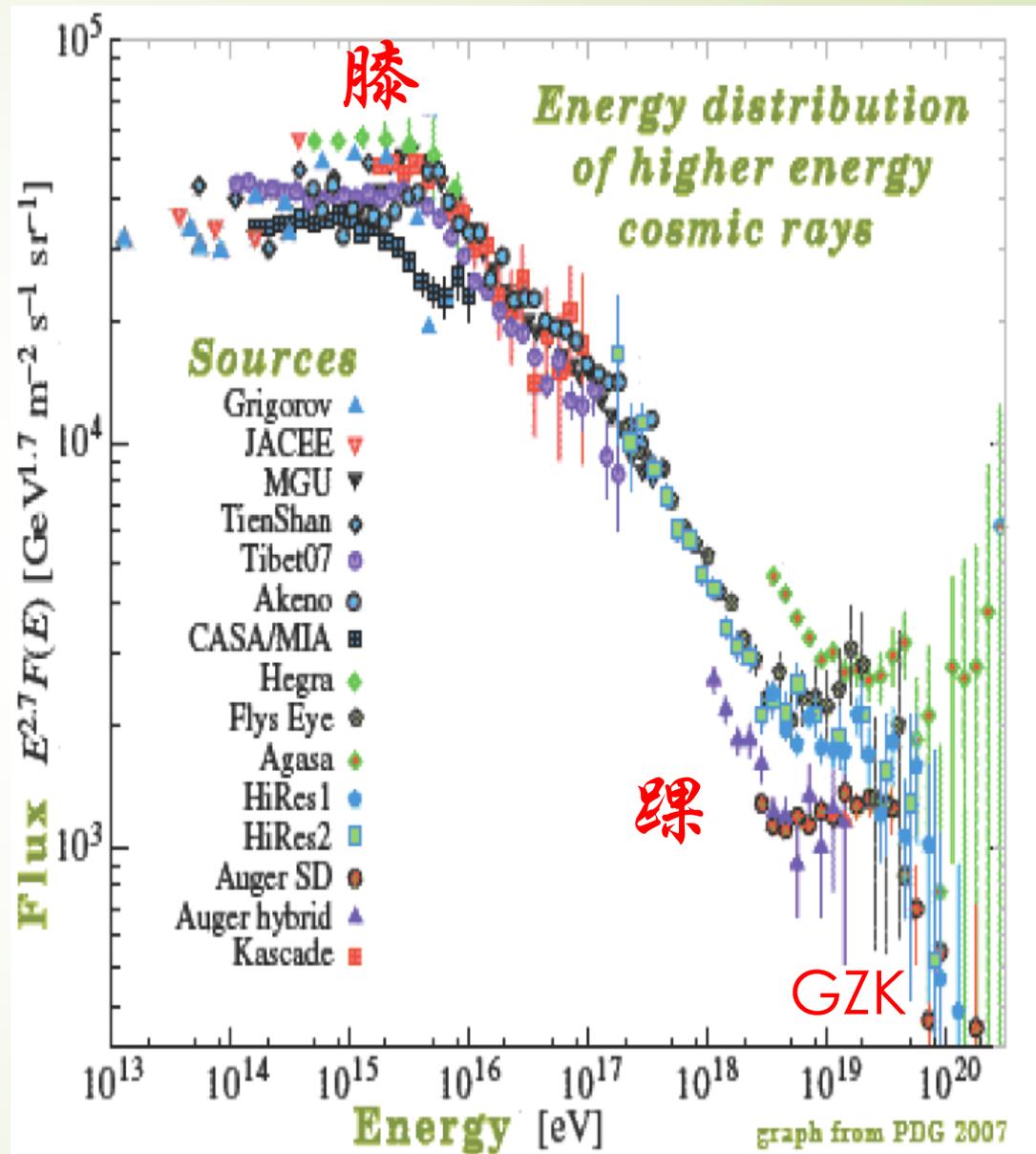
全粒子谱几个显著特征：

$4 \times 10^{15} \text{eV}$ ‘膝’

$4 \times 10^{17} \text{eV}$ ‘第二膝’

10^{19}eV ‘踝’

10^{20}eV ‘GZK 截断’

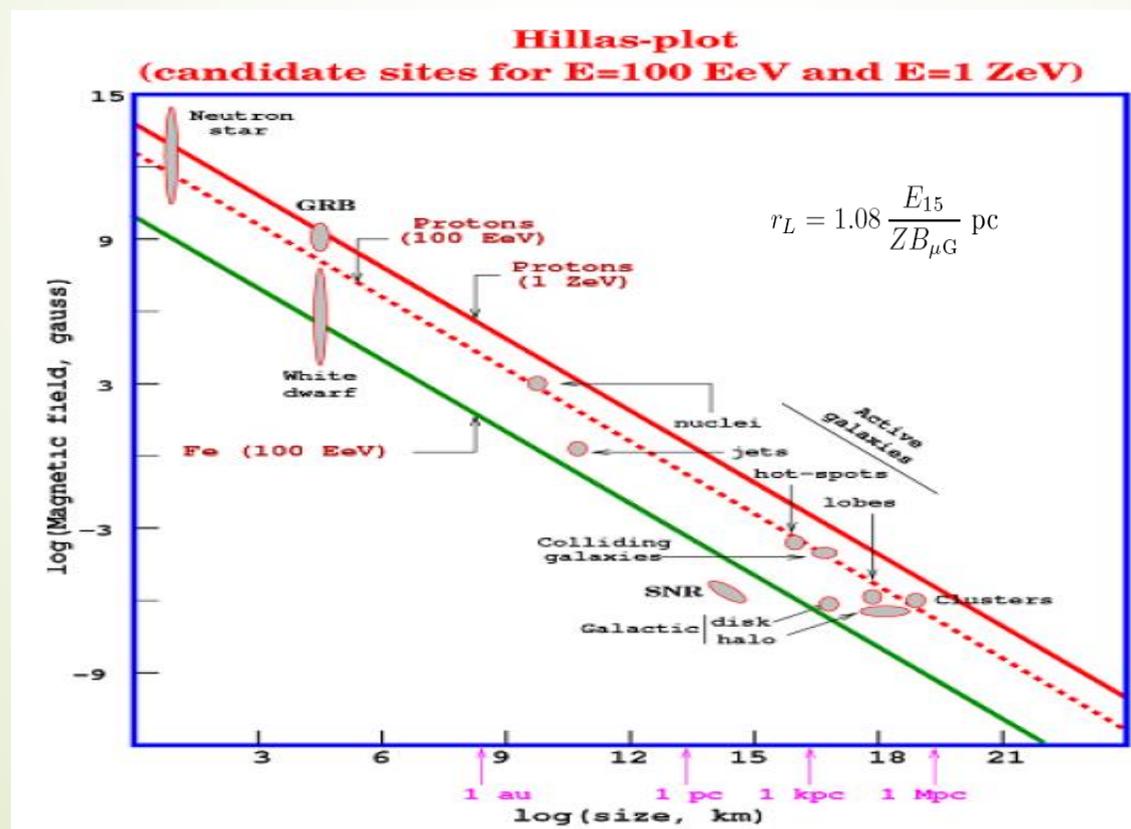


1.2 宇宙线相关的物理问题

- ▶ 早期在基本粒子方面成果：正电子（1933）、 μ 子（1937）、 π 介子（1947）、K介子（1948）、 Λ （1951）、 Ξ 重子（1952）和 Σ （1953）等。
- ▶ 现在研究内容转向天体物理，主要围绕三个基本问题：
 - 起源：宇宙线起源于何处？河内or河外？超新星？AGN？GRB？
 - 加速：宇宙线是如何被加速的？
 - 传播：星系间介质作用？星际磁场作用？与EBL，CMB作用？

宇宙线的起源

- 宇宙线的起源是所有问题的核心，被称为“世纪之谜”。SNR, AGN, GRB, Pulsar and PWN ?
- 当前宇宙线研究的核心问题就是寻找99%的强子宇宙线的起源。



寻找宇宙线源的主要研究方向

► 间接研究

宇宙线能谱的细致结构（成分谱），膝，第二膝，踝。

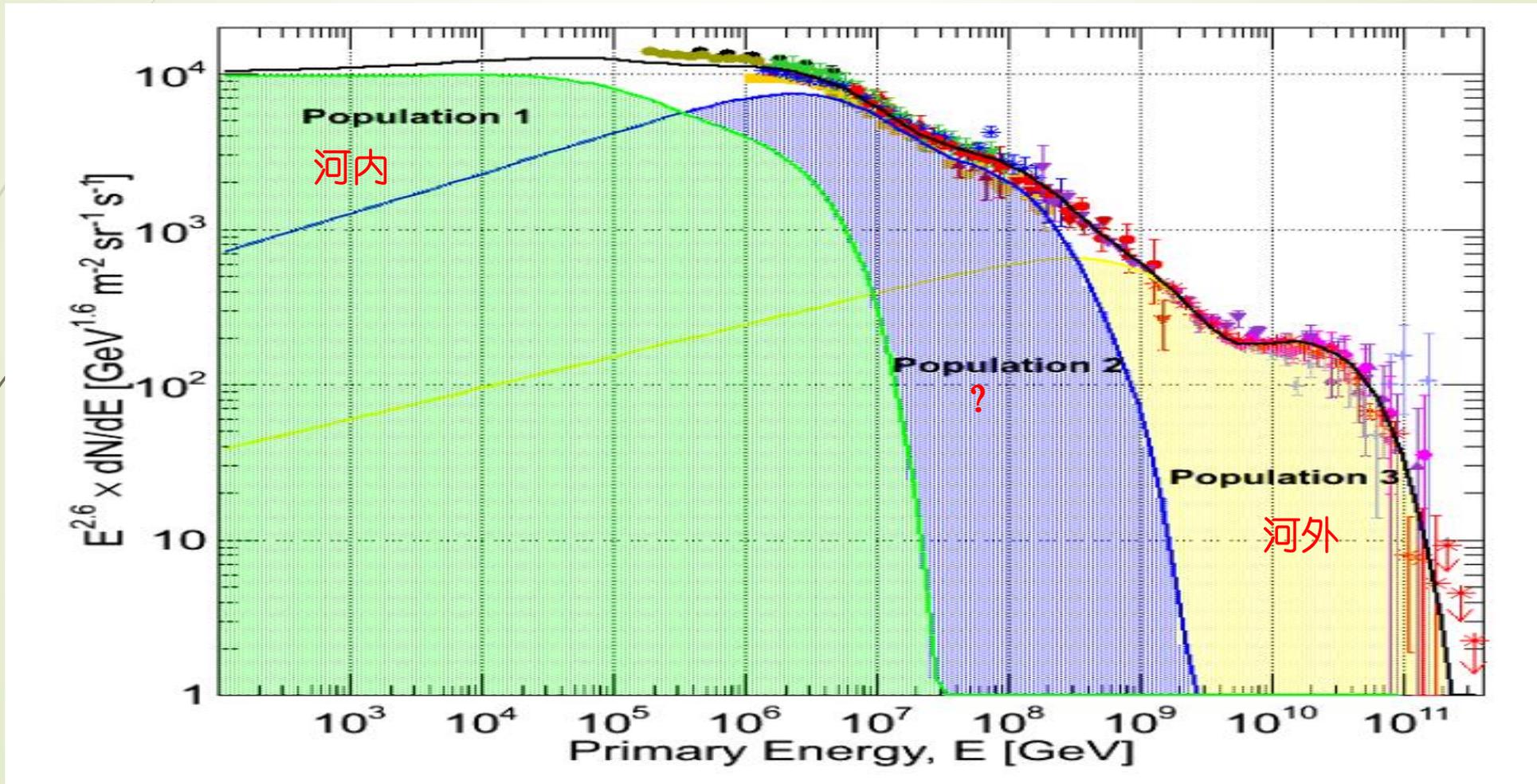
► 直接寻找

伽马天文： 轻子or强子起源？ 100TeV伽马！

高能中微子天文： 强作用次级粒子衰变产物

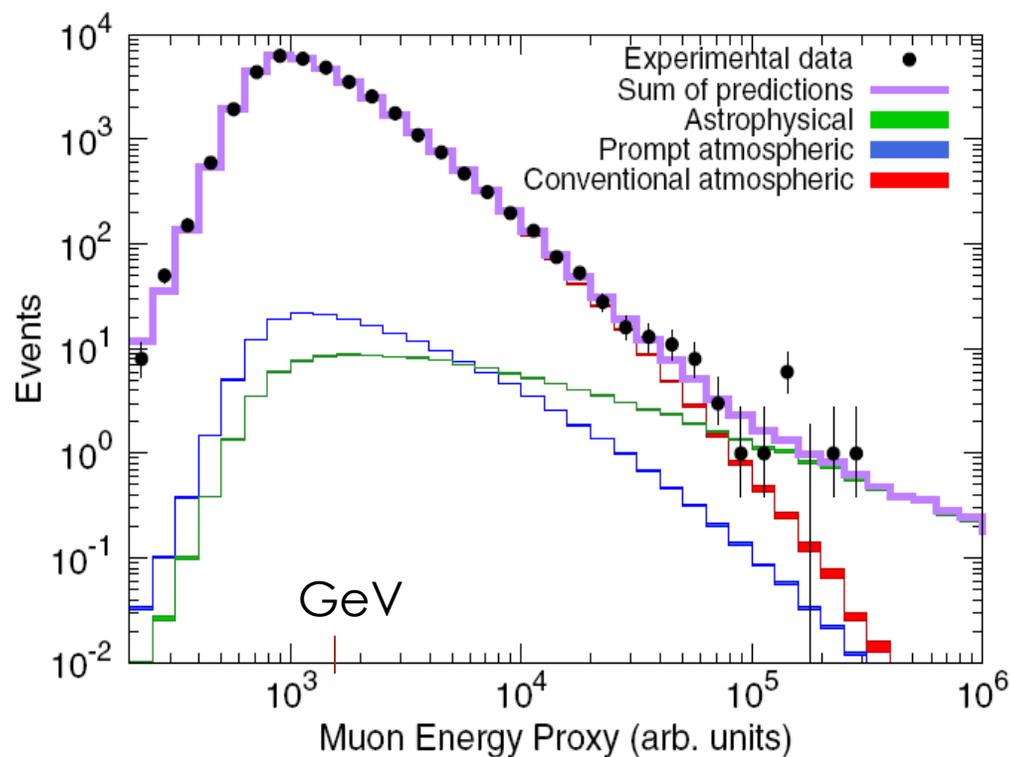
极高能宇宙线天文： 磁场偏转小

宇宙线全粒子能谱解释

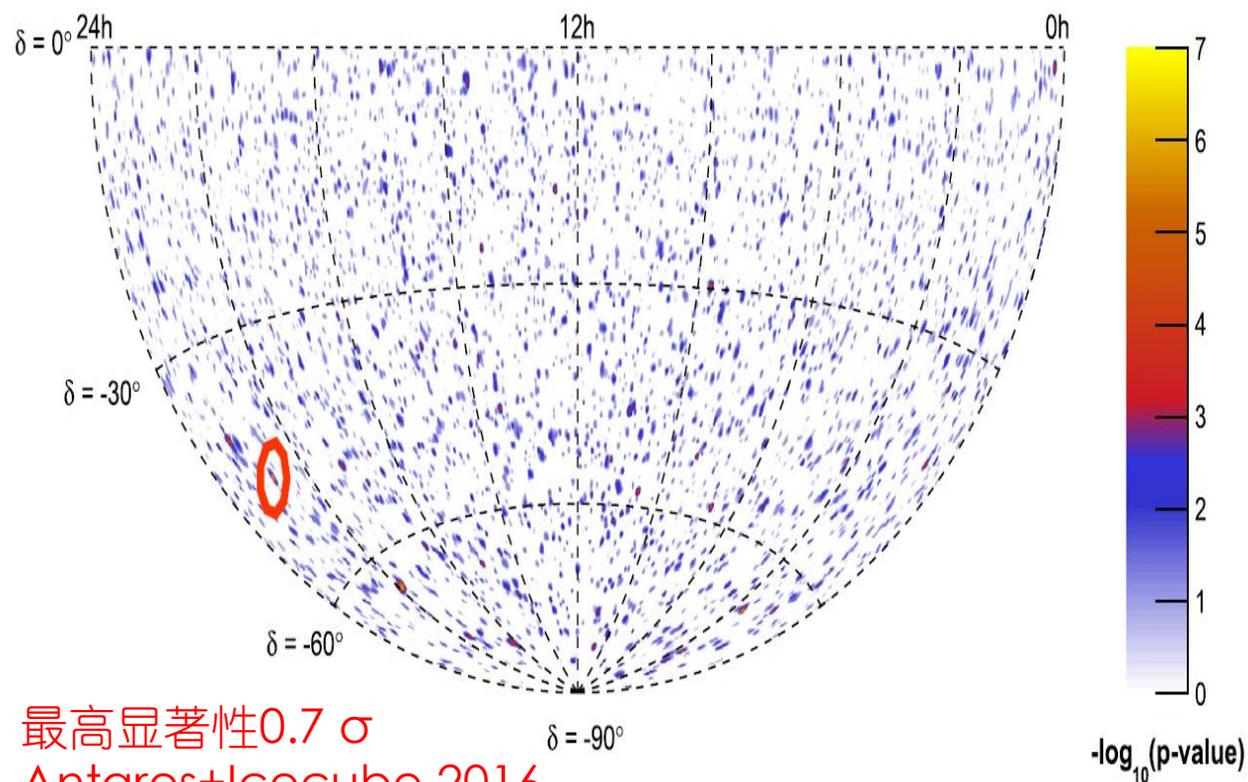


中微子天文进展

- 首次观测到高能宇宙中微子 (3.7σ)
- 没有观测到中微子源



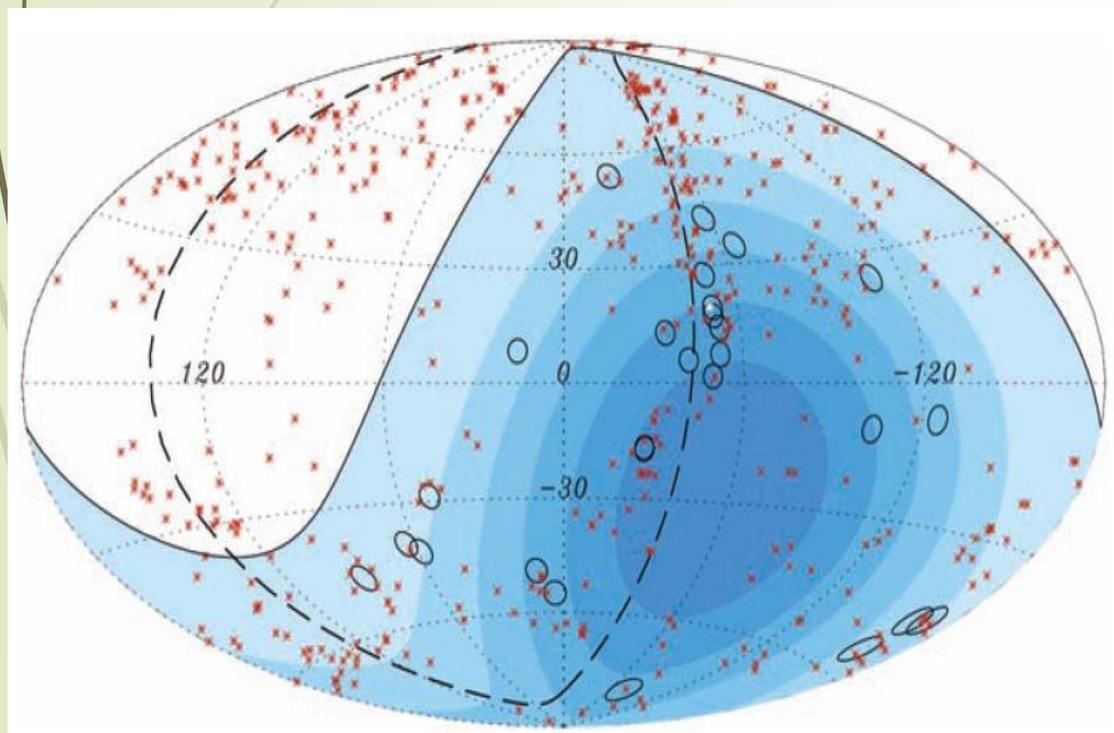
Icecube 2015



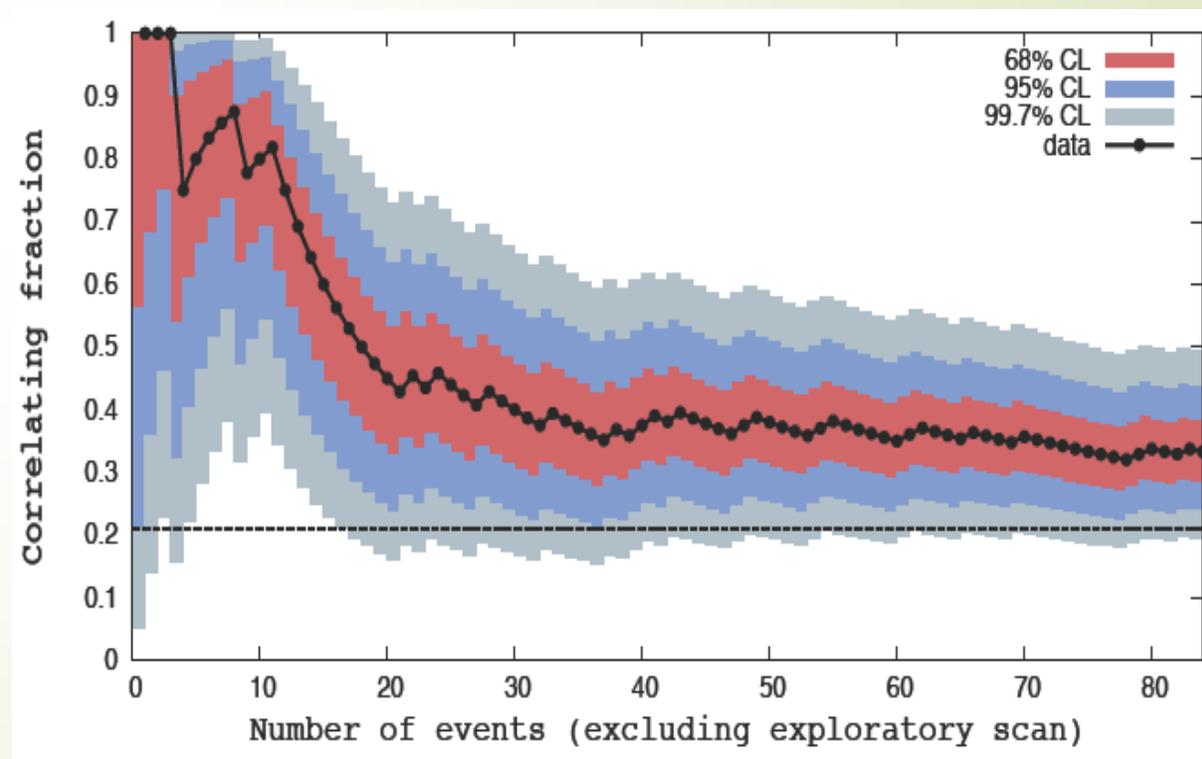
最高显著性 0.7σ
Antares+Icecube 2016

极高能宇宙线天文进展

- 2007 Auger声称极高能宇宙线 ($>60\text{EeV}$) 与邻居AGN关联 (99%)，但是随着数据量增加，关联已经很弱！



Science 2007

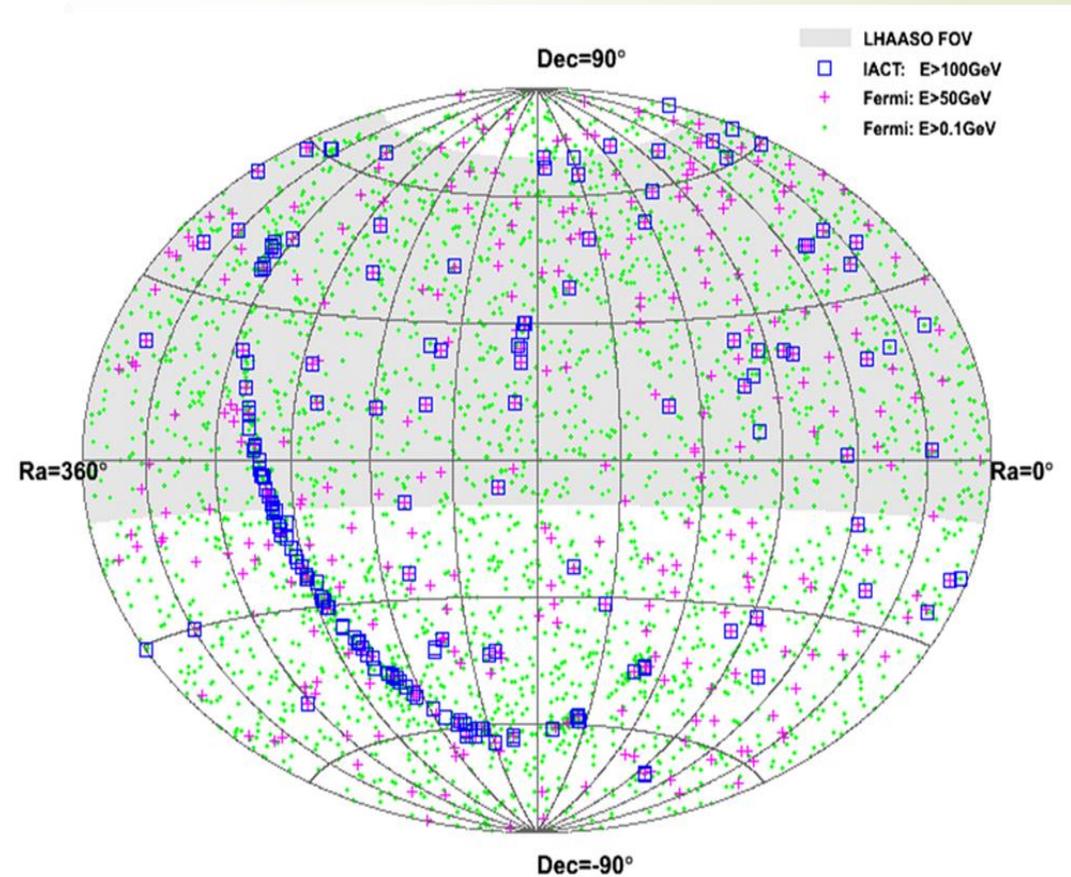
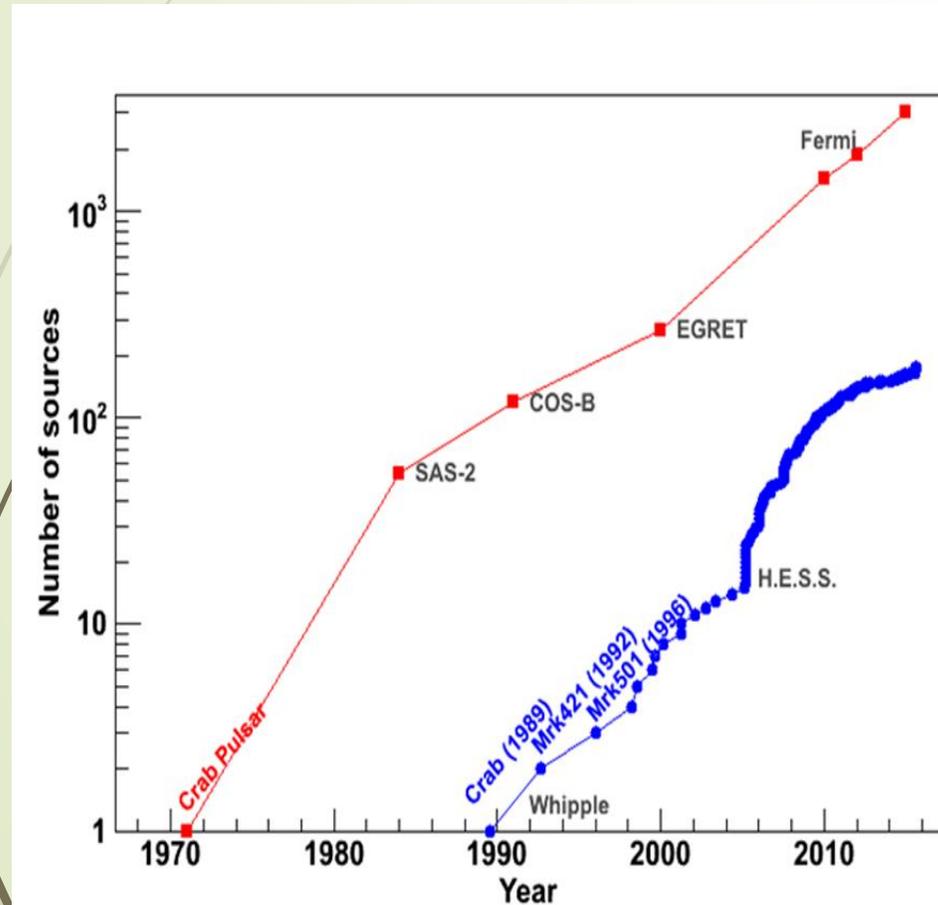


Auger 2011

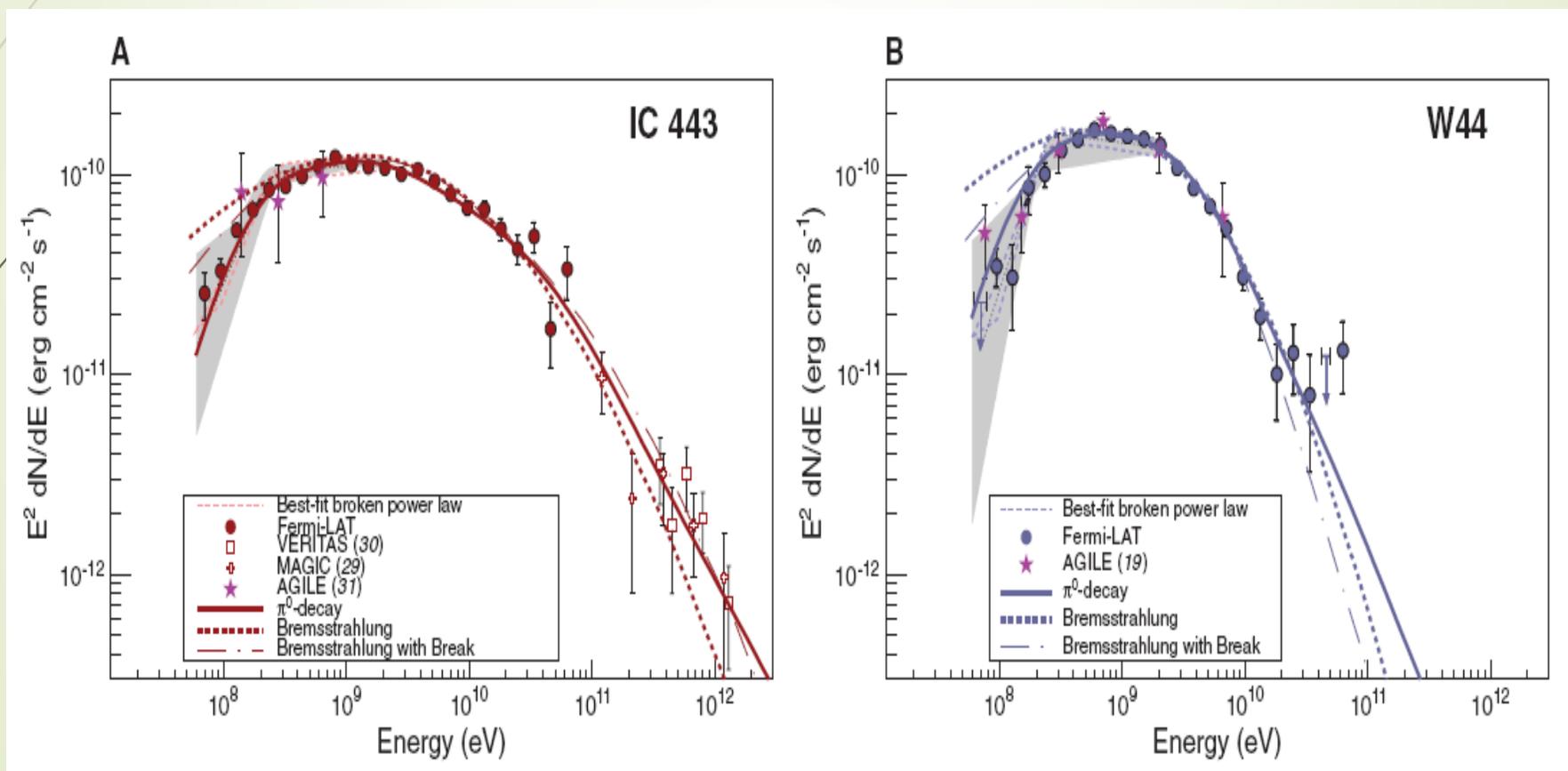
伽马射线天文

➔ 3033 @GeV

170+ @ >100GeV

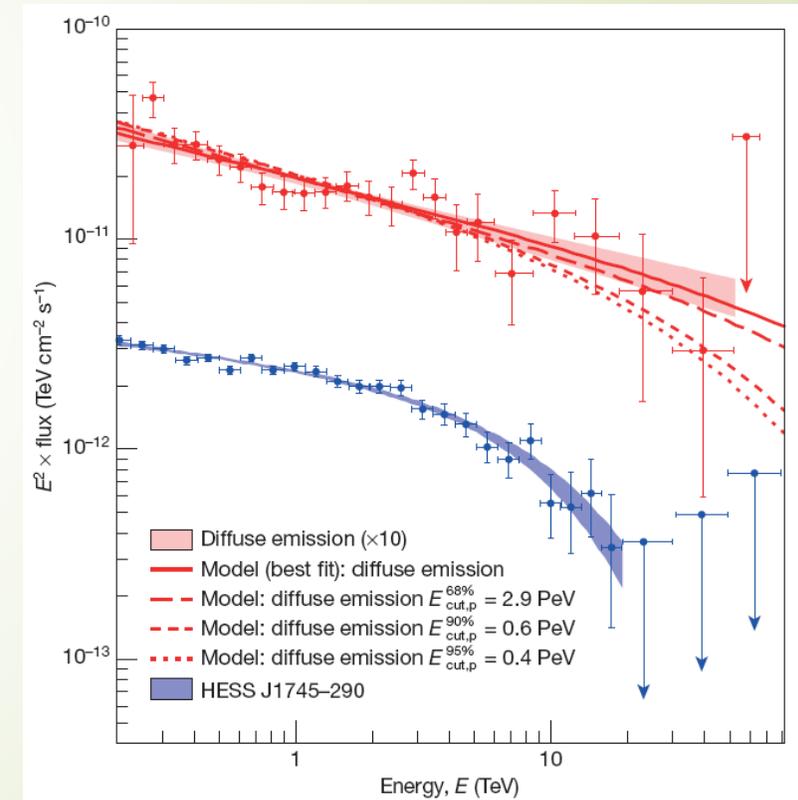
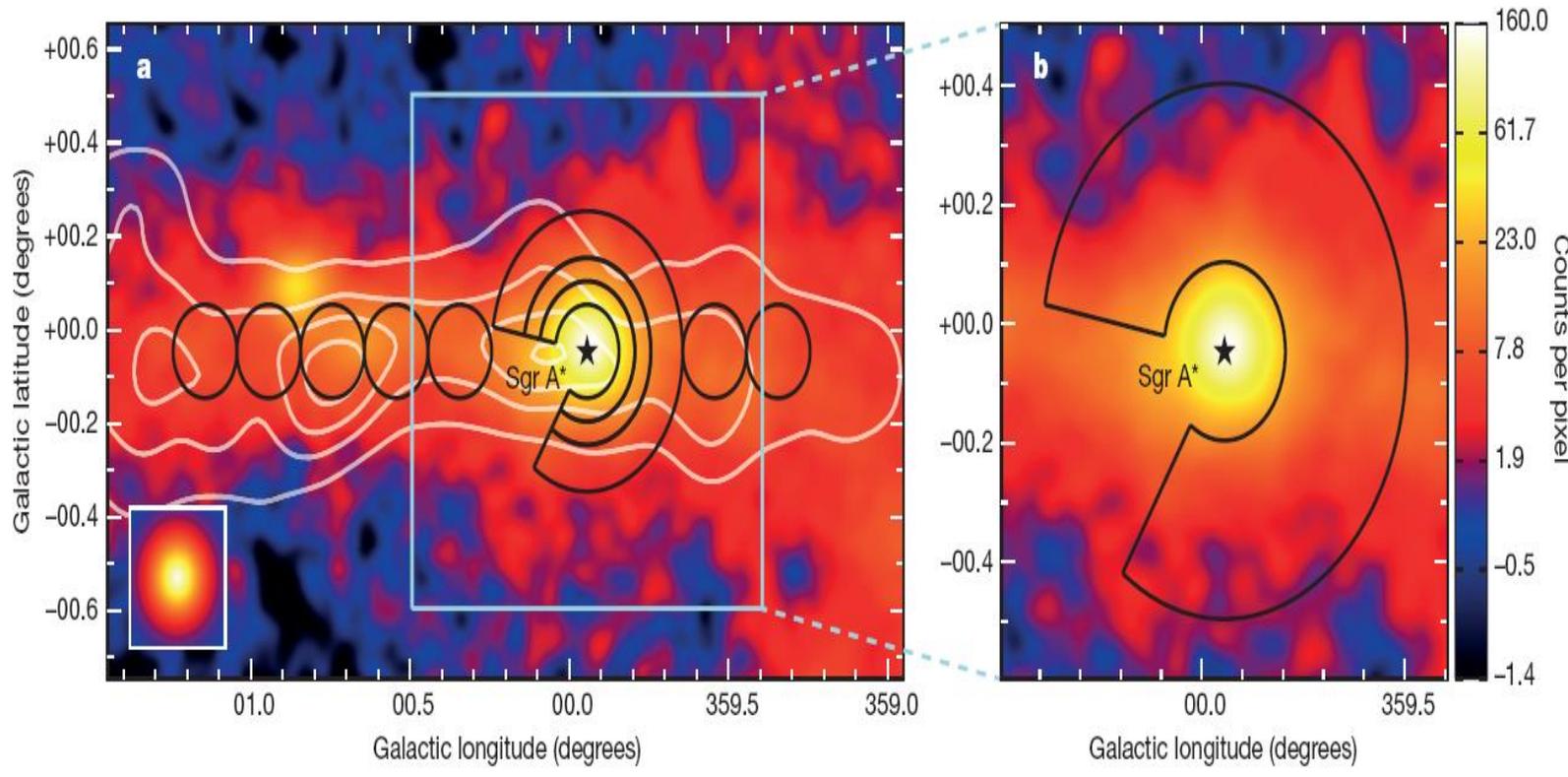


通过伽马射线谱形判定两个年老SNR为强子起源, 被
《科学》评为2013年十大科学突破之一!
相应宇宙线 $<10\text{TeV}$, 但并未解决宇宙线起源!

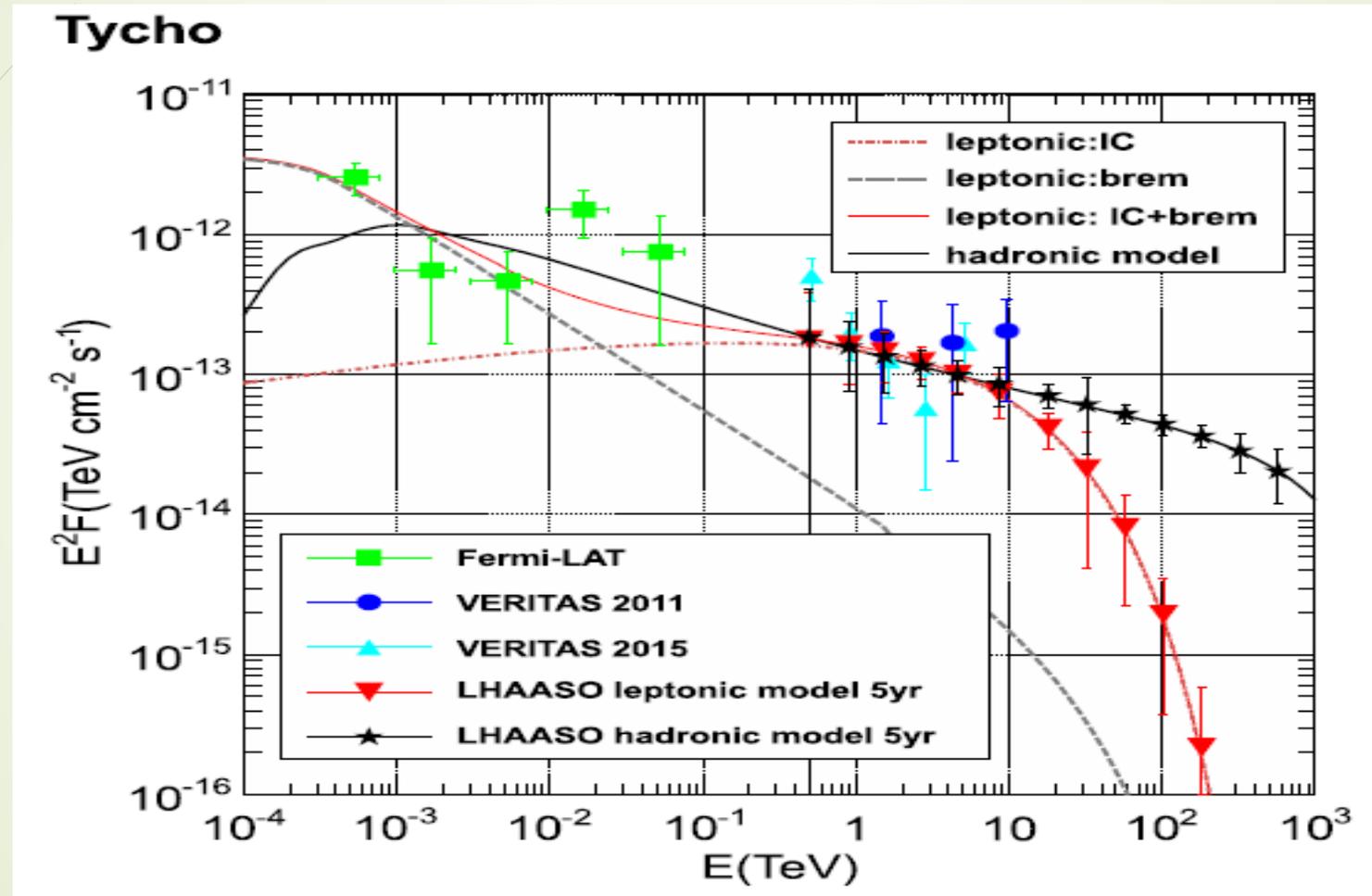


PeVtron ?

- 2016年HESS声称找的PeV宇宙线可能与银心超大质量黑洞相关!

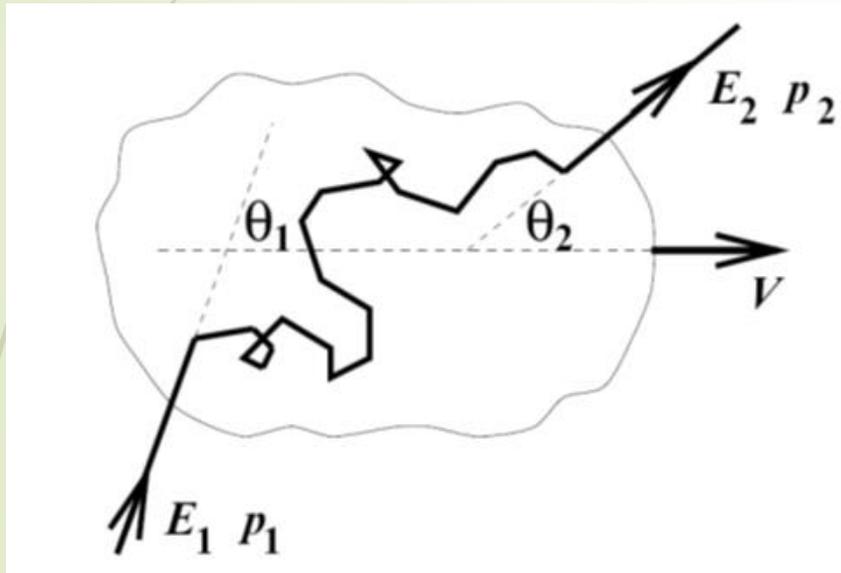


100 TeV伽马将是认证宇宙线源的重要证据!

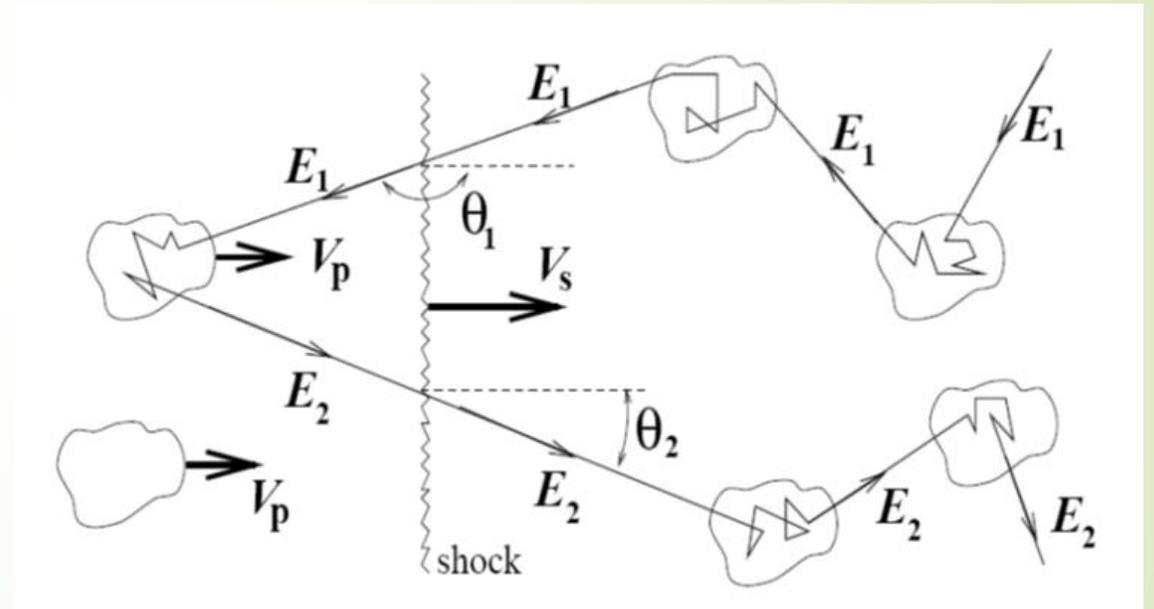


宇宙线的加速

- ➔ 运动磁场二级费米加速 (100GeV)
- ➔ 强激波一级费米加速, 加速非常有效!



$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E} \simeq \frac{4}{3} \beta^2$$



$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E} \simeq \frac{4}{3} \beta = \frac{4}{3} \frac{V_p}{c} \simeq \frac{V_s}{c}$$

宇宙线的传播

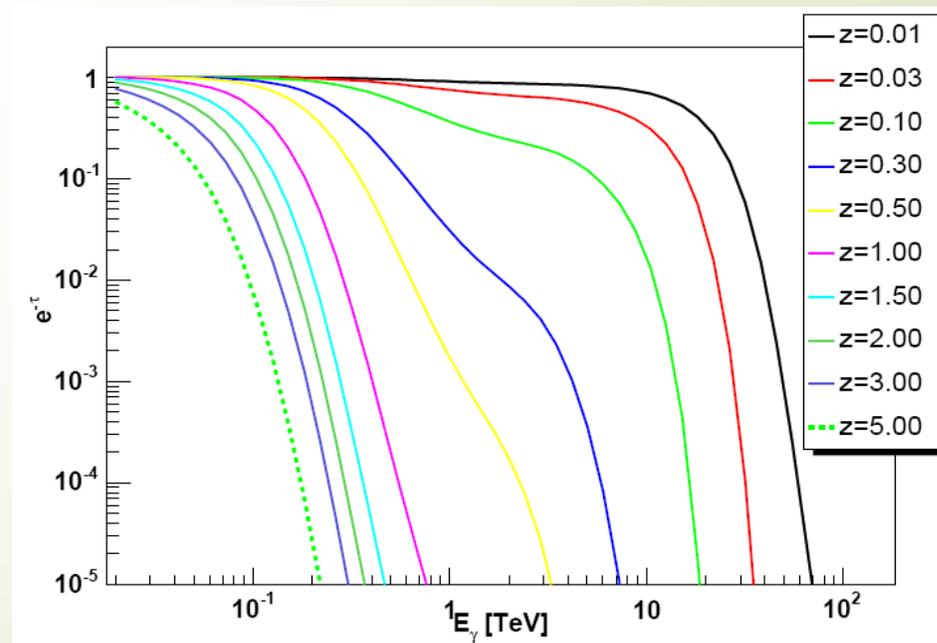
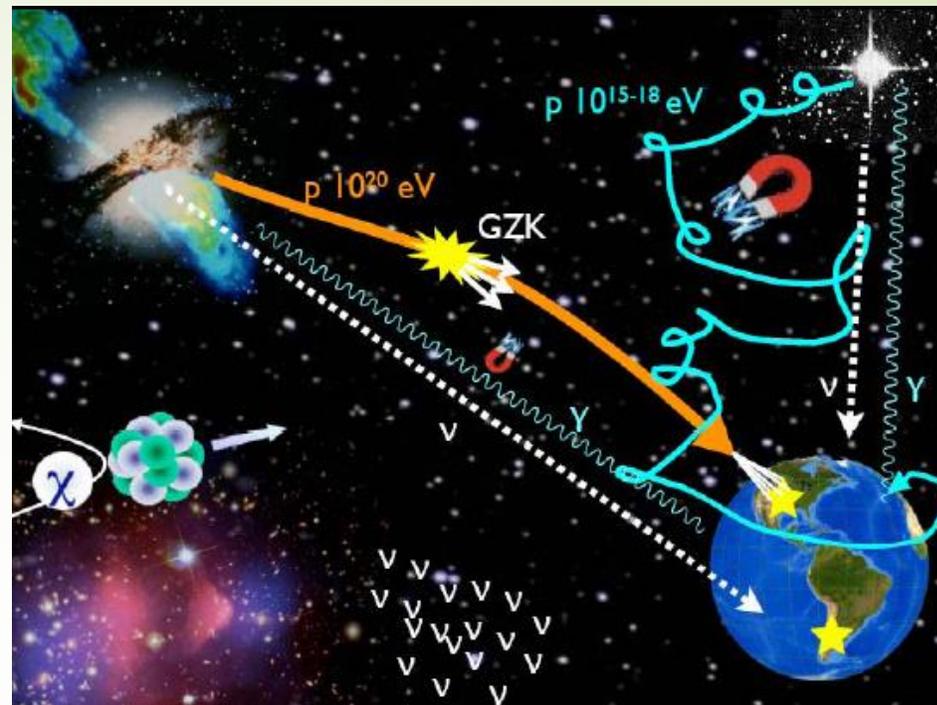
- 与星系际介质作用
- 磁场对带电粒子的偏转

$$\frac{R}{1pc} \approx \frac{E / 1PeV}{B / 1\mu G}$$

- 背景光子对高能光子的吸收



- CMB与极高能强子作用GZK



1.3 宇宙线的探测技术及其主要实验

► 空间直接探测

卫星、空间站、气球：有效面积限制其高能探测。
AMS, CREAM

► 地面间接探测

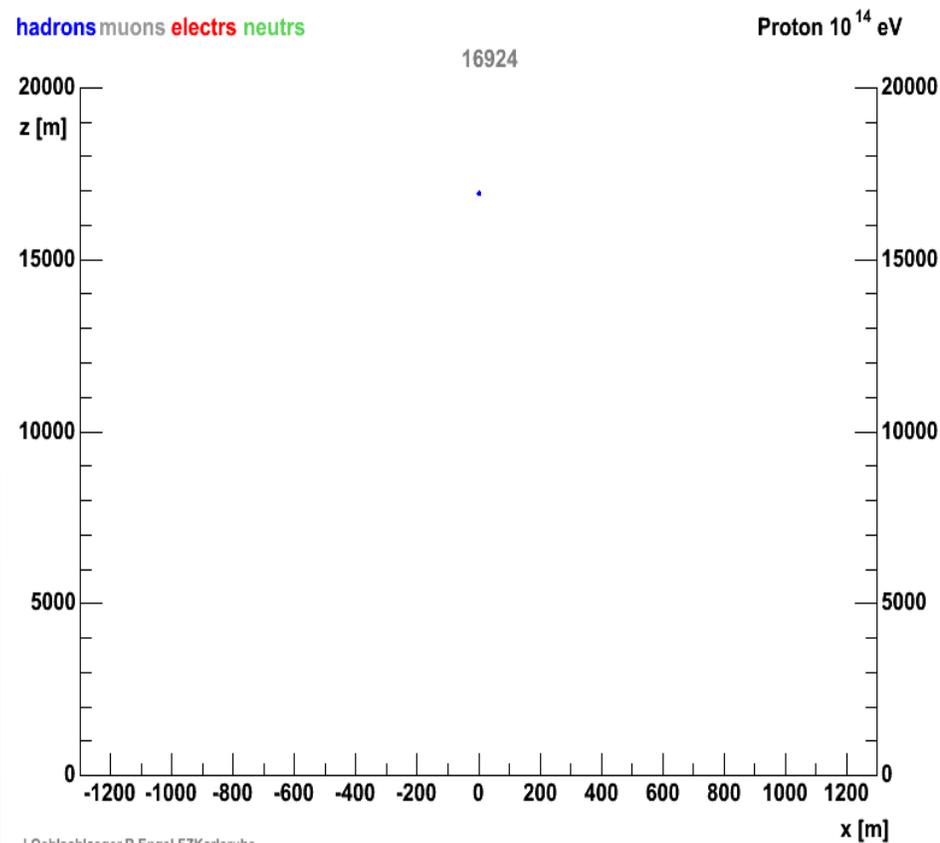
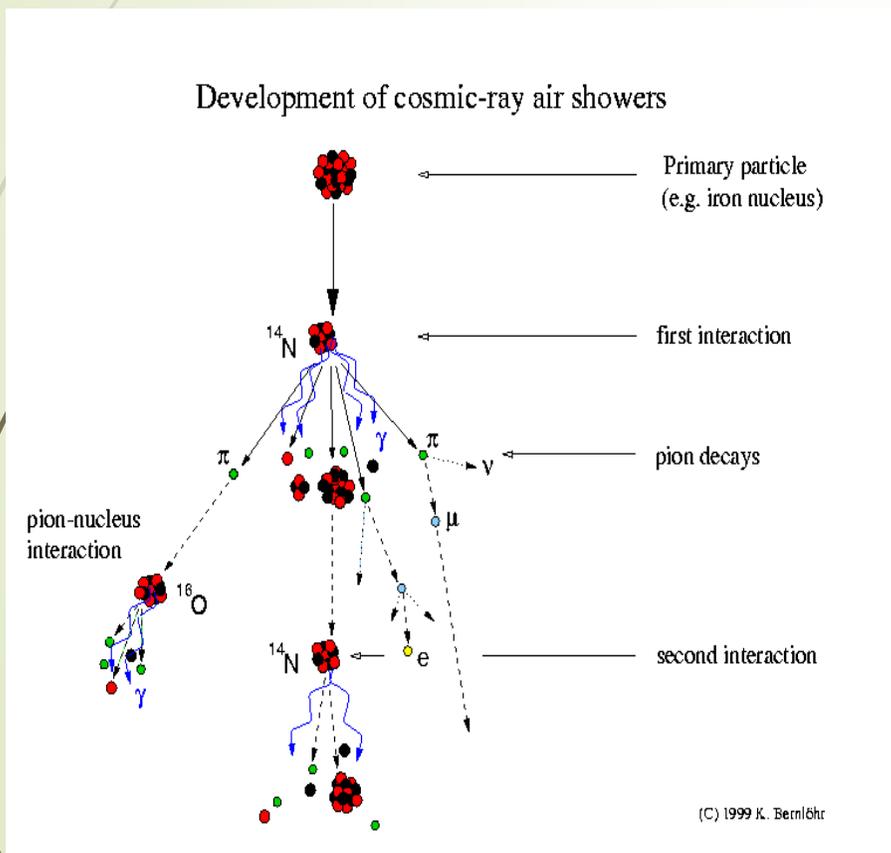
通过探测与空气核作用产生的次级粒子进行间接探测宇宙线中的强子和伽马。

通过探测与水或冰作用产生的次级粒子发射的光信号进行间接探测宇宙线中的中微子。

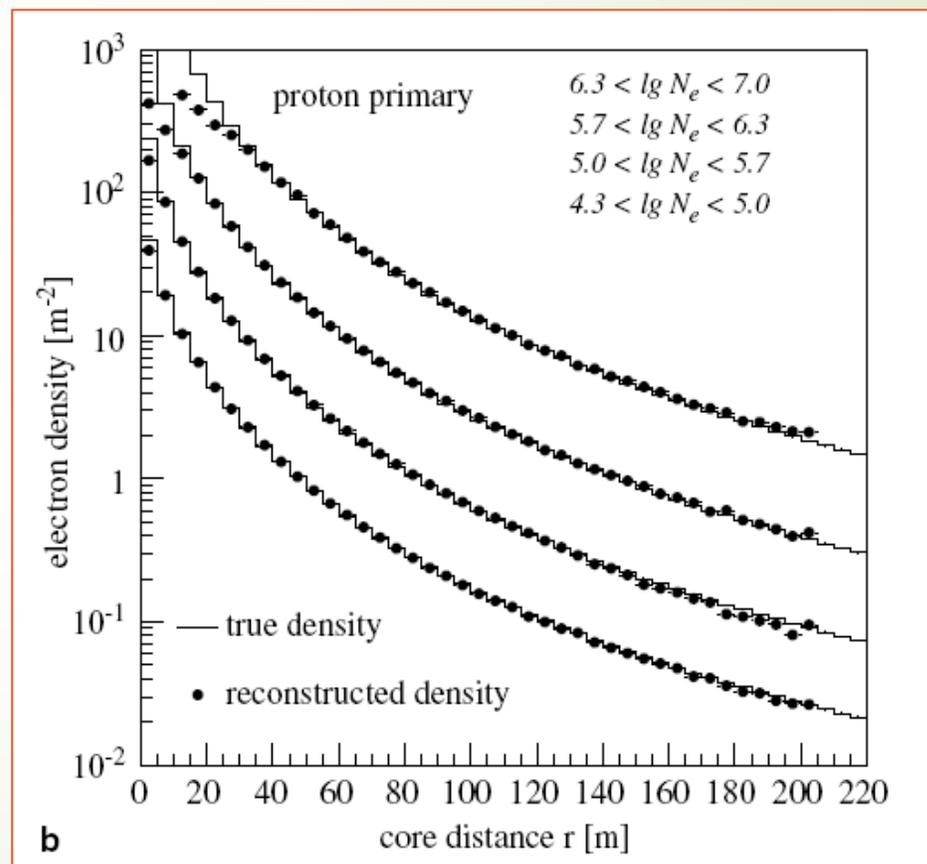
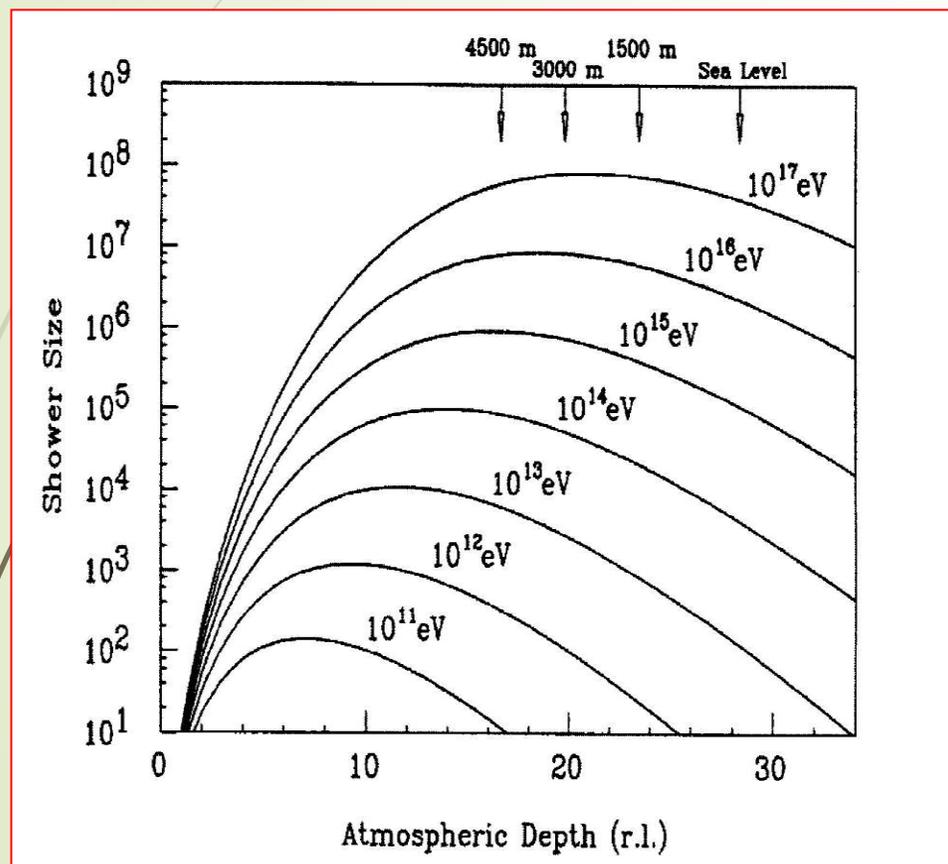
广延大气簇射 (EAS)

20

- 一个高能粒子进入大气层与空气作用，级联产生大量次级。
- 现在宇宙线通常指与大气层作用之前的原初粒子。

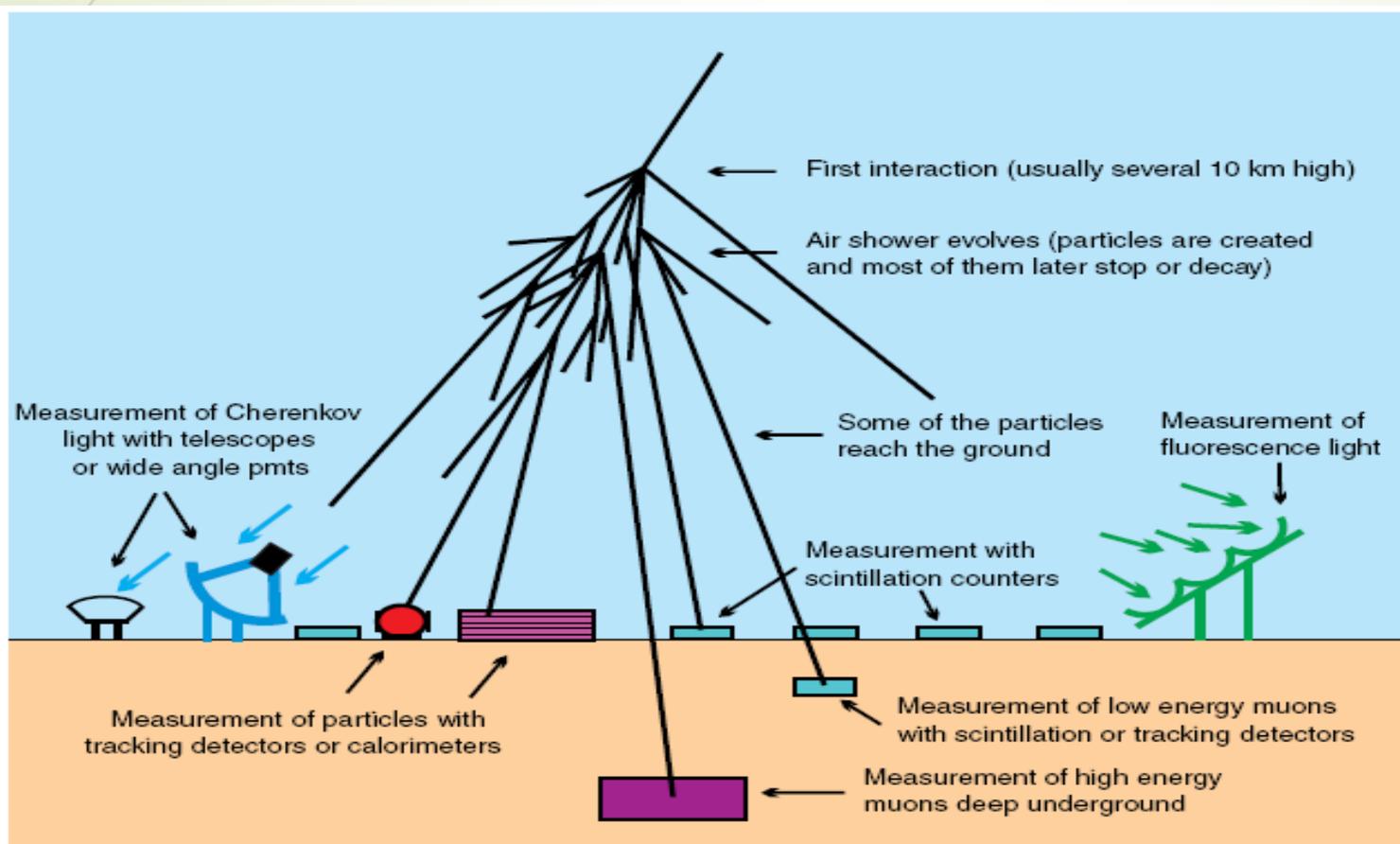


EAS纵向和横向发展



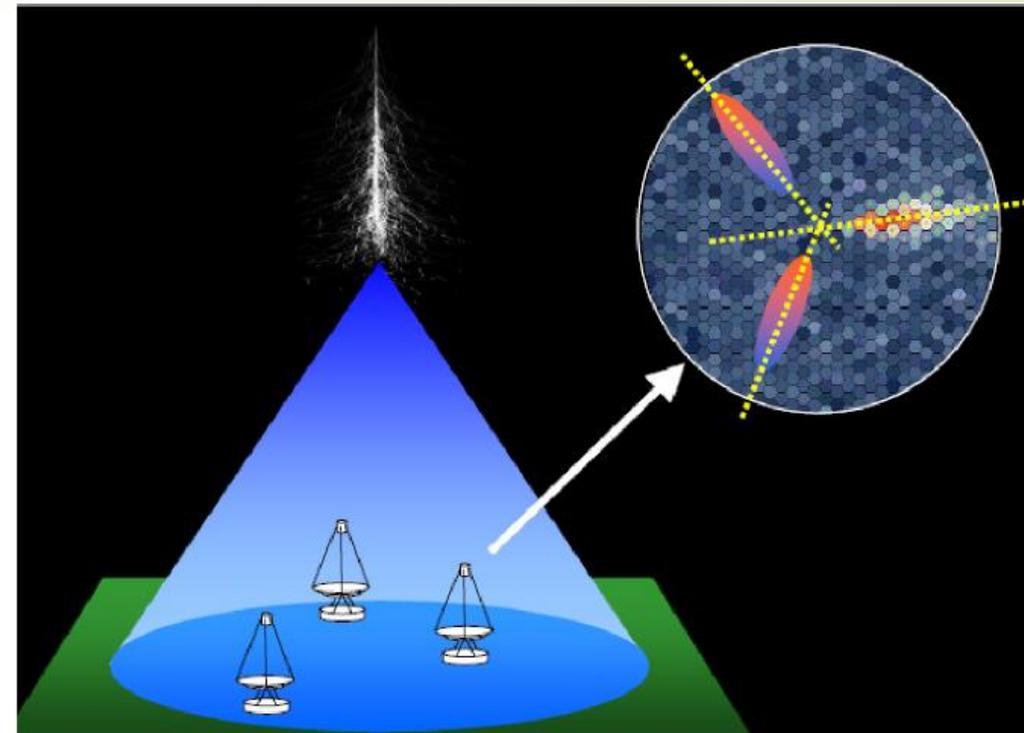
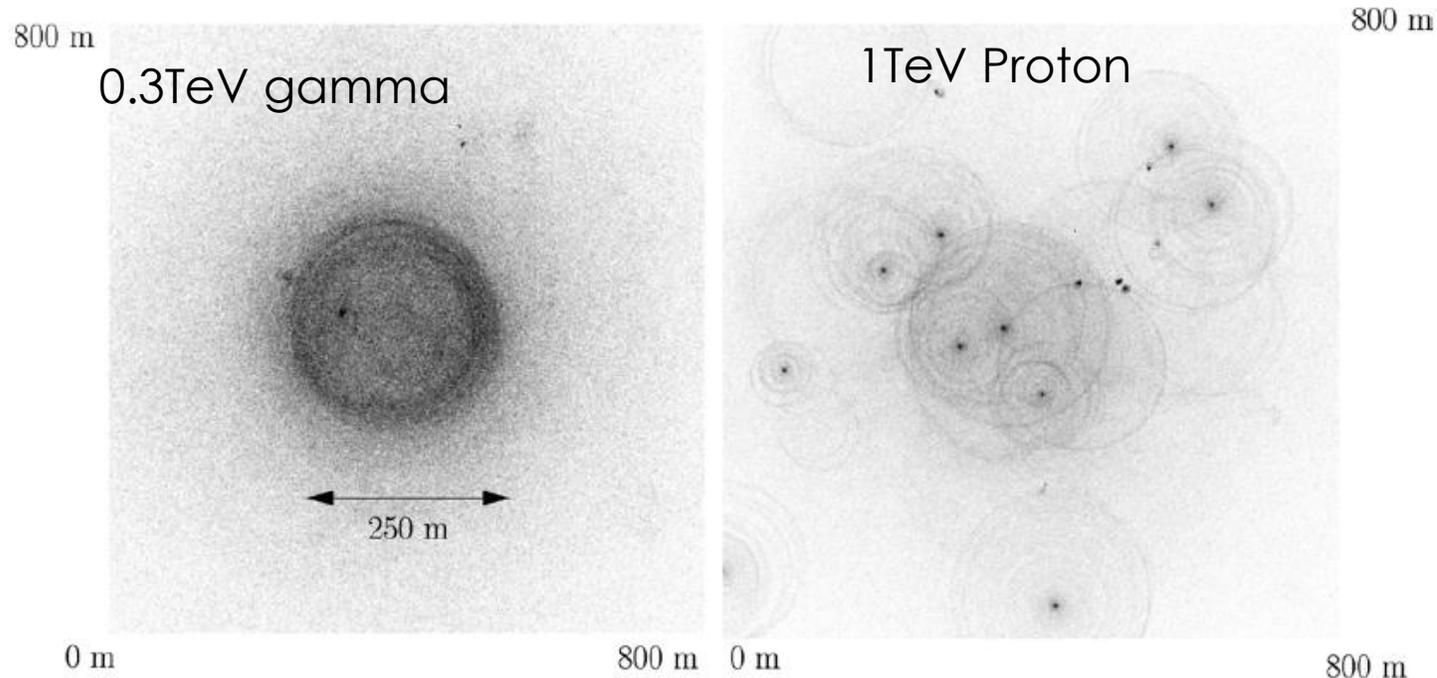
广延大气簇射及各种地面/下探测技术

- 横向：强子成份、电磁成份、 μ 子和中微子等
- 纵向：Cerenkov光、荧光

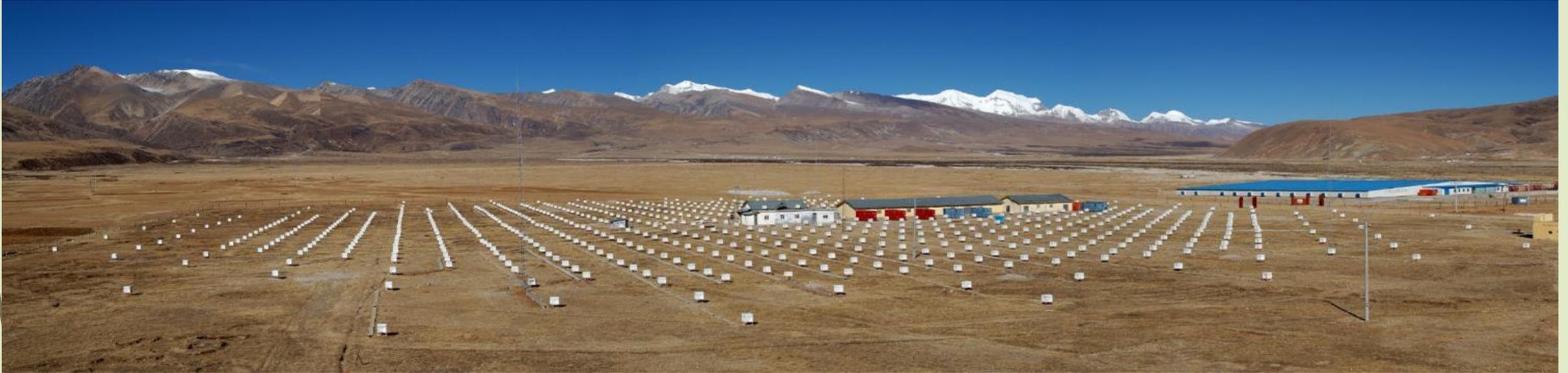


IACT (HESS, MAGIC, VERITAS) (2003-至今)

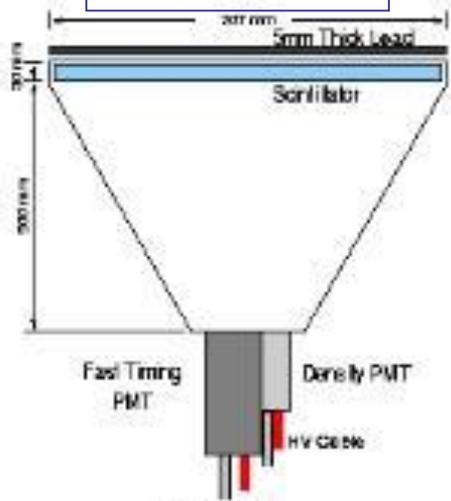
定点伽马射线探测器!



EAS阵列 (AS γ 和ARGO-YBJ)



AS γ 闪烁体



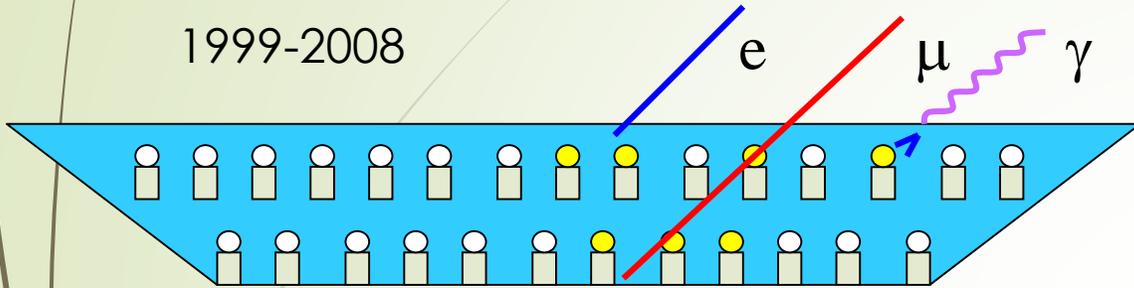
**AS γ 采样式探测
(1989-至今)**

**ARGO-YBJ全覆
盖地毯式探测
(2006-2013)**

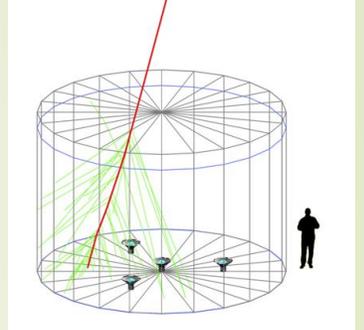


EAS阵列：水Cerenkov 探测器（Milagro和HAWC）

1999-2008

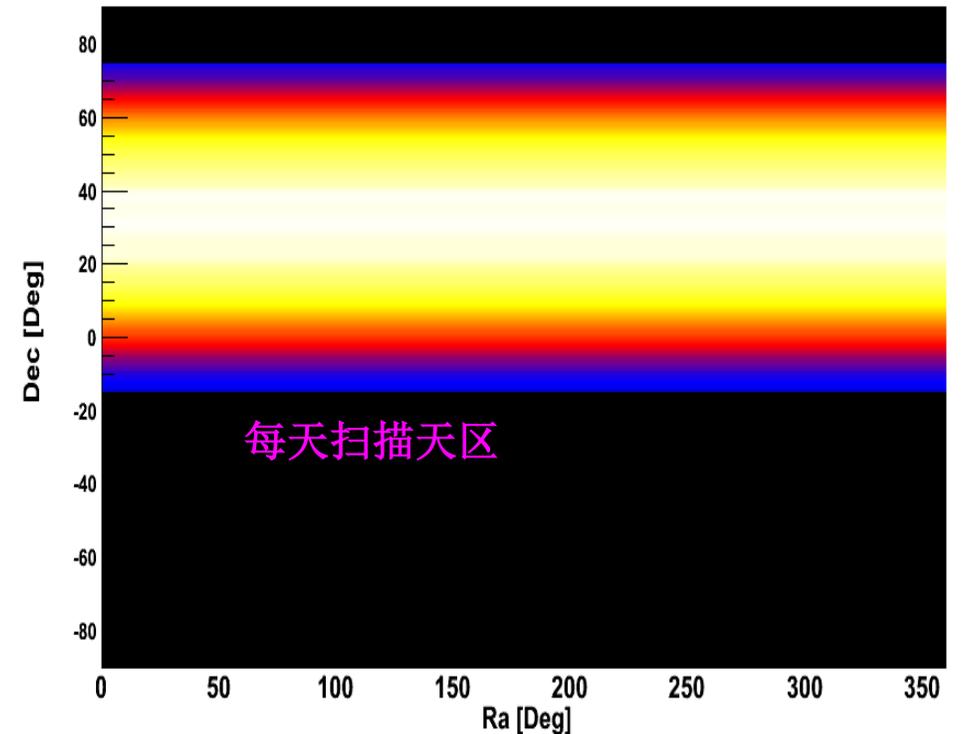
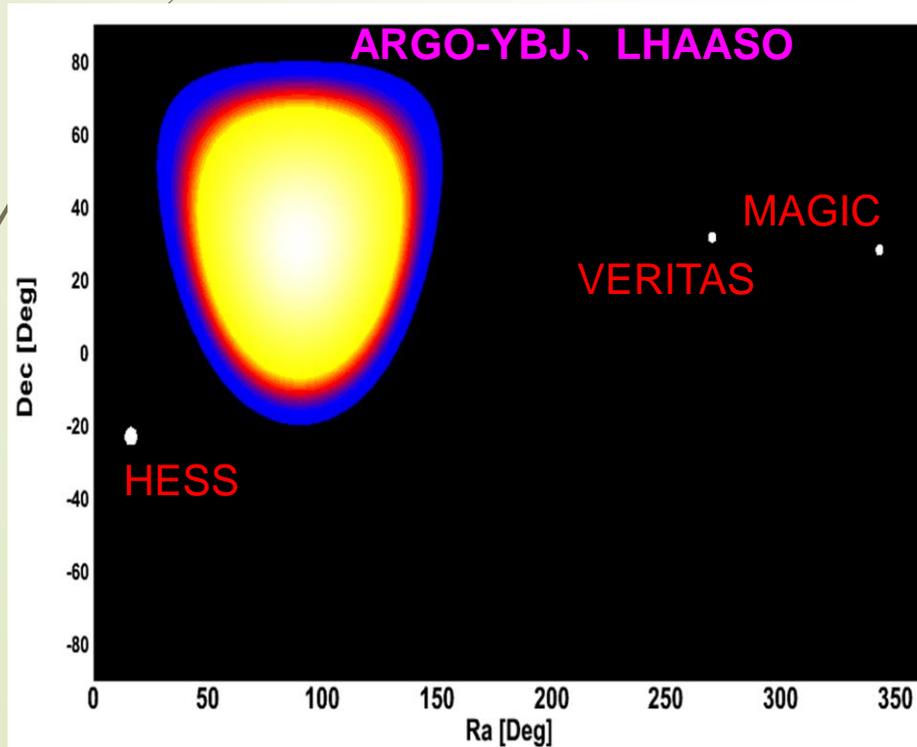


2015-至今



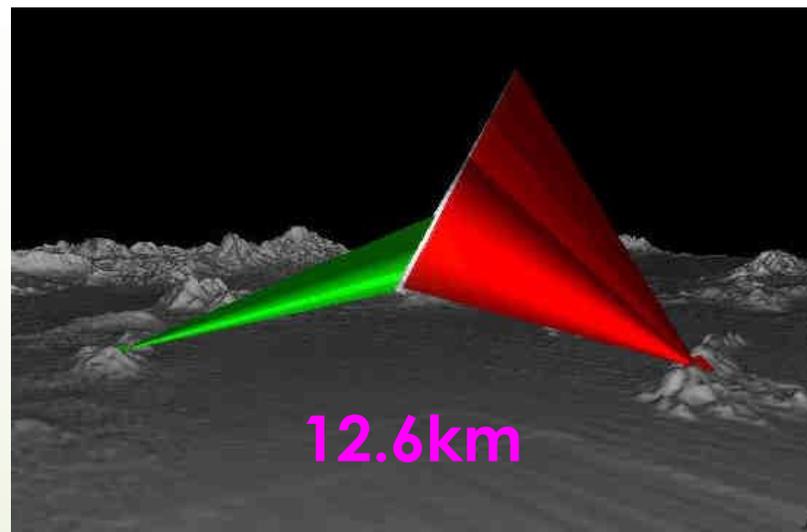
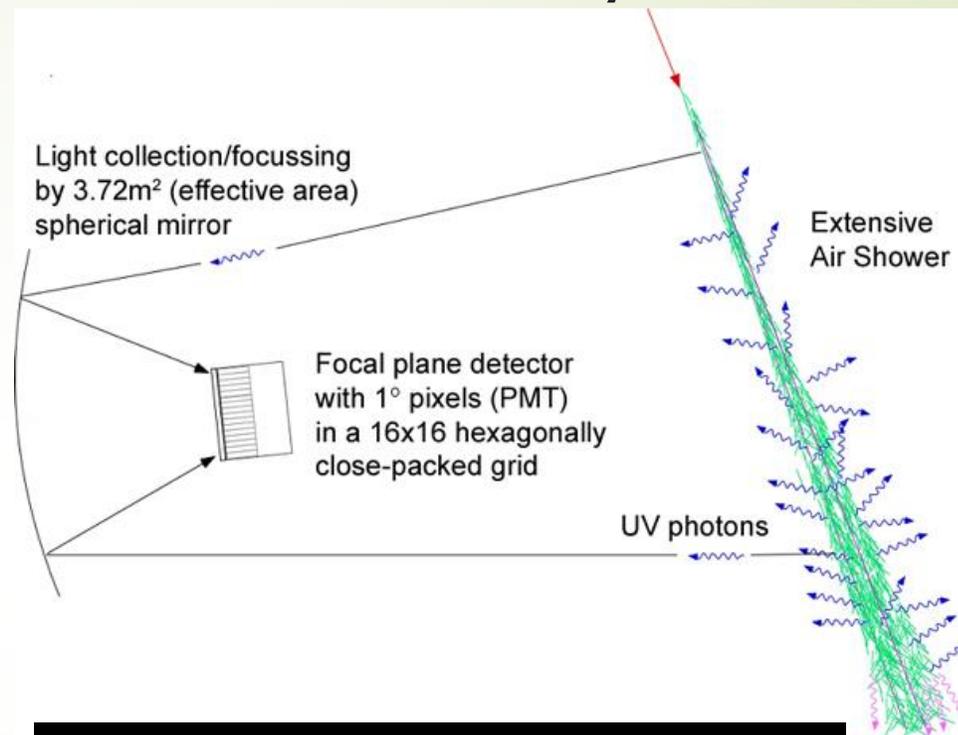
IACT与EAS阵列比较

- IACT: 灵敏度高, 视场小3-5度, 观测时间短15%
 - ➔ 定点观测
- EAS: 灵敏度低, 视场大全天区的1/7(每时每刻), 60% (每天)
 - ➔ 巡天扫描、长期监测



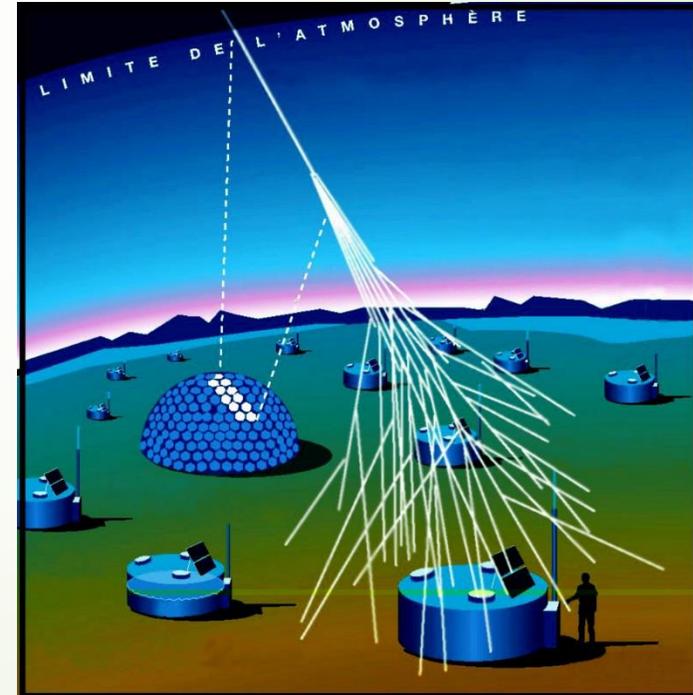
大气荧光望远镜(HiRes,1996-2006)

- 位于美国Utah州
- 大气深度约为 $860\text{g}/\text{cm}^2$
- 大气荧光探测器
- 主要目的：
 - 测量超高能宇宙线的能谱、成份和各向异性



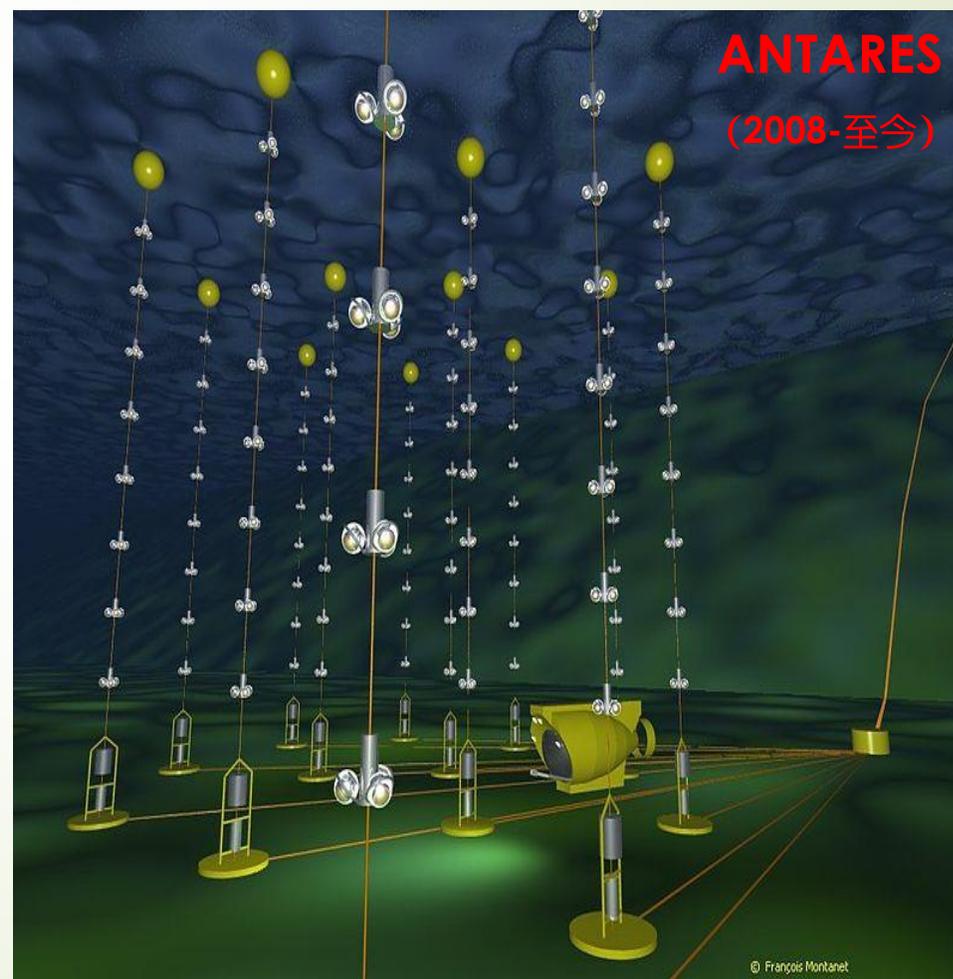
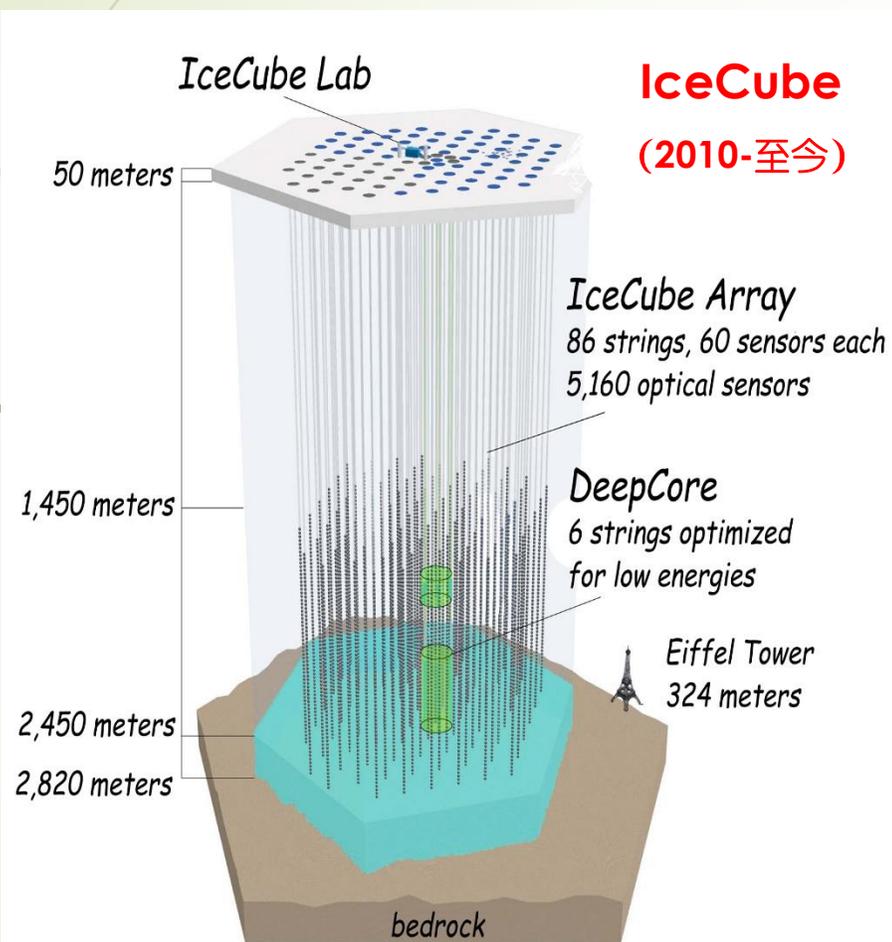
Auger实验(2004-至今)

- 几千平方公里，荧光探测器+水罐探测器



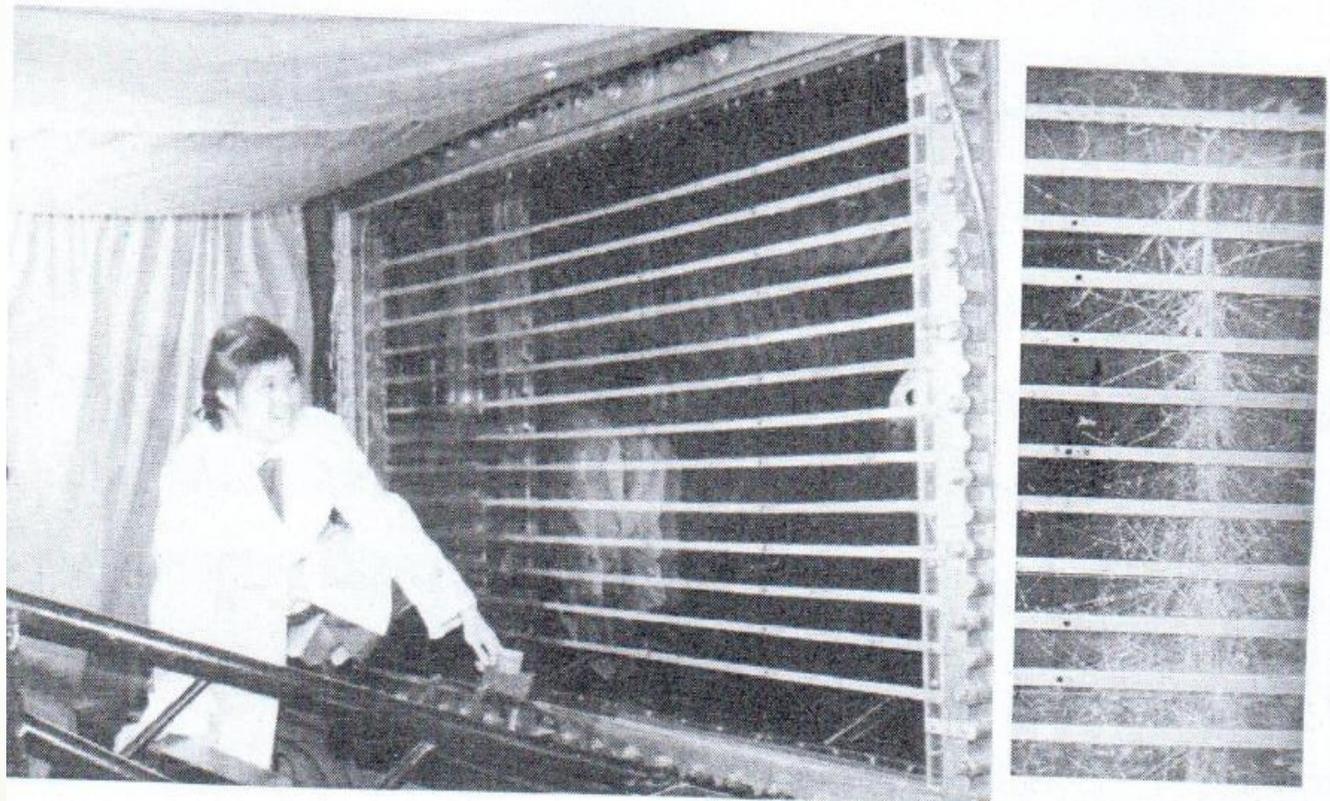
中微子探测

➔ 1.5km冰下或2.5km水下

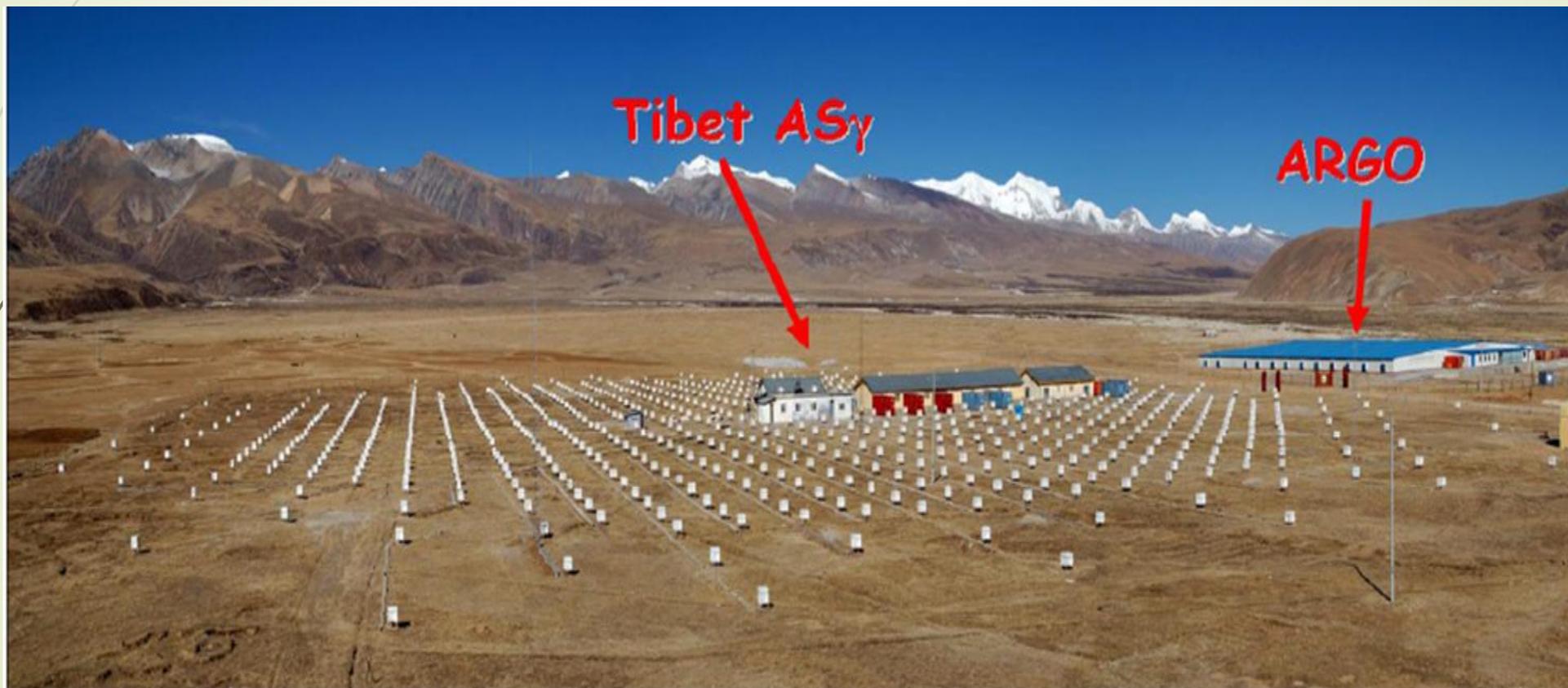


1.4 中国宇宙线实验发展历史

- 利用宇宙线研究粒子物理
- 1958-1965, 云南3220m a.s.l., 大云雾室
- 高山乳胶室:
 - 1954, 云南, **3200m** a.s.l.
 - 1976, 西藏, **5500m** a.s.l.
 - 1978, 珠穆朗玛峰下, **6500m** a.s.l.
 - 1990, 羊八井, **4300m** a.s.l.



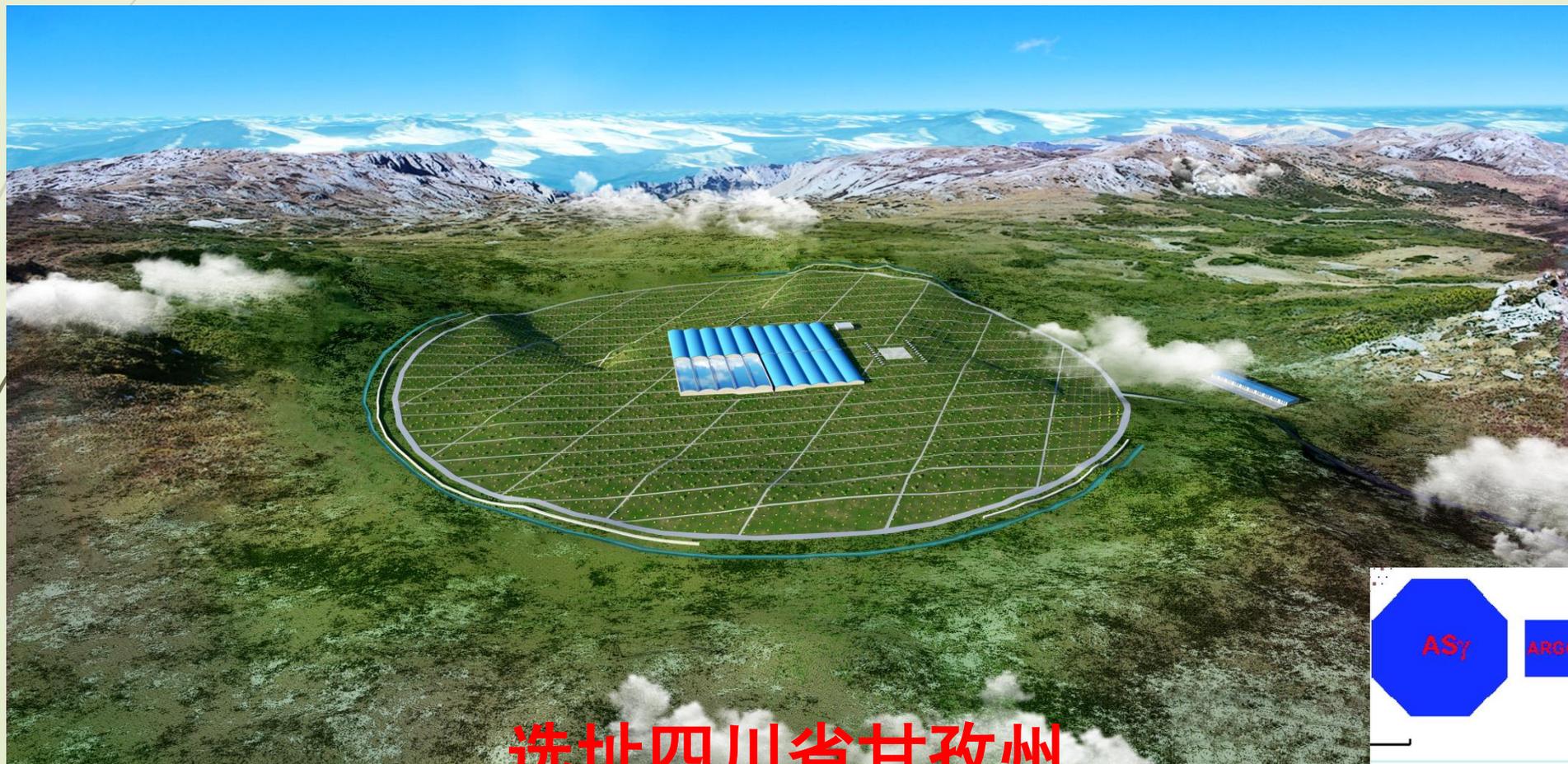
羊八井国际宇宙线观测站，两个EAS阵列：
中日合作**Tibet ASr** (1989-now)
中意合作**ARGO-YBJ** (2006-2013)



高海拔宇宙线观测站LHAASO

国家发改委“十二五”大科学装置项目

国家项目建议书批复：2015年12月31日



选址四川省甘孜州

- 甚高能 γ 射线源
高灵敏度巡天普查探测器

大大提高甚高能 γ 源的发现能力，大量发现新 γ 源，积累各种源的统计样本，探索高能辐射机制

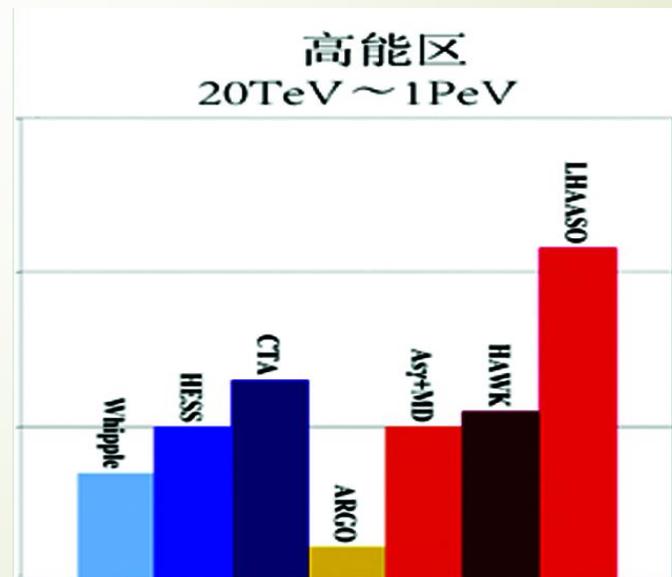
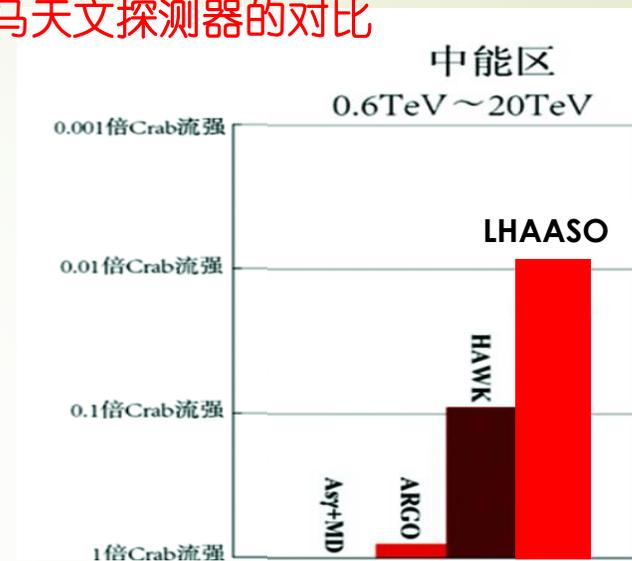
- 高灵敏度超高能 γ 射线谱仪

实现高端能谱的精确测量，搜索银河宇宙线源

- 横跨5个量级能量范围的宇宙线探测器

实现0.1PeV以上宇宙线单成分能谱测量，桥接空间直接测量和地面测量

伽马天文探测器的对比



小结

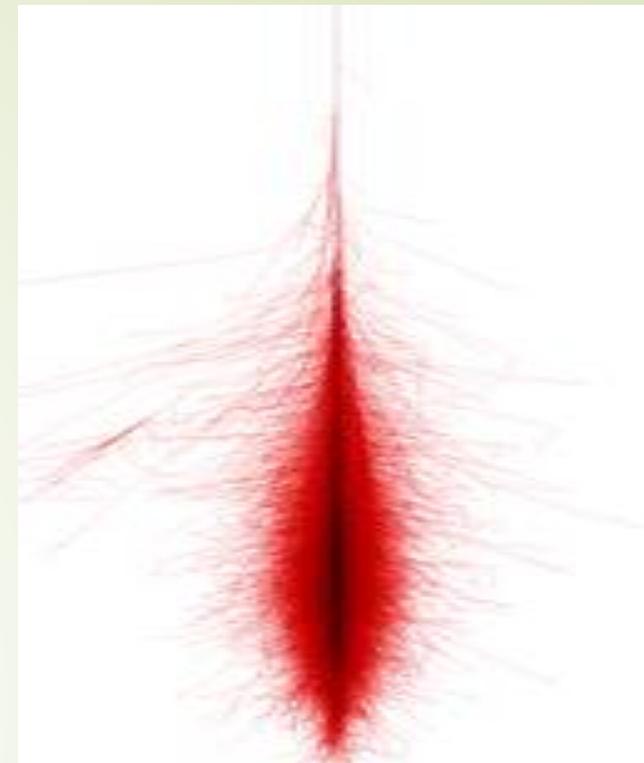
- ▶ 宇宙线是天然的高能粒子，其最高能量远超人类加速能力，在宇宙中普遍存在，但是其起源和加速机制未知，是目前科学届非常重要的物理问题之一。经过百年研究，其起源问题研究已经接近突破的边缘，中国的地面宇宙线实验经过半个世纪的发展，其LHAASO将要跻身国际四大阵列，其在100TeV伽马天文方面的独特优势，有望在宇宙线起源问题上做出重要贡献！

二、EAS阵列宇宙线数据分析基础

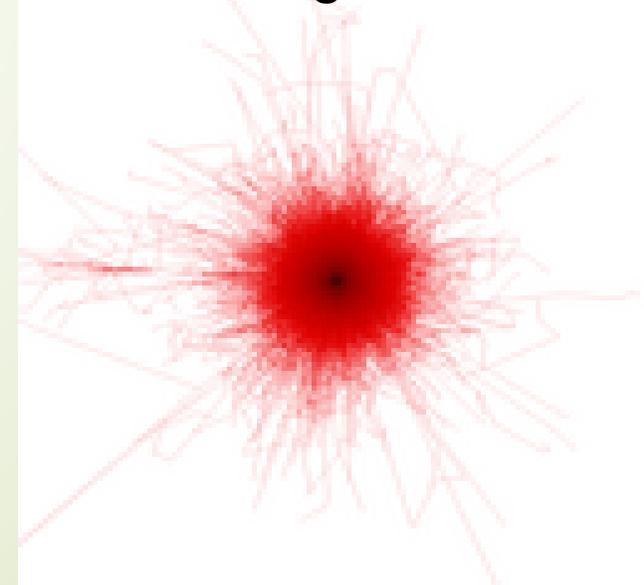
- 实验数据的仿真模拟
- 探测器的刻度
- 事例的重建
- 成分鉴别
- **数据质量监测（月影与标准烛光Crab）**

2.1 实验数据的仿真模拟

- 大气簇射模拟软件CORSKA: COsmic Ray Simulation for Kascade <http://www.ikp.kit.edu/corsika/>
 - 相互作用模型
 - 高能强相互作用模型: **QGSJET**, **EPOS-LHC**, **SIBYLL**, **DPMJET**,
 - 低能强相互作用模型: FLUKA, GHEISHA
 - 电磁相互作用模型: EGS4
 - 大气模型
 - 多种模型选择
 - 常用美国标准大气模型
- Geant4模拟探测器相应



1TeV gamma

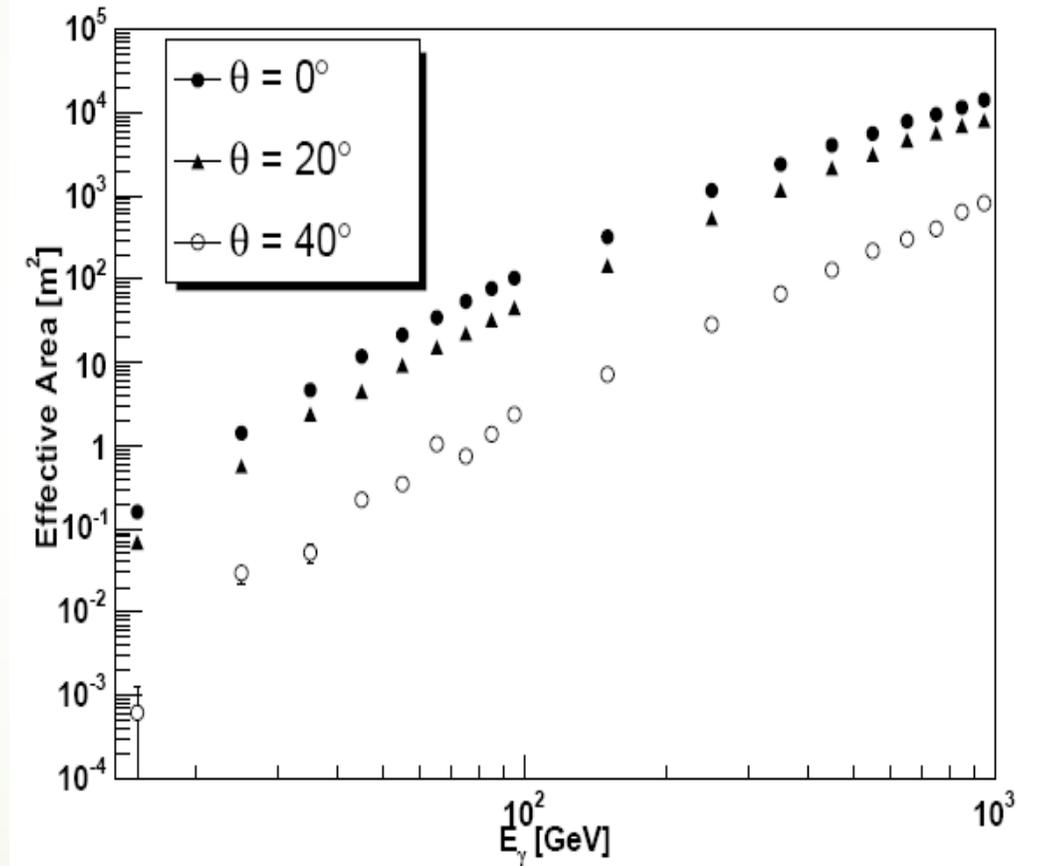


仿真数据用途

建立实验测量与原初宇宙线对应关系

- 建立能量重建方法
- 研究数据重建方法和精度
- 确立宇宙线原初成分鉴别
- 估计探测器有效面积

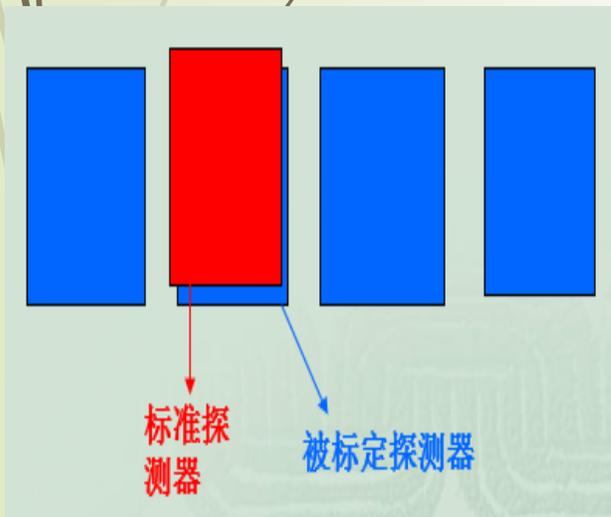
$$S_{eff} = \frac{N_{cut}}{N_{sample}} S_{sample} \cos \theta$$



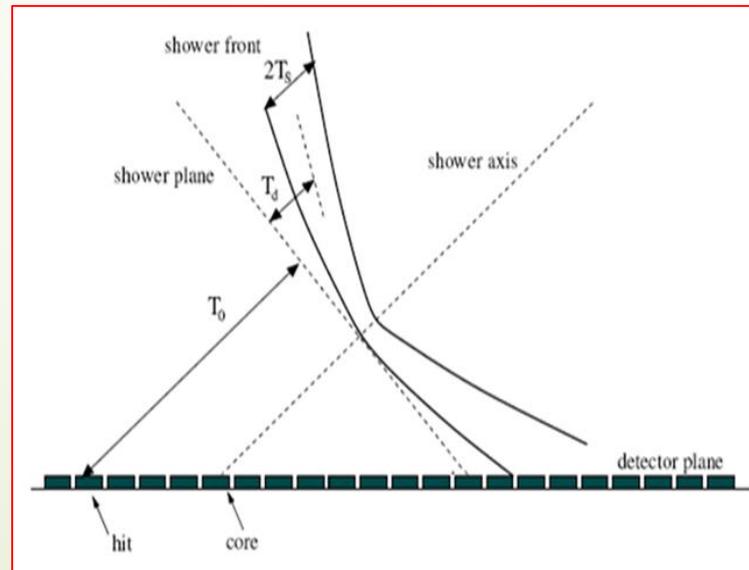
2.2 探测器的刻度

- 探测器主要测量量：粒子数和粒子达到时间
- 粒子数的刻度
- TDC的时间刻度

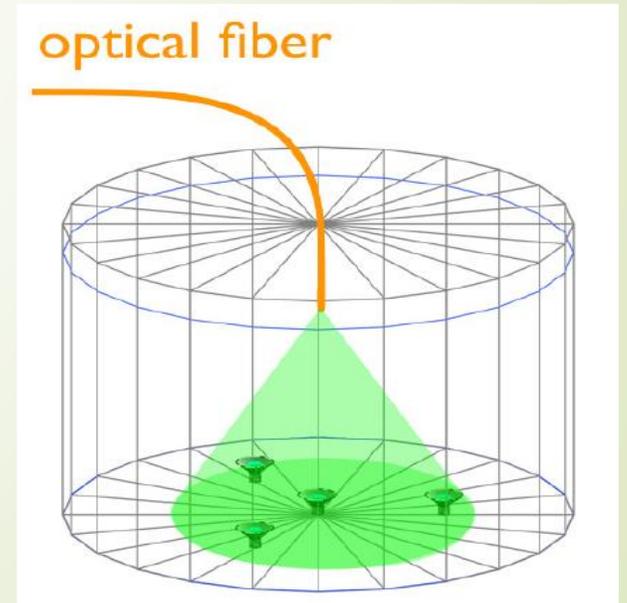
标准探测器刻度法



离线刻度法
—特征面法



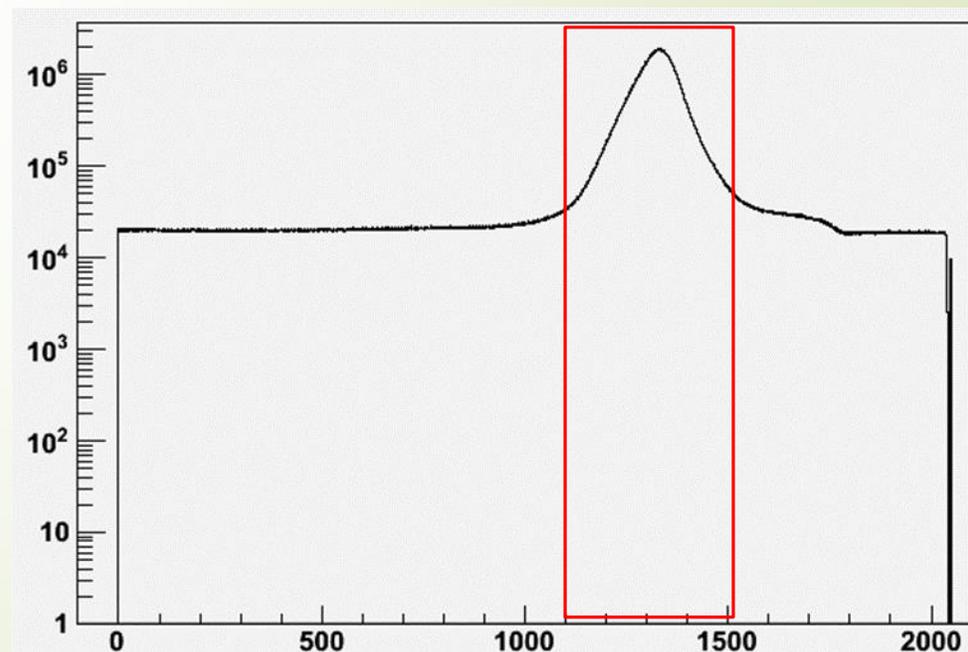
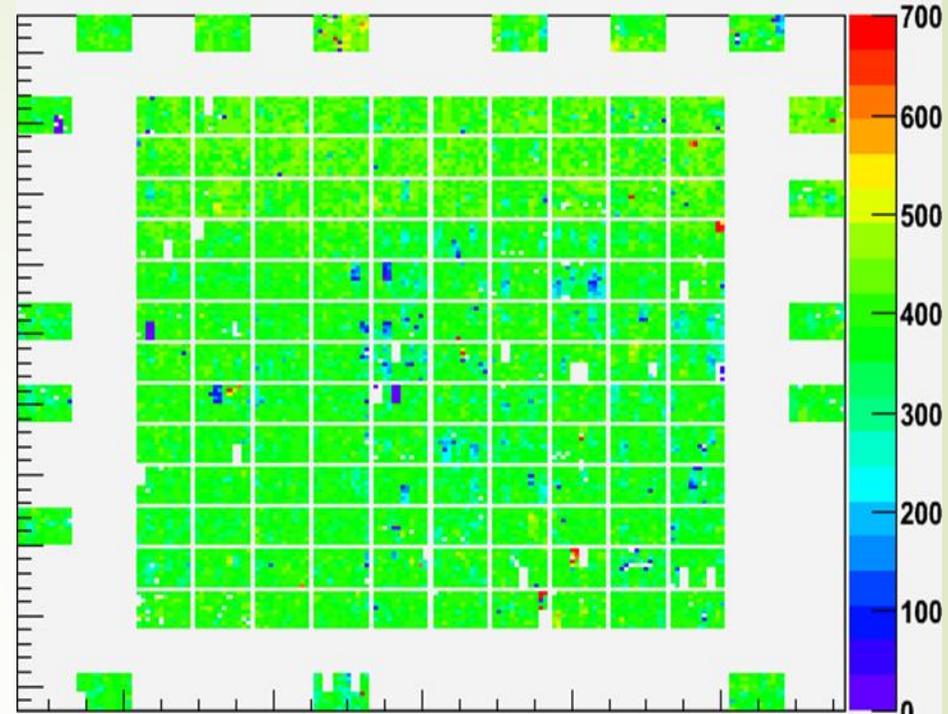
标准源法



2.3 事例的重建

➔ 探测器状态判选，剔除高噪声和低计数的探测器。

➔ 利用一定时间窗口（和空间窗口）过滤噪声



事例的重建——芯位

40

重心法

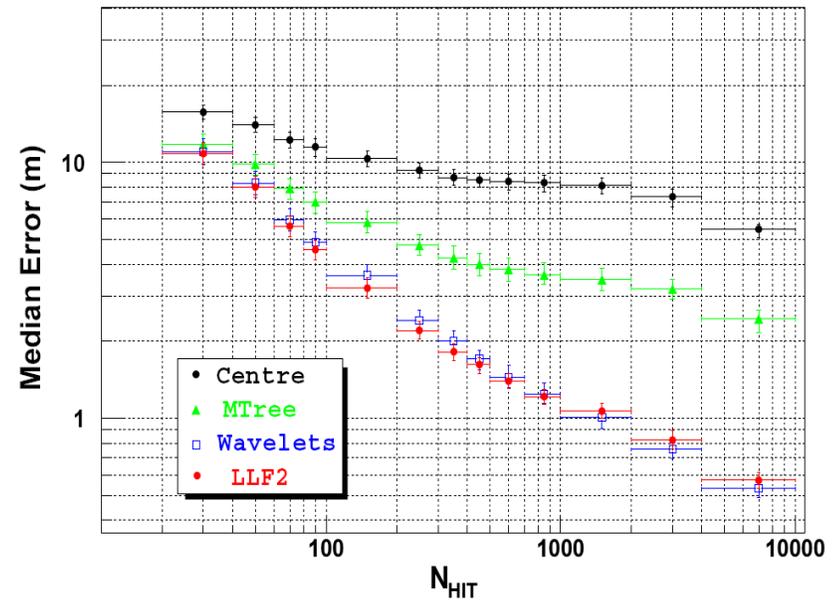
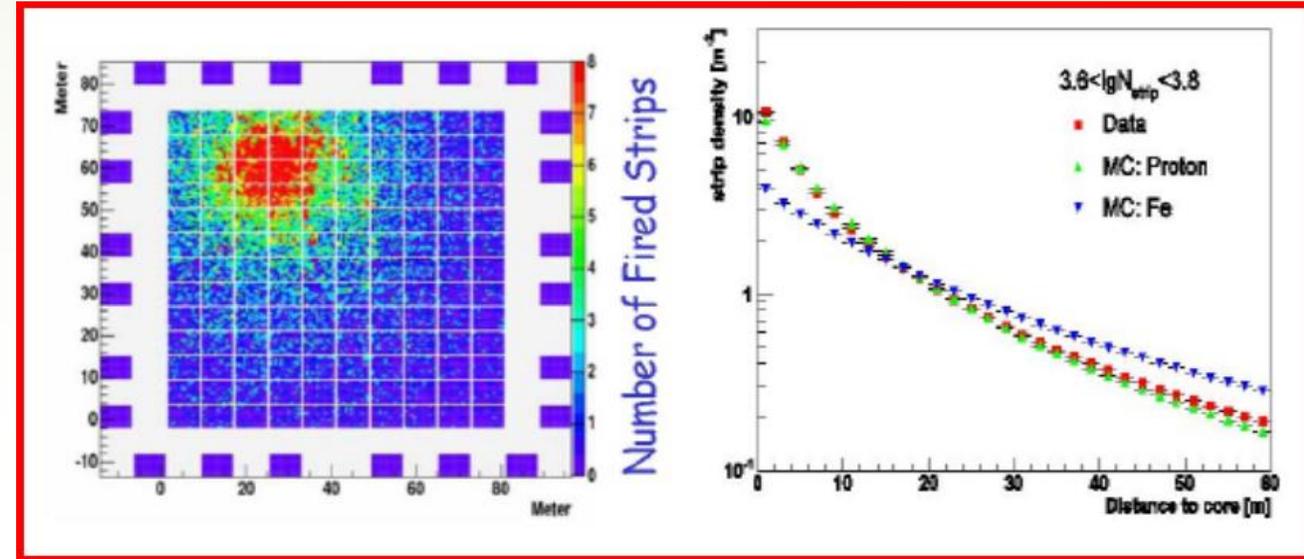
$$X_{core} = \frac{\sum_i \omega_i x_i}{\sum_i \omega_i}, Y_{core} = \frac{\sum_i \omega_i y_i}{\sum_i \omega_i}$$

似然法

$$\mu = \rho(R) \cdot A$$

$$p(m) = \frac{\mu^m}{m!} e^{-\mu}$$

$$LF2 = \prod_{k=1}^N p_k(m_k)$$



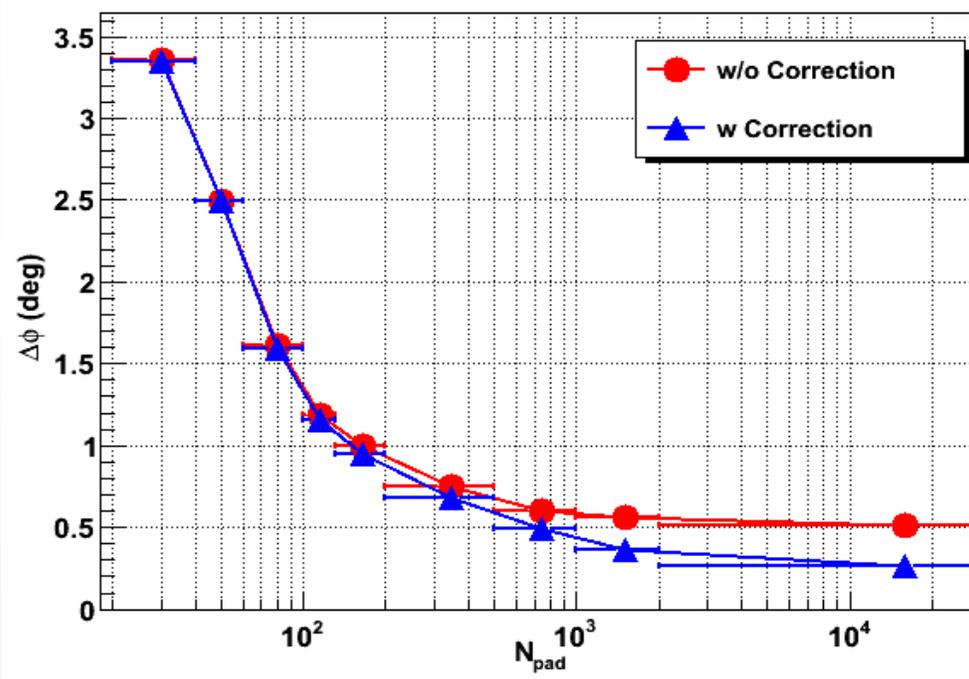
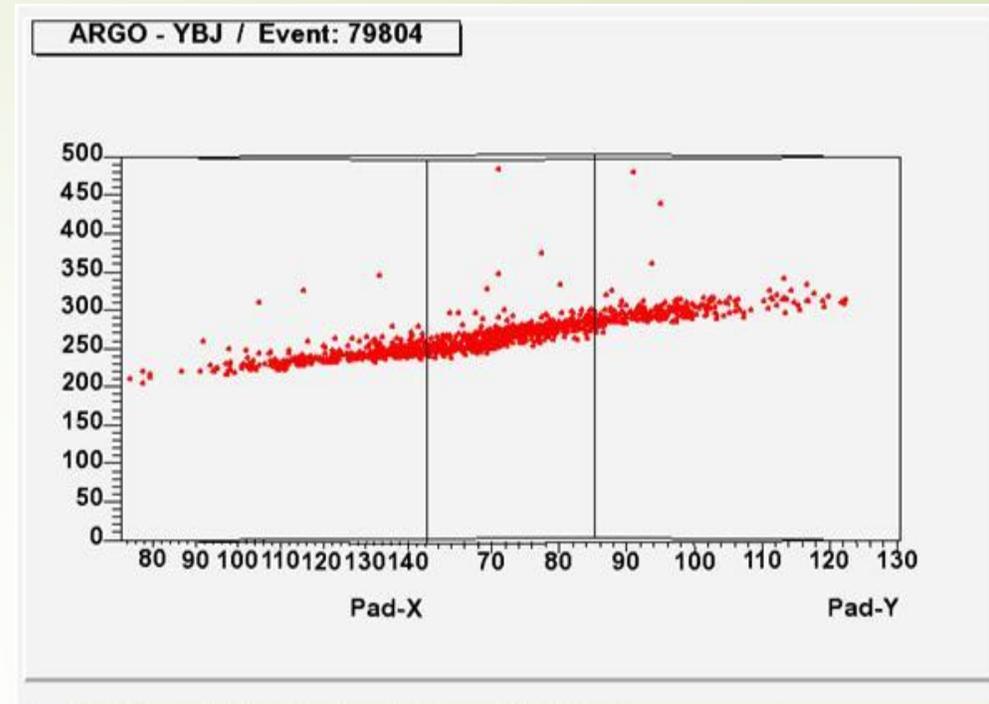
事例的重建——方向

➔ 最小二乘法

$$\chi^2 = \sum_i^N \left(t_i - \frac{lx_i + my_i + \alpha R_i + ct_0}{c} \right)^2$$

$$l = \sin \theta \cos \phi, m = \sin \theta \sin \phi, \alpha = 0.03, c = 29.98 \text{ cm/ns}$$

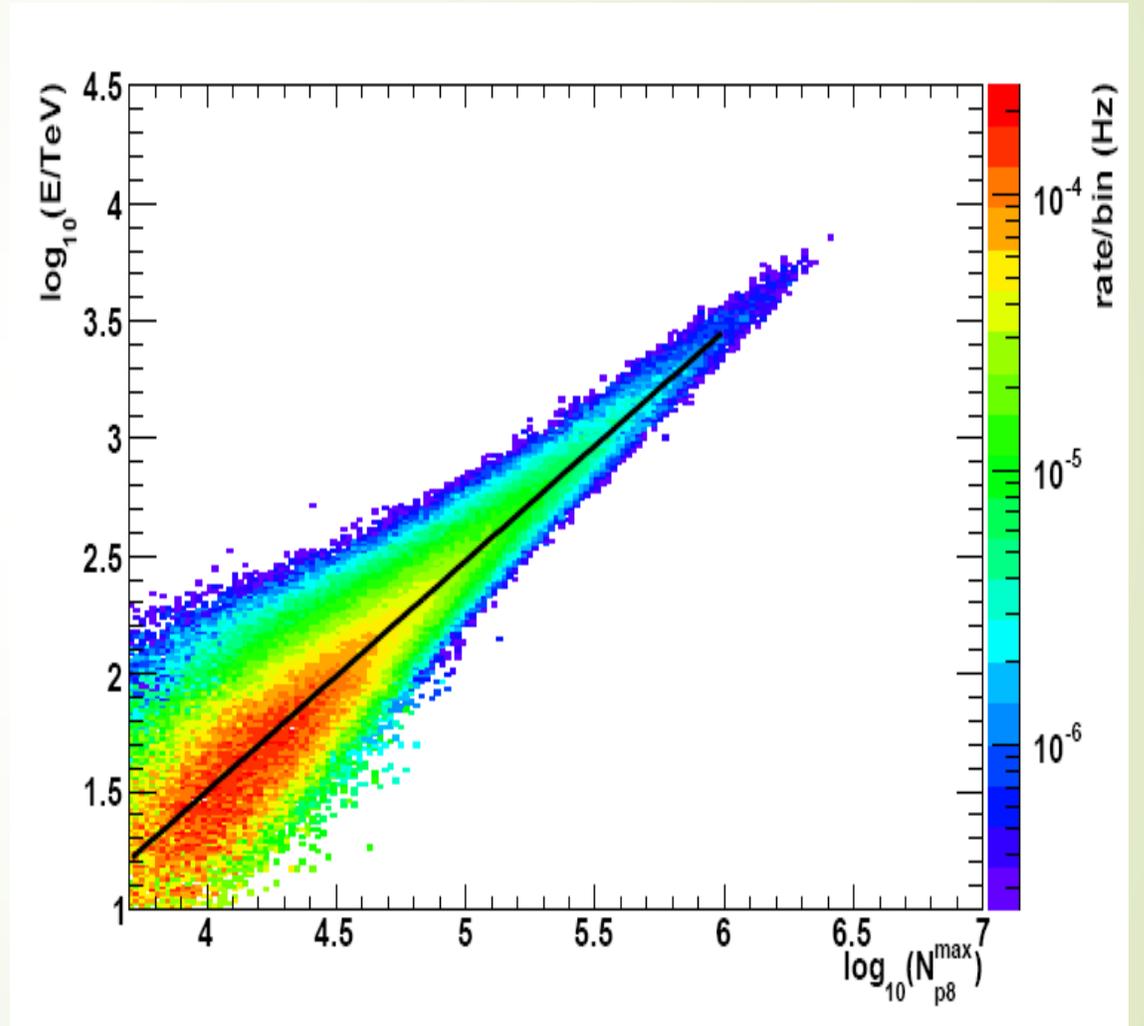
(x, y) 探测器位置, t 为 TDC 测量时间。



事例的重建——能量

42

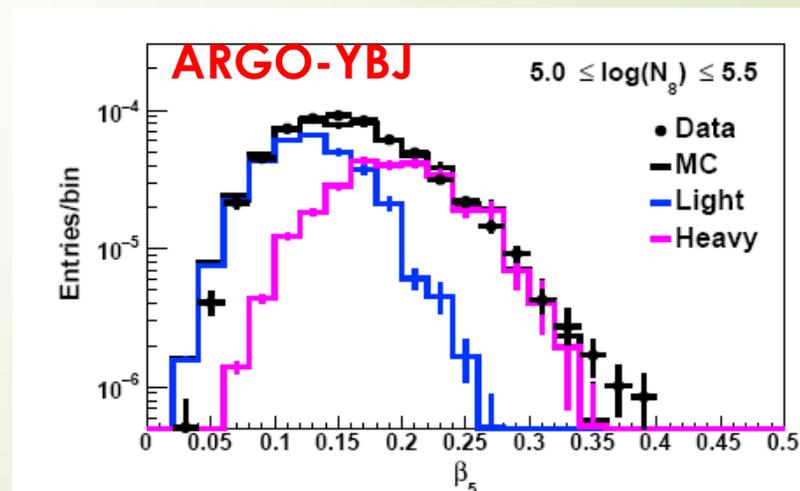
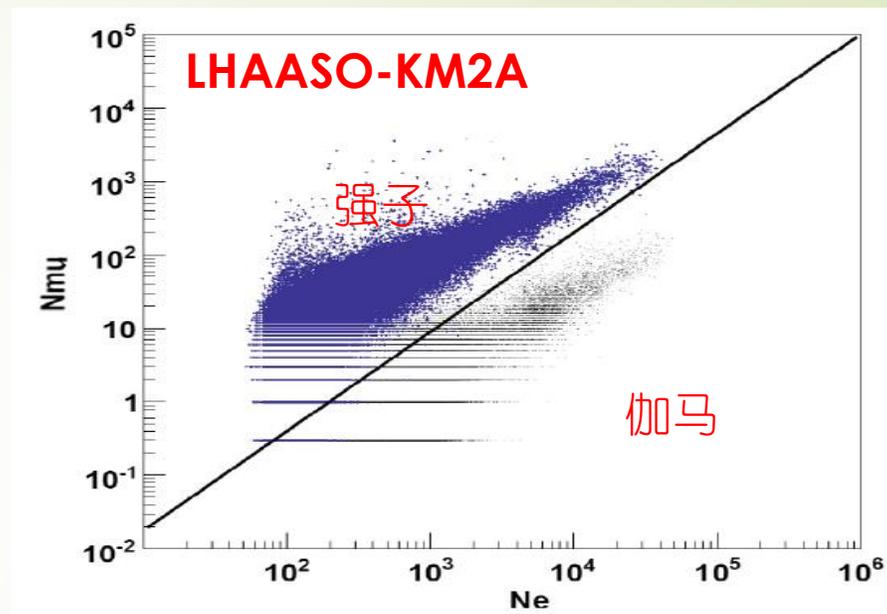
- 通过模拟建立收集粒子数与能量关系，还与天顶角大小和芯位位置有关。



2.4 成分鉴别(伽马/强子, 强子种类)

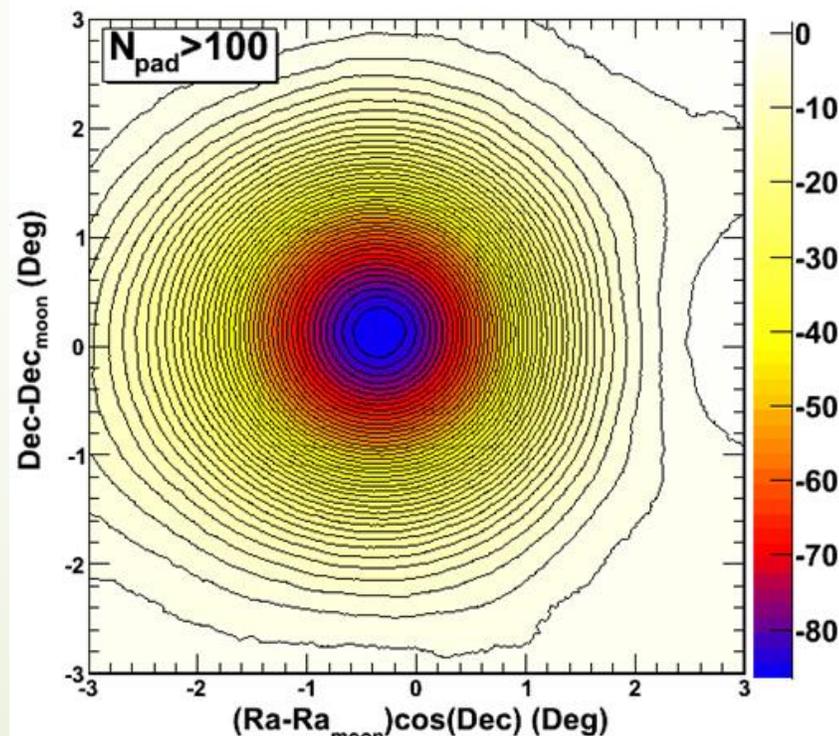
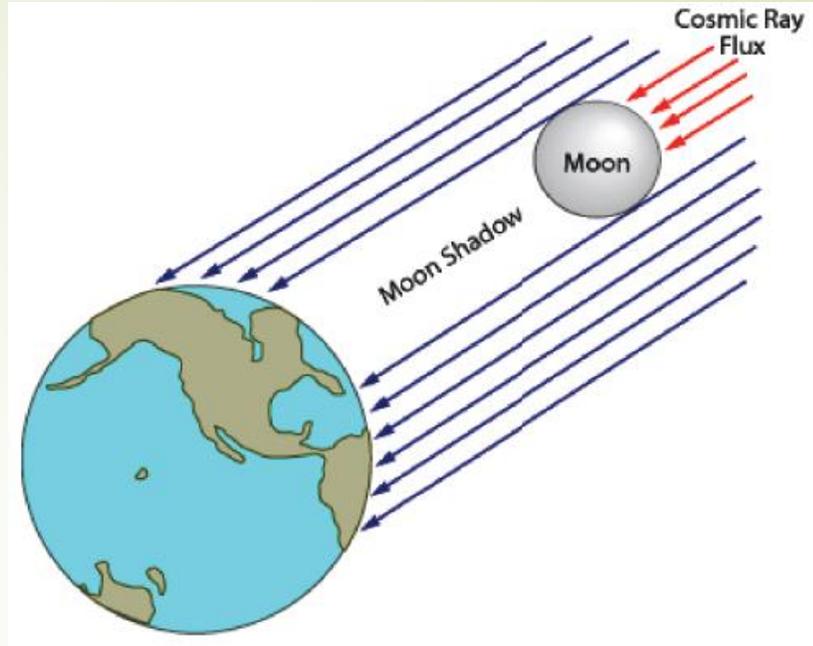
➔ 强子级联与纯电磁级联在发展过程中有差别, 成分鉴别就是利用其差别特征进行区分。

- ➔ Muon的产额 (主要区分量)
- ➔ 横向粒子密度分布
- ➔ 前锋面信息

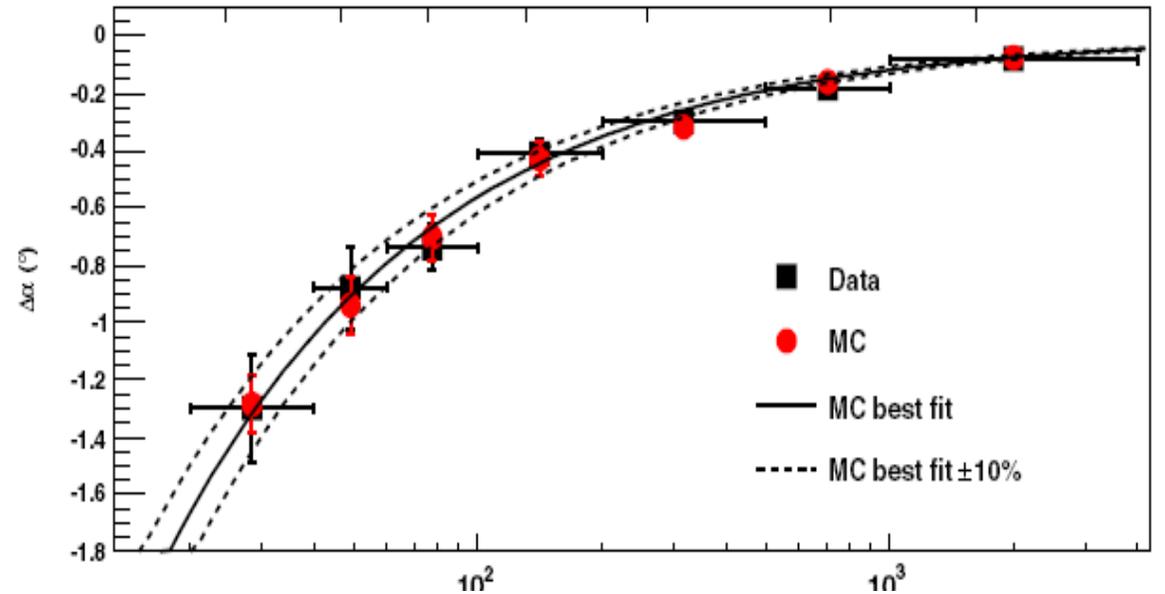
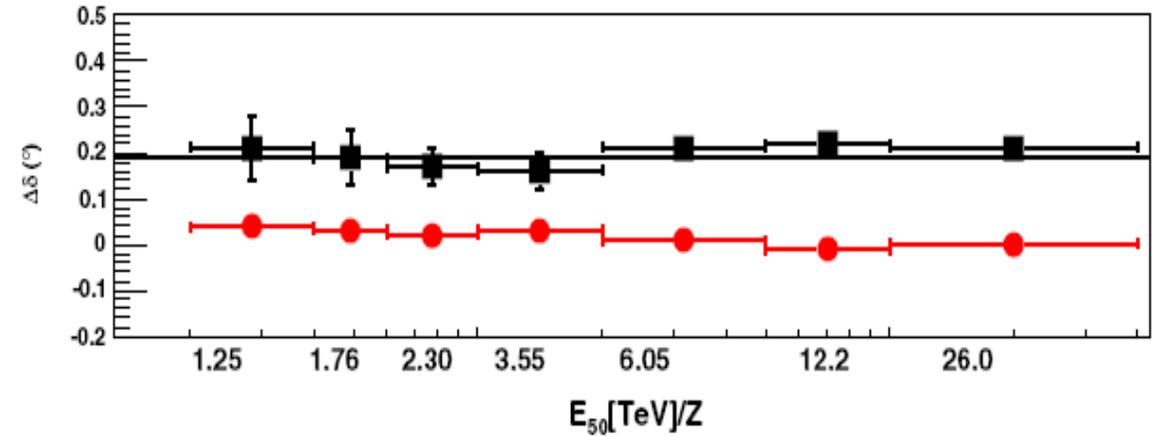
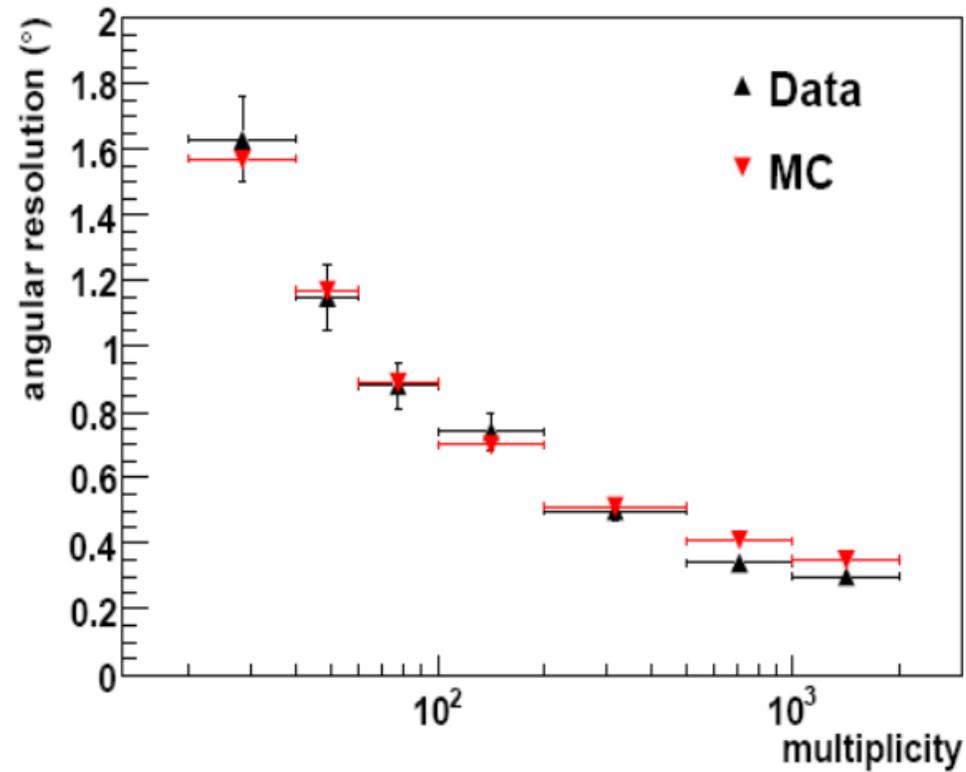


2.5 数据质量监测 → 月影

- ➔ 月影是稳定的宇宙线负源，可以通过数据检验探测器性能
 - ➔ 探测器指向误差
 - ➔ 测量宇宙线角分辨
 - ➔ 对能量进行刻度
 - ➔ 监测重建数据质量



角分辨率



$$\sqrt{\Delta R_E^2 + \sigma_{\text{stat}}^2 + \sigma_{\text{chem}}^2 + (\sigma_{\text{hadr}}/2)^2} = 13\%$$

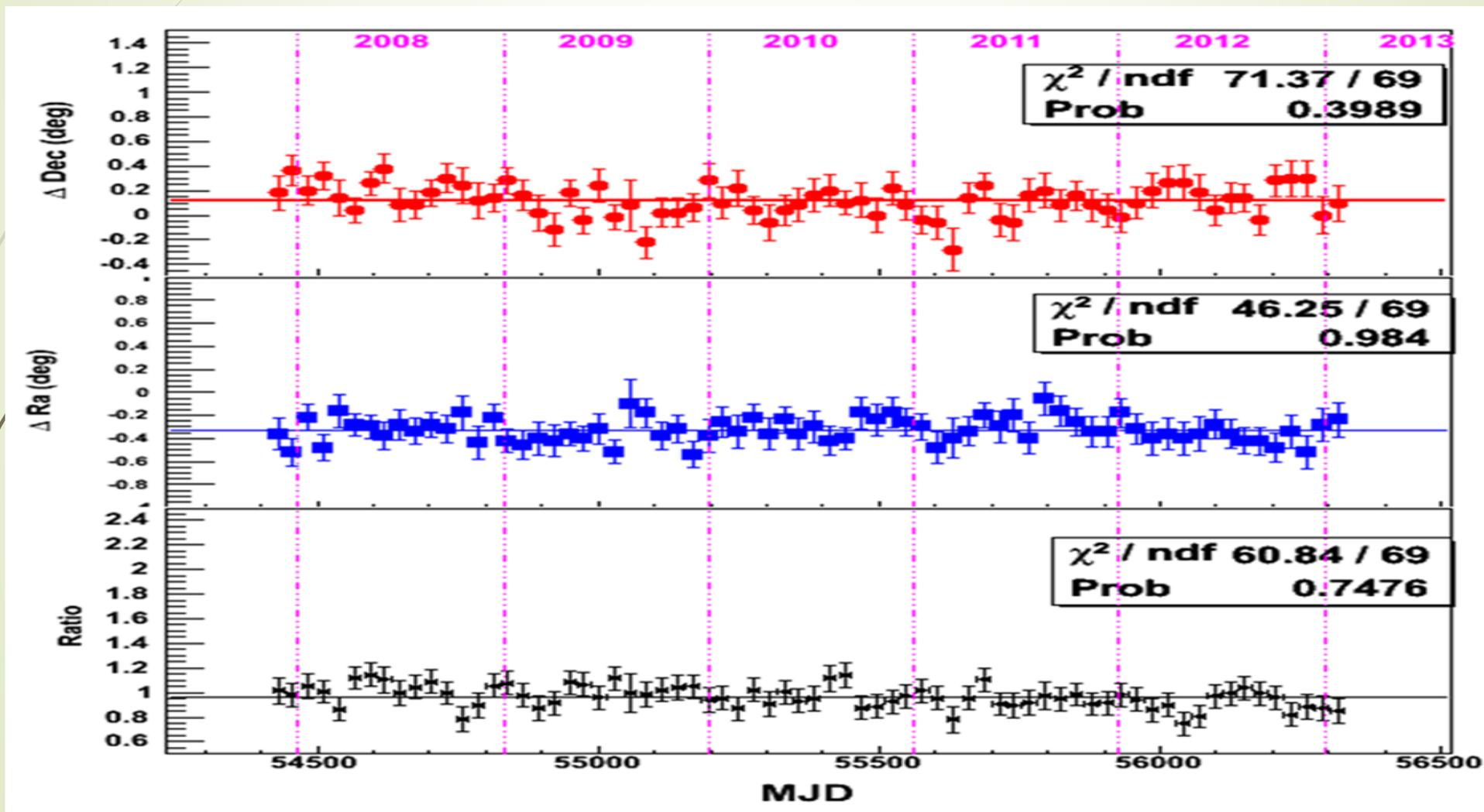
5%

8%

7%

6%

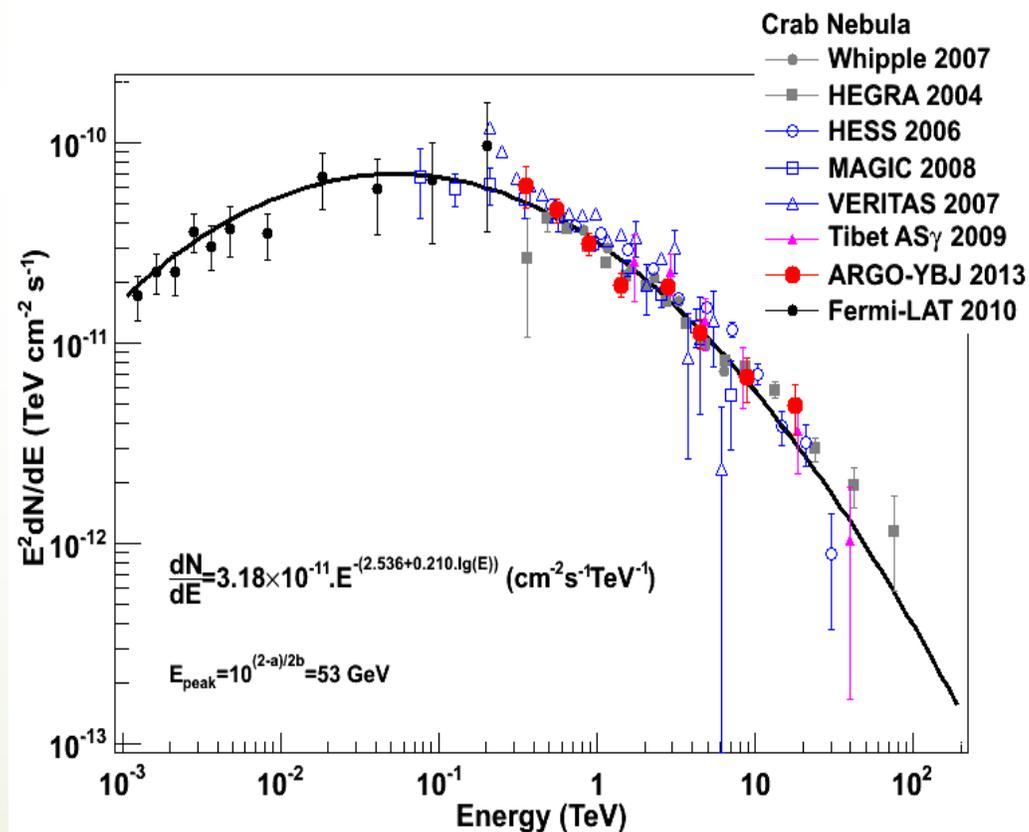
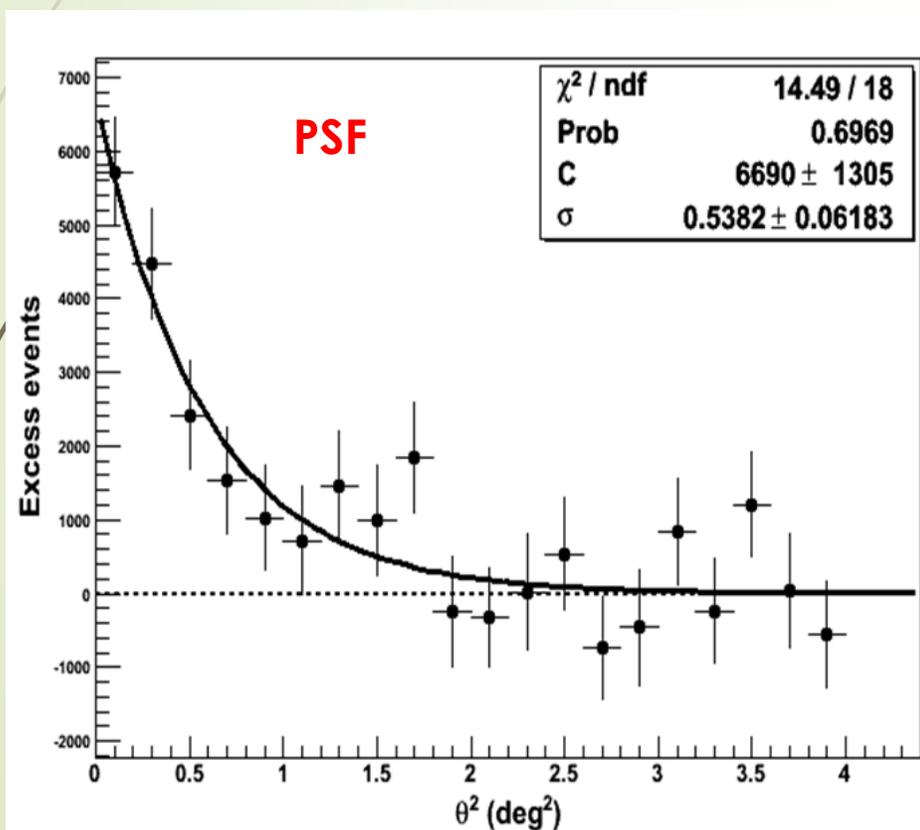
数据质量监测



数据质量监测

→ 标准烛光Crab

- ➔ Crab是稳定的高能伽马射线源，是高能伽马天文的“标准烛光”。



Crab能谱系统误差估计

| Origin | flux | index |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------|
| • G4argo vs Data: | 6.08% | ... |
| • variability of trigger rate | 3.43% (RMS/mean) | ... |
| • Time resolution | 11.22%(1.4-2.6ns) | 0.040 |
| • Data selection | 2.16% | 0.098 |
| • Pointing error(0.3degree) | 4.30% | 0.054 |
| • anisotropy correction | <0.7 sigma | ... |
| • Different methods | 0.5 sigma | ... |
| • Total | 16.5% | 0.12 |

小结

- ▶ 仿真模拟数据是数据分析的基础，很多研究都是首先基于模拟进行，而月影和Crab是标准的宇宙线负源和伽马射线源，也是模拟可信度的检验器，目前基本上是所有EAS实验数据分析前的必修课。

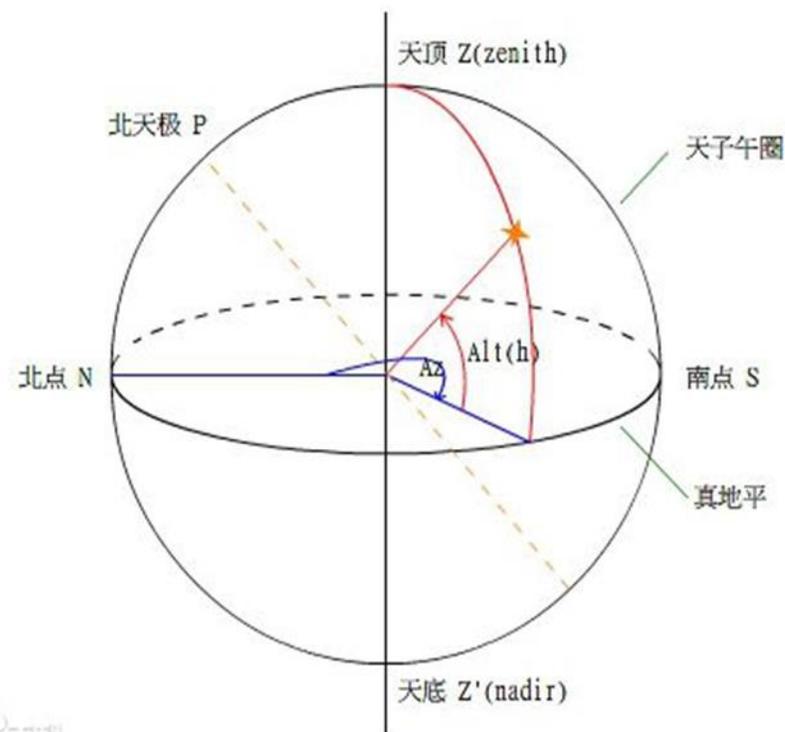
三、天体源相关数据分析

- 几个坐标系
- 背景估计
- 天图分析
- 显著性估计
- 伽马/质子鉴别品质因子
- 流强估计
- 能谱拟合

3.1 几种坐标系 → 地平坐标系

- ▶ 观测者为中心的测量坐标系
- ▶ 天顶角 **zenith angle**: 正天顶为 **0度**
- ▶ 仰角 **elevation angle**: 正天顶为 **90度**
- ▶ 方位角 **azimuth angle**: 北方为 **0点**, 顺时针方向度量。

地平坐标系

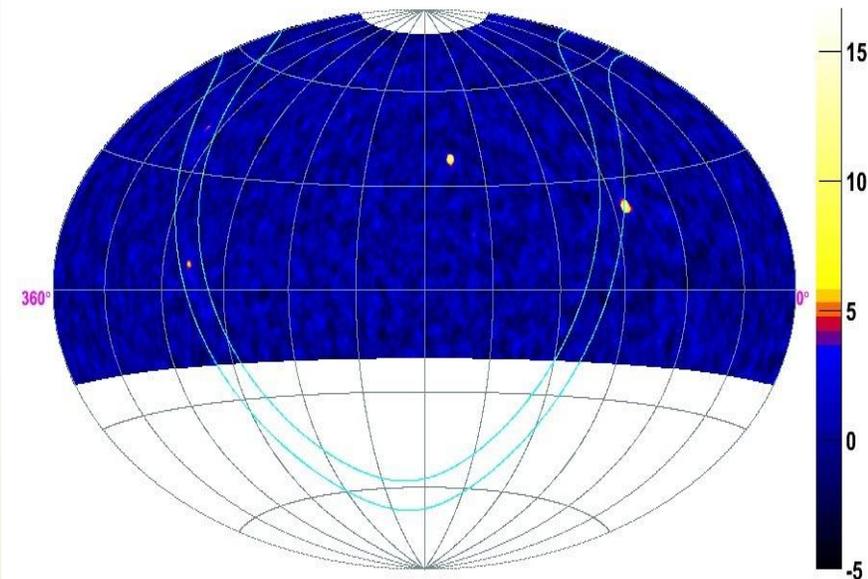
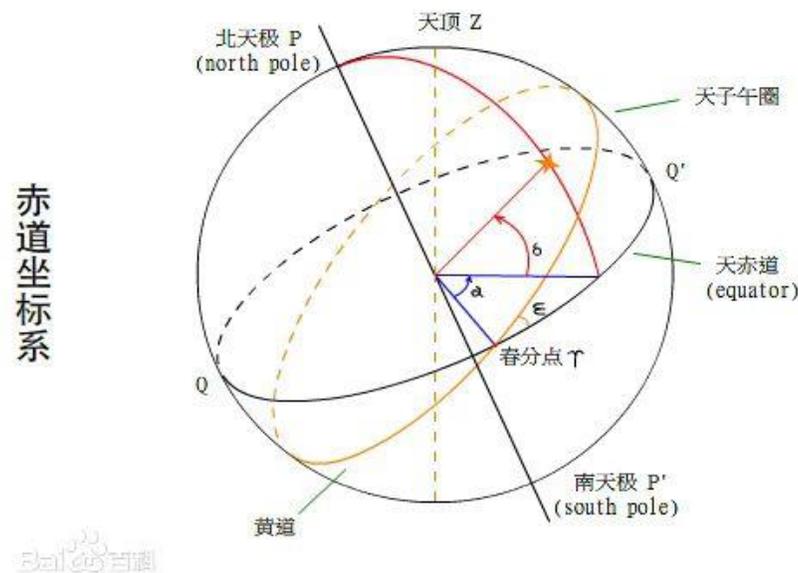


赤道坐标系

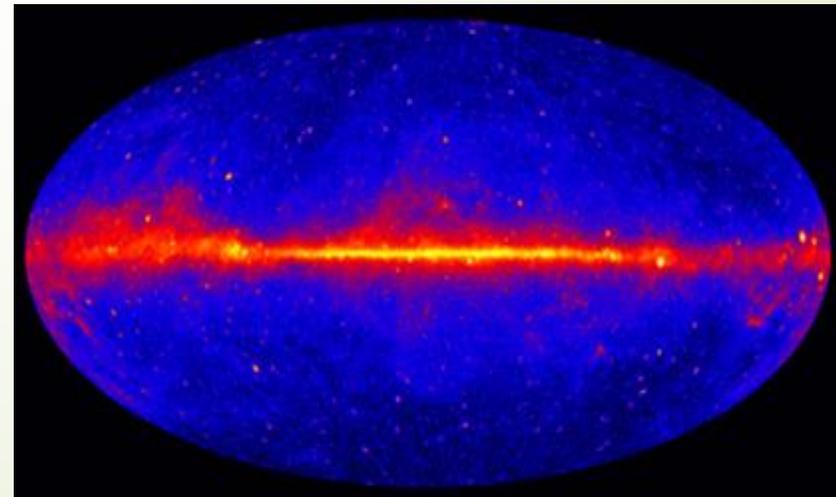
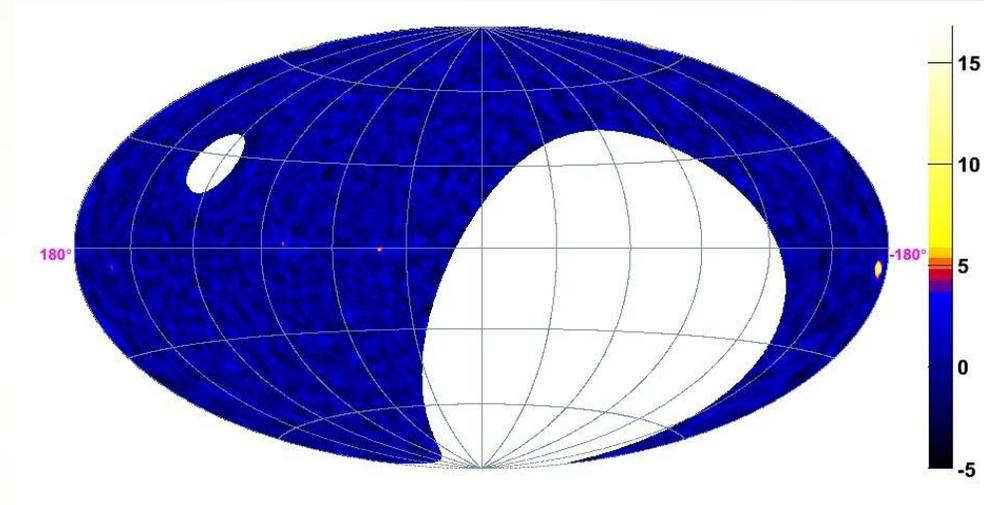
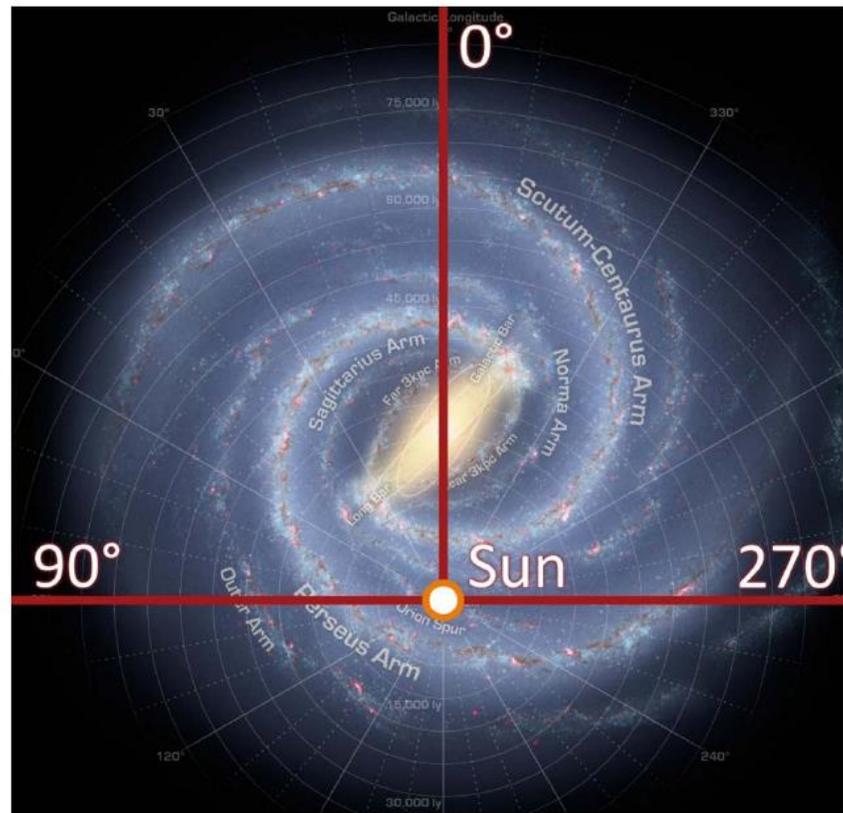
Equatorial coordinate system

- 参考物体：地球赤道
- 第一赤道坐标系又称时角坐标系，与观测者有关。时角。时角从 0° 到 $\pm 180^\circ$ 或从0h到 $\pm 12h$ 计量，向东为负，向西为正。
- 第二赤道坐标系或简称赤道坐标系，主点取为春分点。赤经从 0° 到 360° 或从0h到24h计量。天体的赤经和赤纬，不因周日视运动或不同的观测地点而改变。
- 赤经，赤纬

赤道坐标系



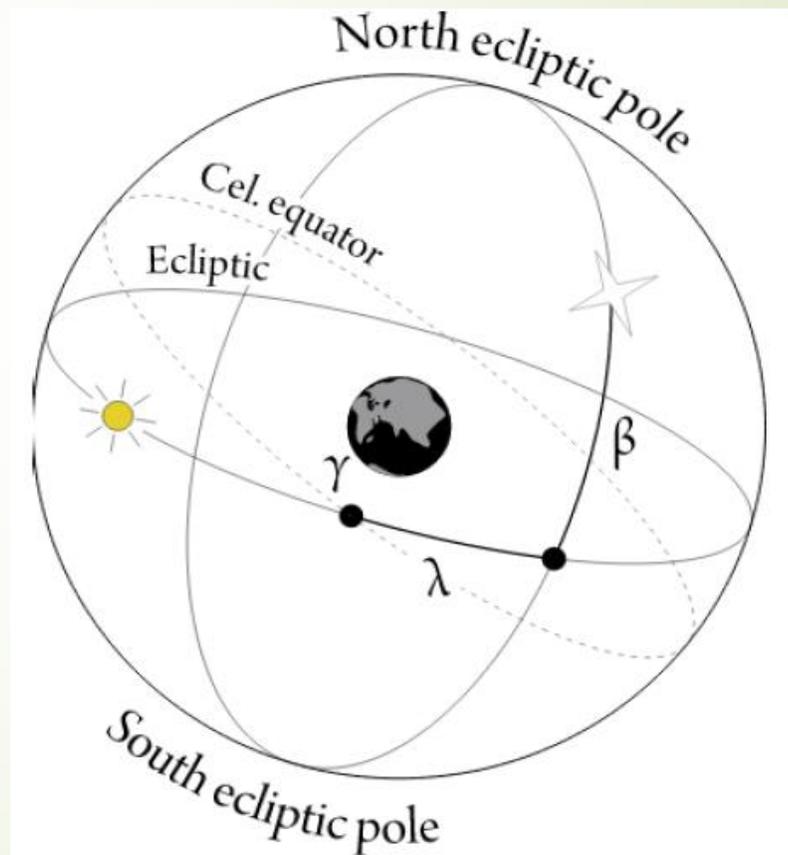
银道坐标系 Galactic coordinate system



黄道坐标系

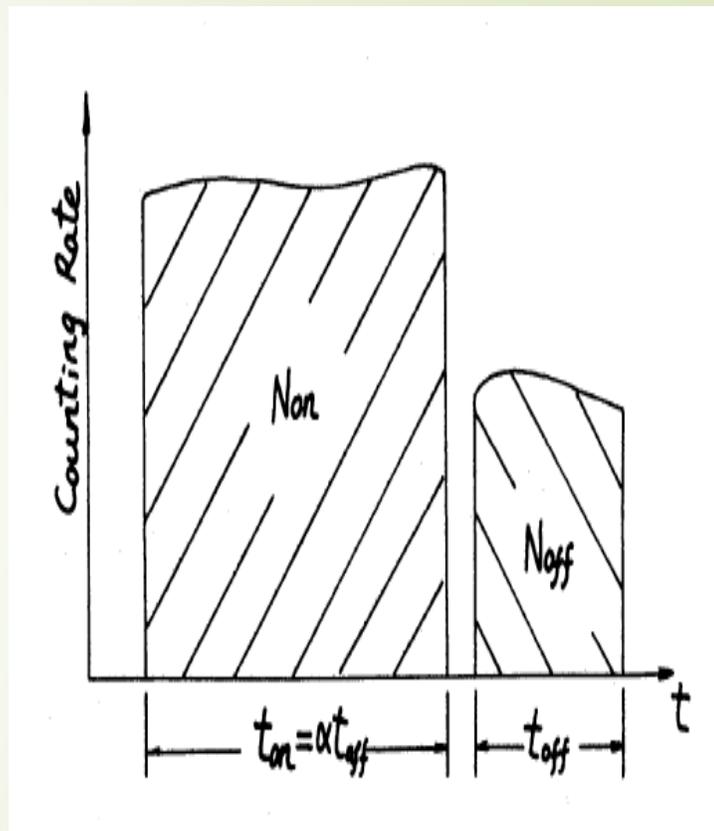
Ecliptic coordinate system

- 参考物体：地球
绕日轨道
- 以春分点为起点，
在黄道上逆时针
度量，从 0° 到
 360°



3.2 背景估计

- ➔ 源区的观测事例 N_{on} 包含源辐射的事例和其它来源的背景事例，背景估计就是通过其它无源区域的观测事例 N_{off} 来估计源区的背景事例数 N_b 。
- ➔ $a = T_{on} / T_{off}$ ，向源和背源观测时间比
- ➔ $N_b = a N_{off}$ ，源区预期的背景事例数
- ➔ $N_s = N_{on} - N_b$ ，预期源辐射的事例数



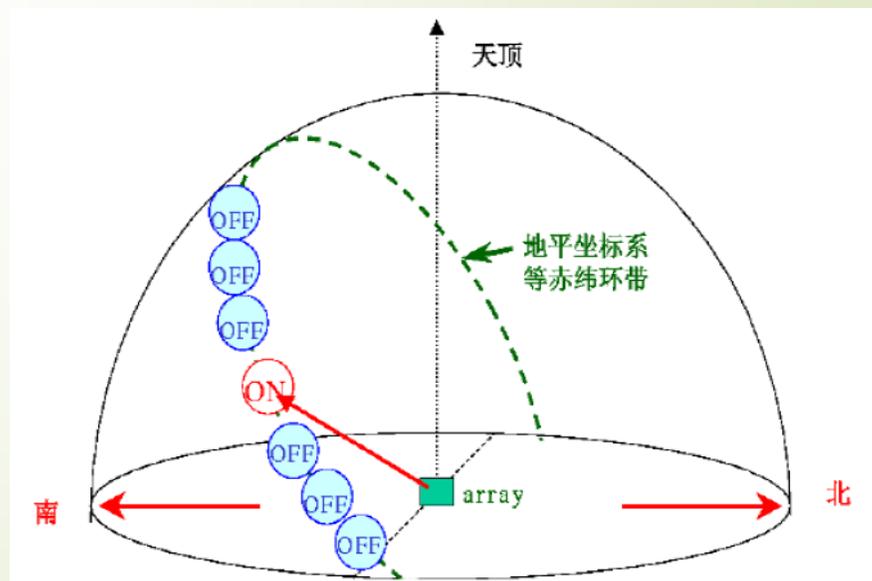
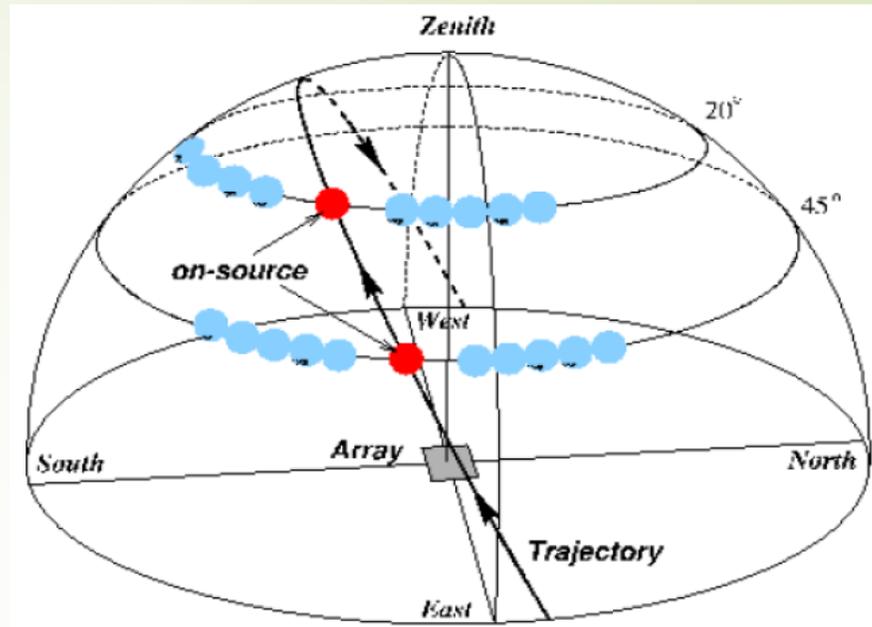
背景估计方法

► 等天顶角法：

同一时刻，**同样天顶角**，不同方位角。

► 等赤纬法：

同样天顶角，同样方位角，但是不同时刻。



等赤纬方法

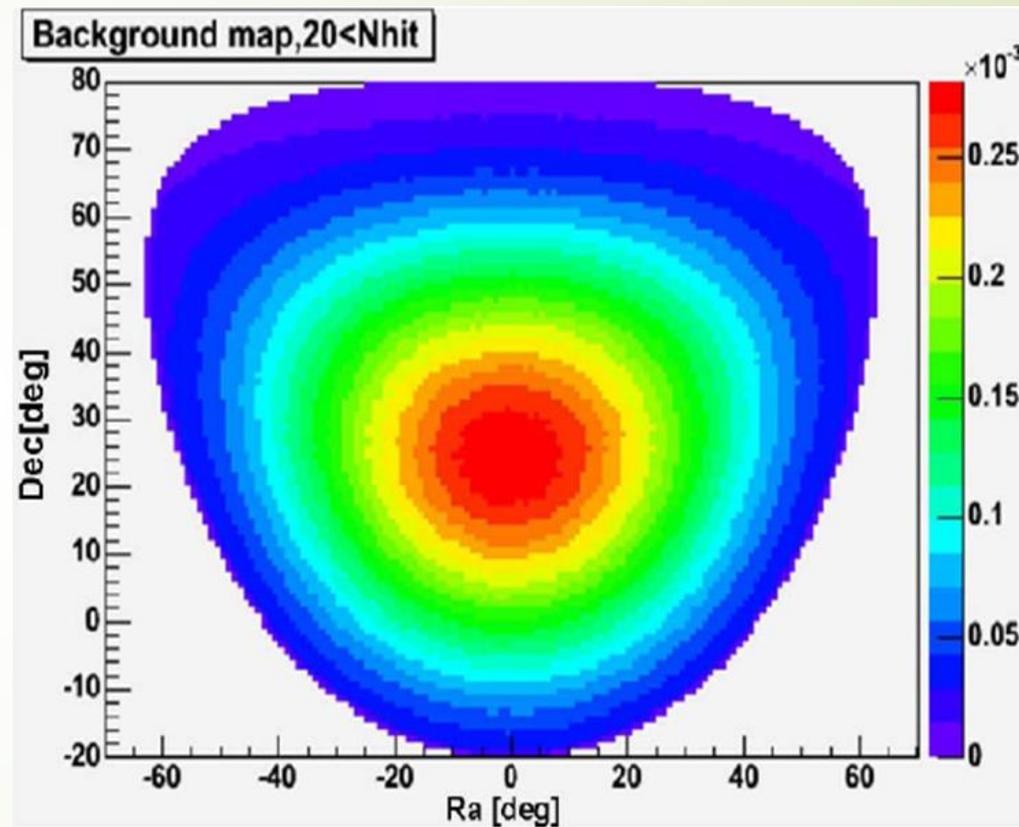
► 利用长时间数据(2h,4h,24h等)产生时角坐标系(或地平坐标系) **效率图**

► **Time swapping**

通过效率图抽取10倍待估时间窗口内总触发事例数估计背景

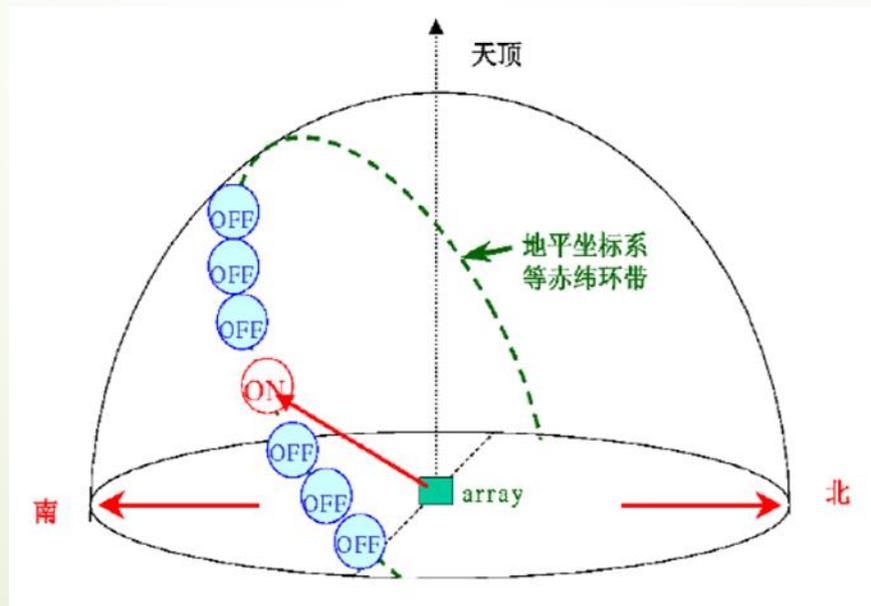
► **Direct integral**

待估时间窗口总触发事例乘以效率估计背景



3.3 天图分析

- 由于地球自转，天体源在探测器视场内不停的移动，所以在实际数据分析中，都是按一定的时间步长（ $0.1\text{deg}/24\text{s}$ ）对天体源进行跟踪，然后再累积起来。
- 一般对天区划分为 $0.1\text{deg}\times 0.1\text{deg}$ ，然后对视场内所有的天区进行分析。



天图与平滑

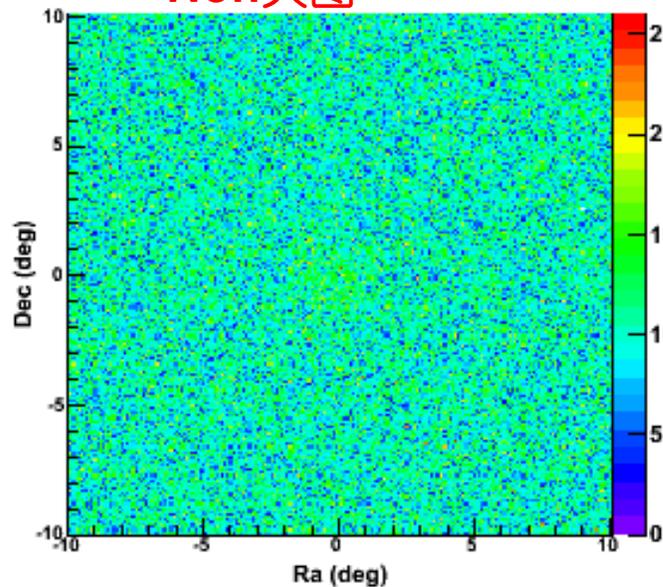
平滑

根据角分辨率大小对天图进行平滑

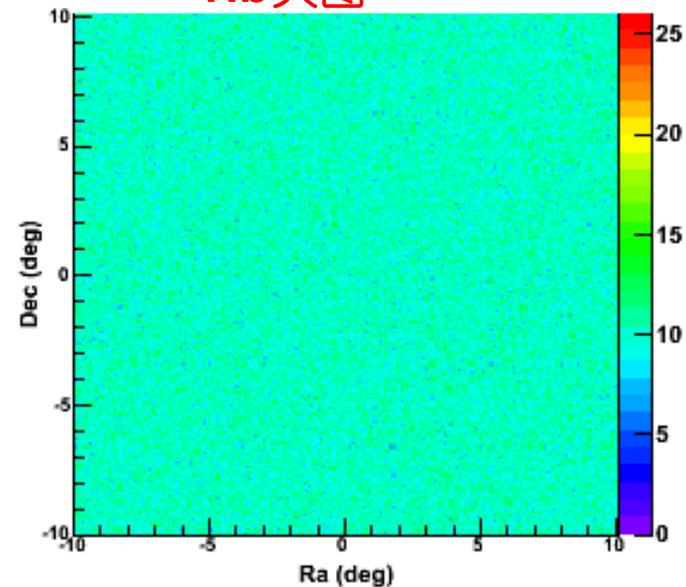
简单平滑

高斯平滑

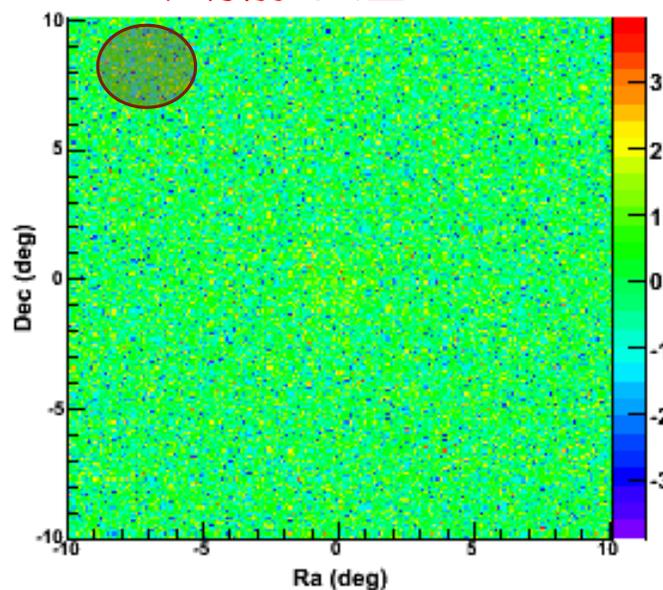
Non天图



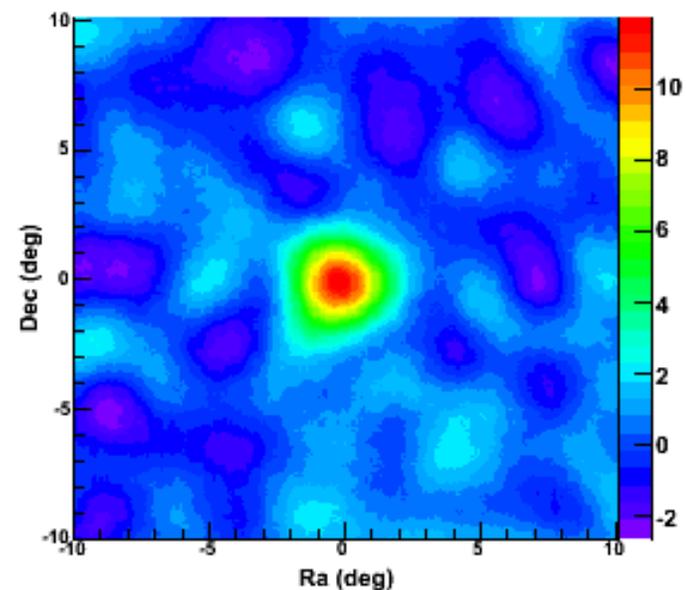
Nb天图



平滑前S天图



平滑后S天图



3.4 显著性估计

- 在 N_{on} 、 N_{off} 数比较大时，三个公式结果基本一致，但是在数目小时李马公式(17)最正确。

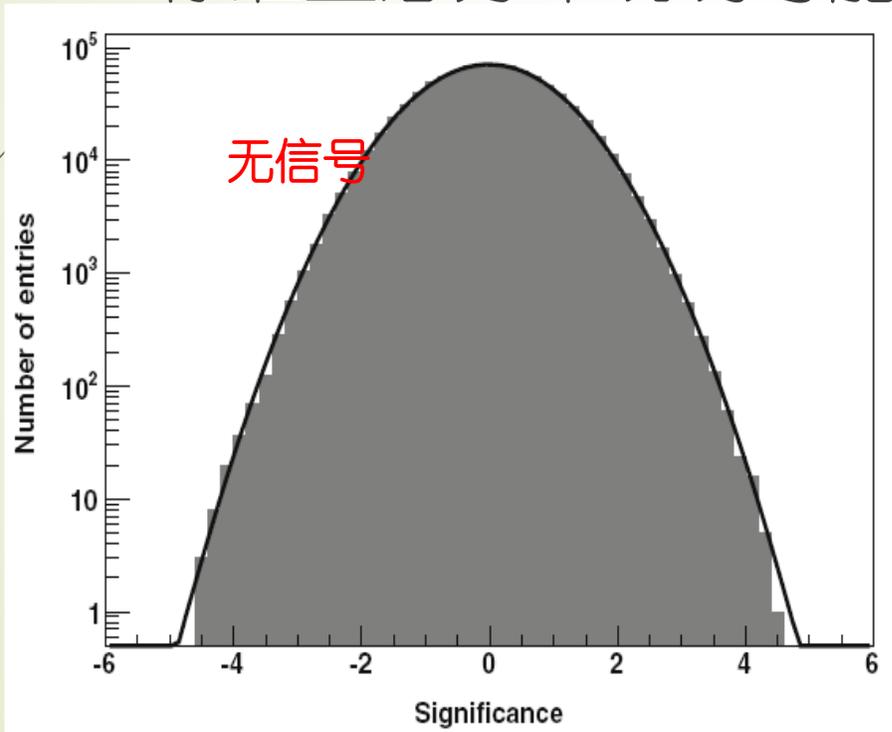
$$S = \frac{N_S}{\hat{\sigma}(N_S)} = \frac{N_{on} - \alpha N_{off}}{\sqrt{N_{on} + \alpha^2 N_{off}}} \quad (5)$$

$$S = \frac{N_S}{\hat{\sigma}(N_S)} = \frac{N_{on} - \alpha N_{off}}{\sqrt{\alpha(N_{on} + N_{off})}} \quad (9)$$

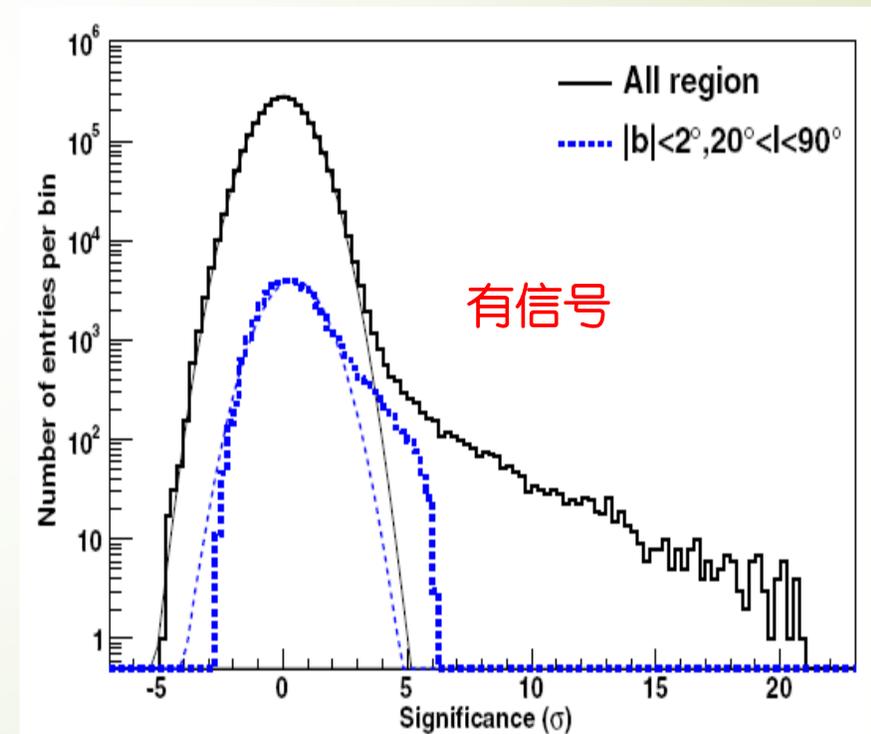
$$S = \sqrt{-2 \ln \lambda} = \sqrt{2} \left\{ N_{on} \ln \left[\frac{1 + \alpha}{\alpha} \left(\frac{N_{on}}{N_{on} + N_{off}} \right) \right] + N_{off} \ln \left[(1 + \alpha) \left(\frac{N_{off}}{N_{on} + N_{off}} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (17)$$

显著性分布

- 在没有源的情况下，显著性符合标准正态分布，超出标准正态分布说明可能存在信号。



Astroparticle Physics 32 (2009) 47–52

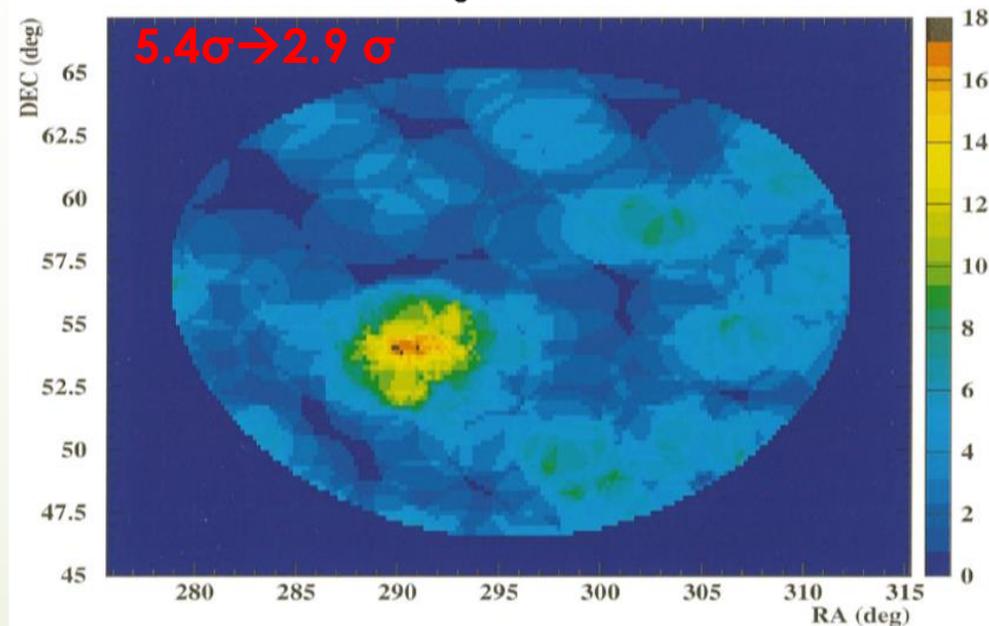
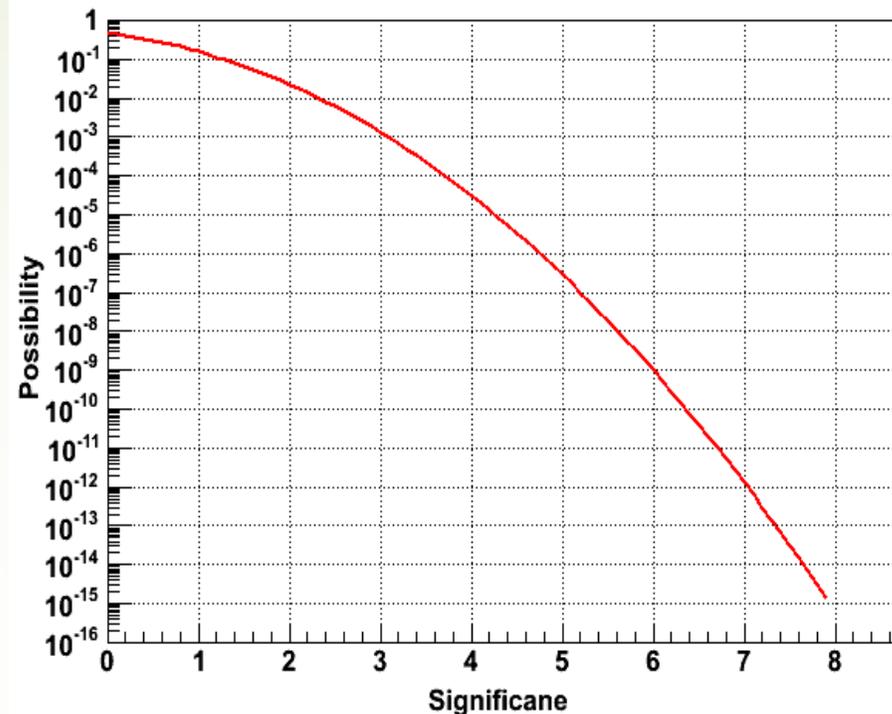


ApJ 779:27, 2013

显著性与概率

- ➔ 3σ , $P=1.35e-3$
- ➔ 5σ , $P=2.87e-7$
- ➔ 6σ , $P=9.87e-10$

验前概率乘以实验次数为验后概率，**验后概率才反应事件真实性概率**。在分析中应严格统计实验次数，低估实验次数将会高估显著性。



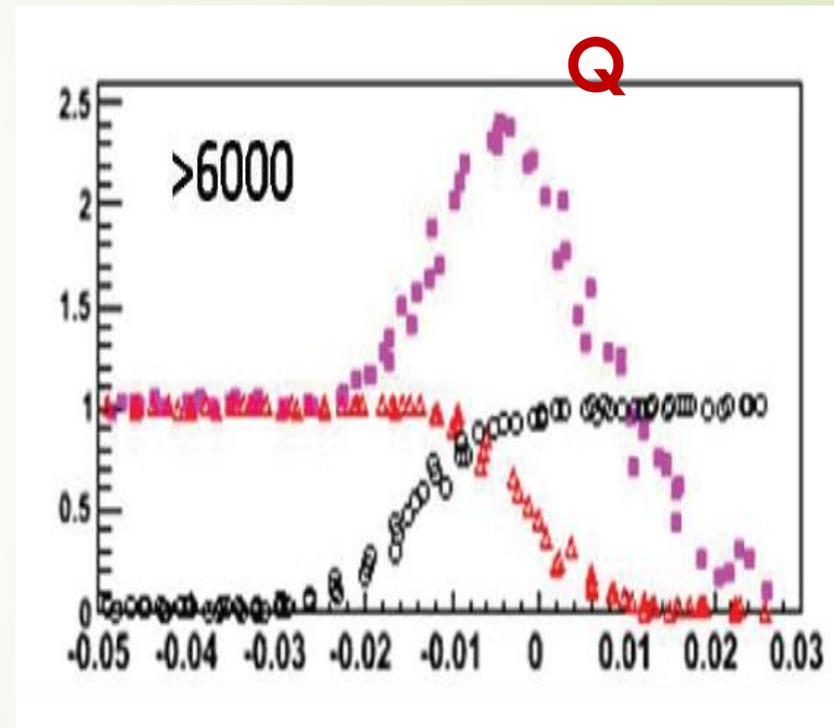
3.5 伽马/质子鉴别品质因子

- ➔ EAS阵列在观测伽马射线时，有很多宇宙线本底，本底远高于伽马信号，显著性的估计公式近似为

$$S = \frac{N_\gamma}{\sqrt{N_B}}$$

- ➔ 探测器灵敏度一般定义为 5σ ，如果能够有效排除本地，就可以提高探测器灵敏度，提高度以品质因子Q表征

$$Q = \epsilon_\gamma / \sqrt{(1 - \epsilon_h)}$$



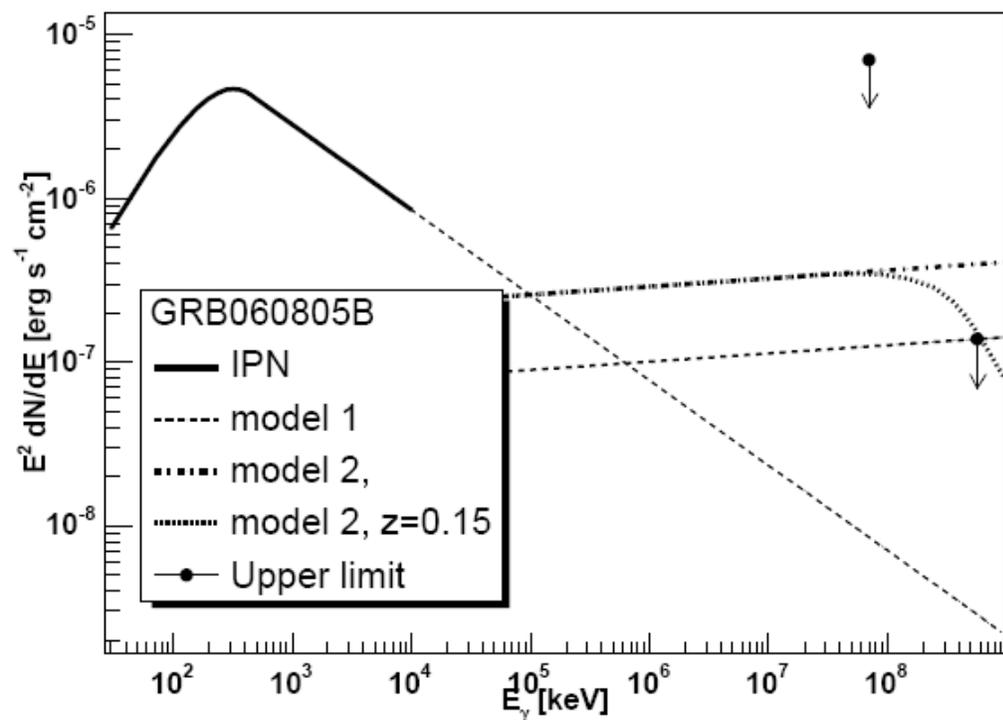
3.6 流强估计

- 在实验上，对某一源或位置只会得到其超出背景信号的事例数目，具体数目对应的原初流强需要通过模拟估计其曝光度。
- 在假设一定能谱形式下就可以算出其流强。一般给出其中值能量处的流强。

$$\langle S(\theta) \rangle = \frac{\int S(E, \theta) (dN/dE) dE}{\int (dN/dE) dE}$$

$$\Omega = \sum \langle S(\theta) \rangle \Delta T(\theta)$$

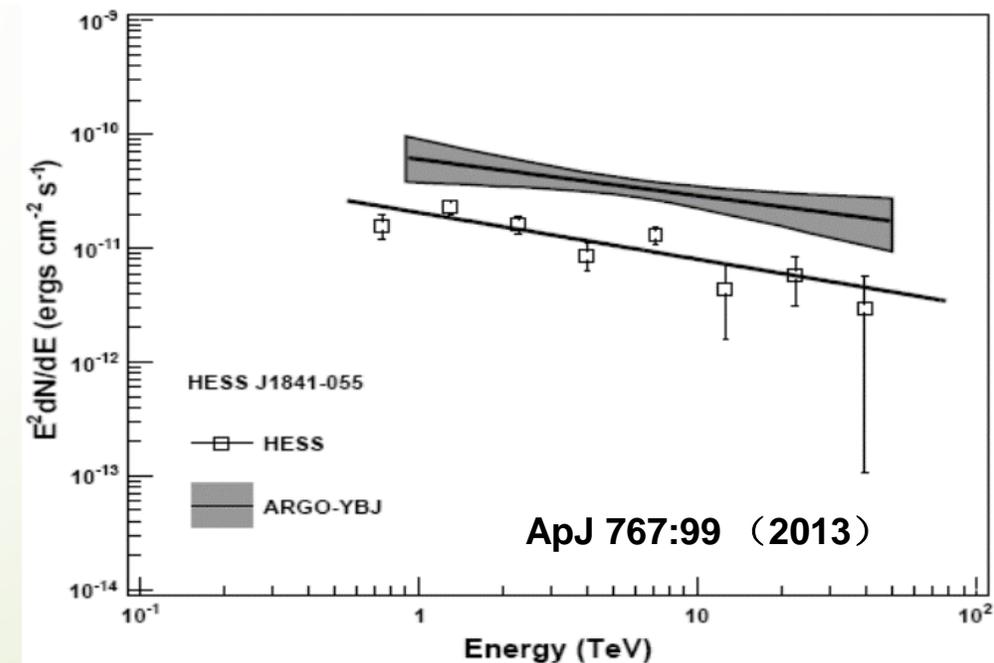
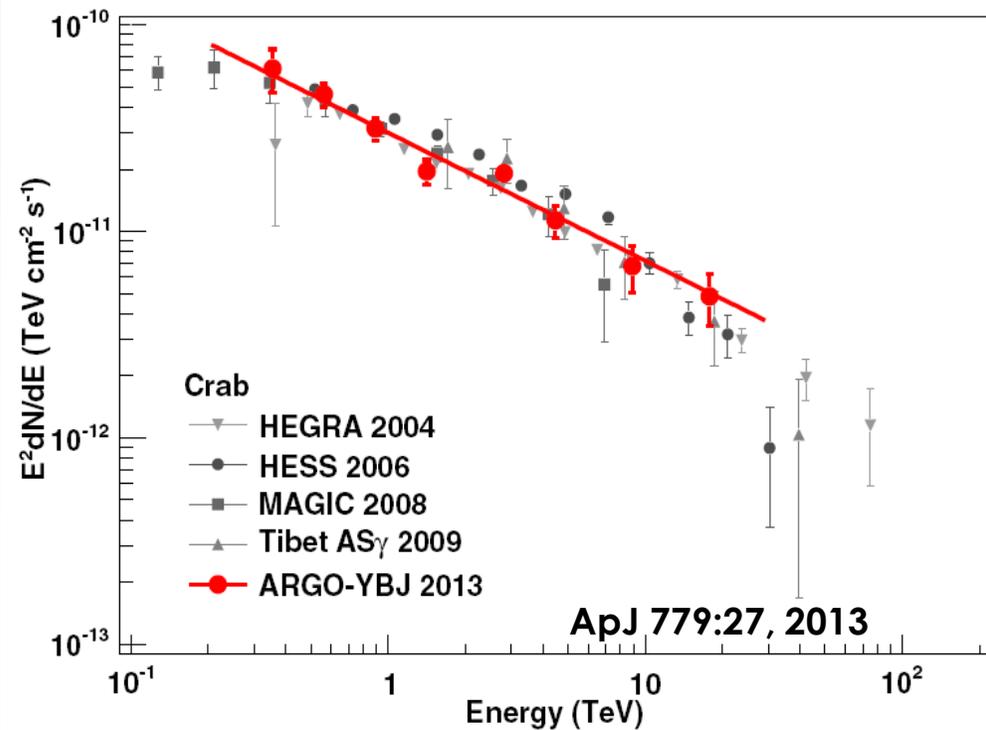
$$\frac{N_s}{\Omega} = \int (dN/dE) dE = \int J \cdot E^{-\alpha} dE$$



3.7 能谱拟合

- 将实验数据分为几个能量段，先假设一定能谱形式按前面分别估计出不同能段的流强，给出每个中值能量处流强，然后就可以拟合能谱，根据拟合结果重复上述过程，直到迭代收敛。

$$\frac{dN}{dE} = (9.0 \pm 1.6) \times 10^{-13} (E/5 \text{ TeV})^{-2.32 \pm 0.23}$$



小结

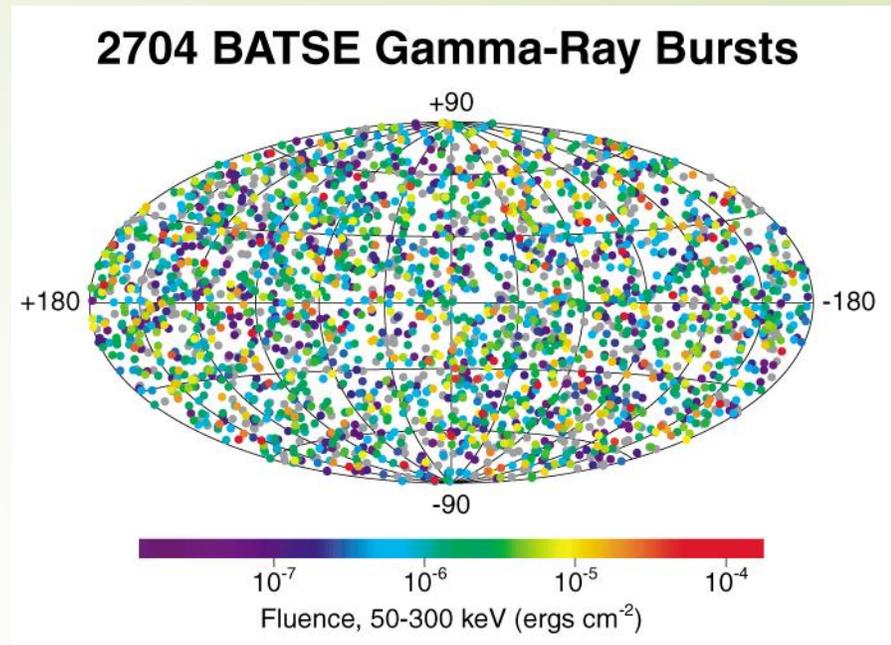
- ▶ 宇宙线背景远高于信号，背景估计是所有天体源分析的基础，正确的背景估计是数据分析的关键，显著性计算既是找源的重要判据也是检验背景估计的重要判据，在独立发现源时，验后概率或验后显著性的估计至关重要！
- ▶ 伽马质子鉴别好坏决定着实验的灵敏度。
- ▶ 通过模拟对实验曝光度的估计，可以实验测量信号翻译成天体源的光度。

四、几个物理分析实例

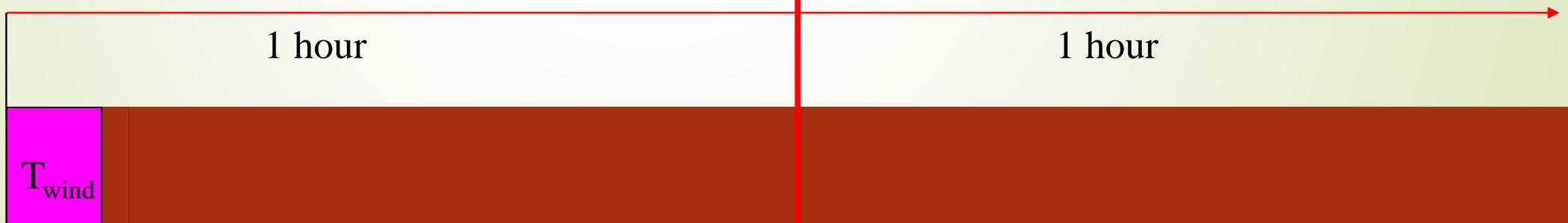
- GRB的寻找
- 全天区扫描
- 扩展源的分析
- AGN的监测
- 大尺度各向异性
- 日地空间磁场的测量
- 小结

4.1 GRB的寻找

- GRB在低能约每天一个，位置随机，持续时间ms到百s不定，高能持续时间偏长，目前测量最高能量94GeV。
- 根据低能报道结果进行搜寻。



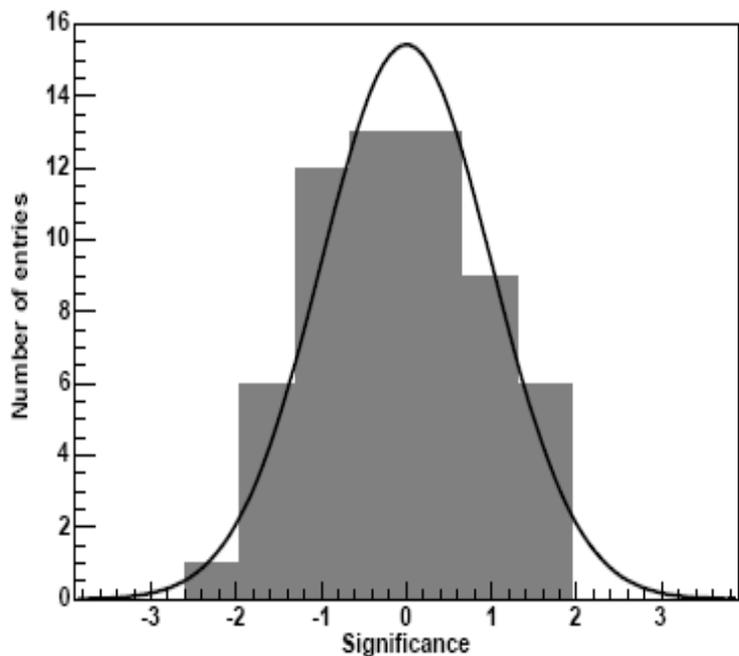
GRB爆发时间



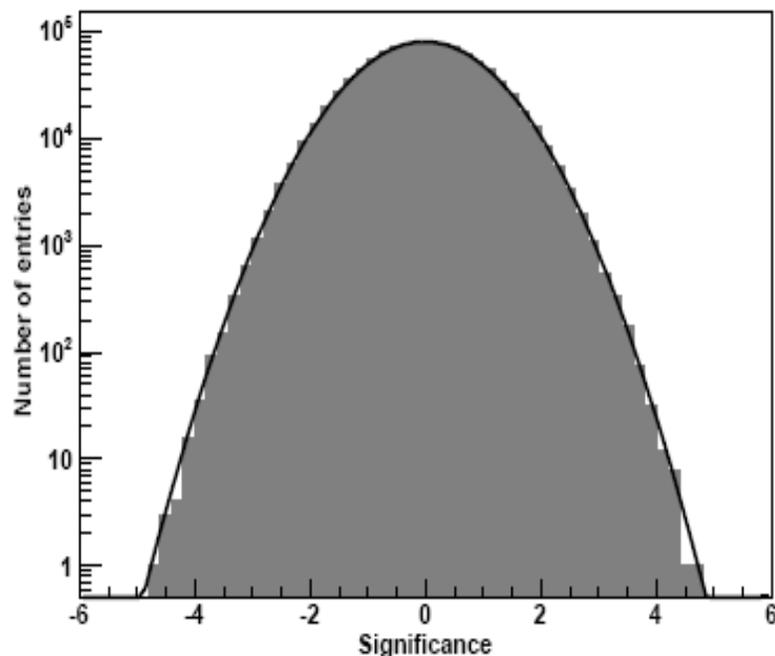
ARGO-YBJ对GRB寻找

- 报道GRB爆发期的观测结果，给出流强上限
- 给出时间扩展搜寻结果

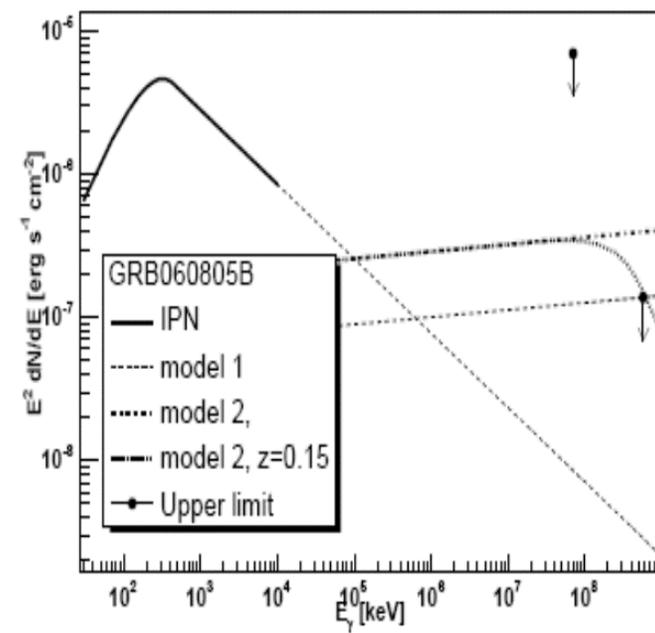
爆发期间显著性分布



前后1h搜寻结果

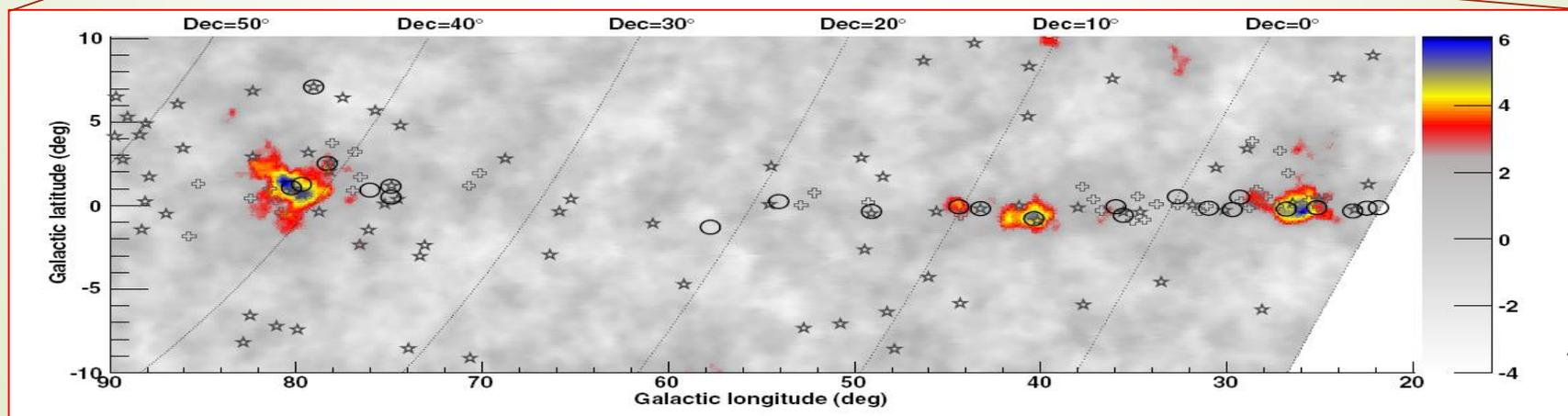
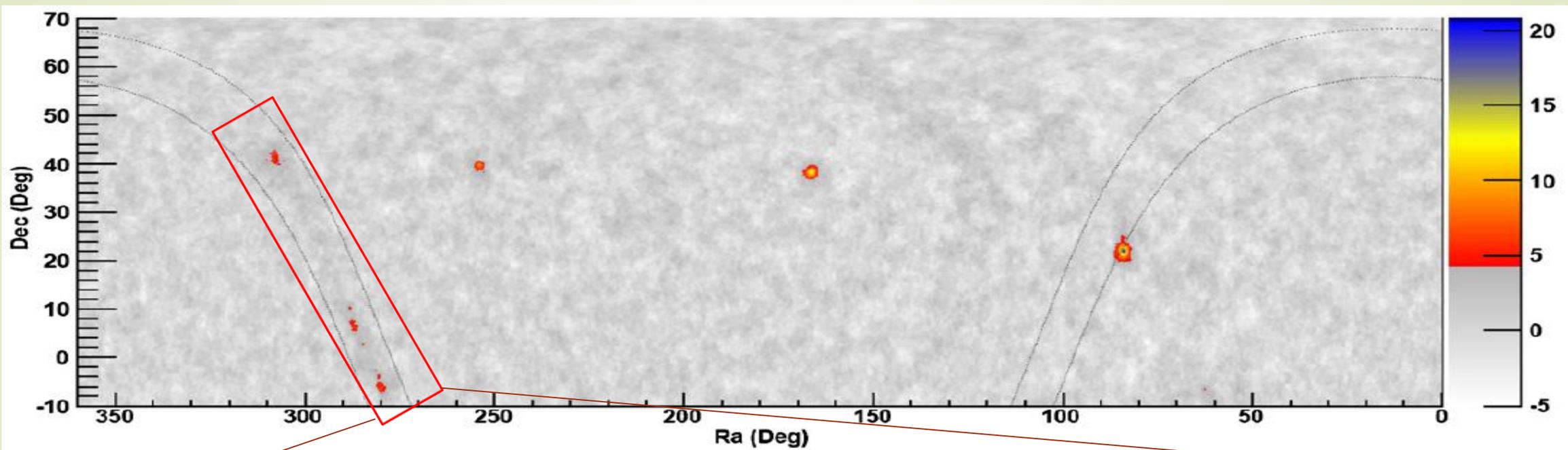


流强上限



4.2 全天区扫描：ARGO-YBJ五年结果

70

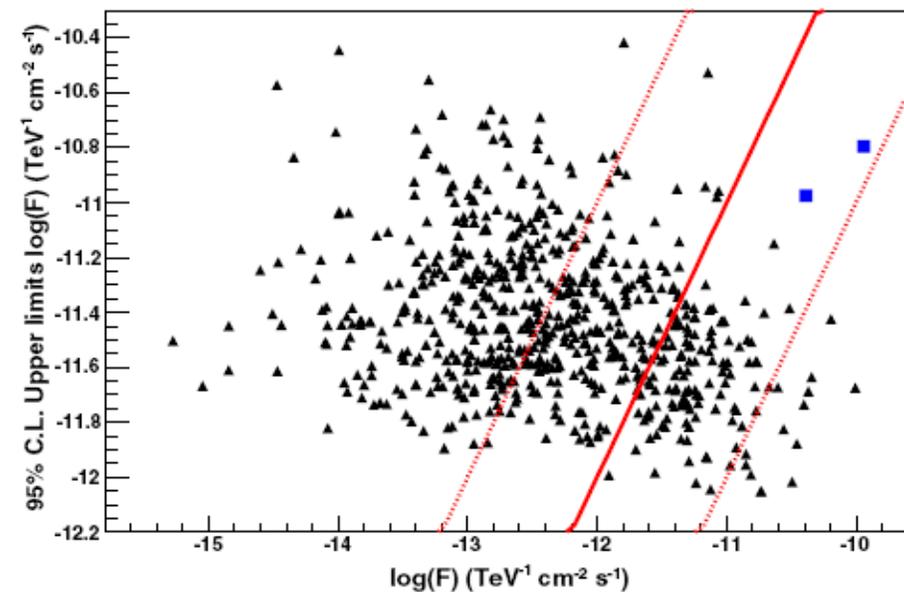
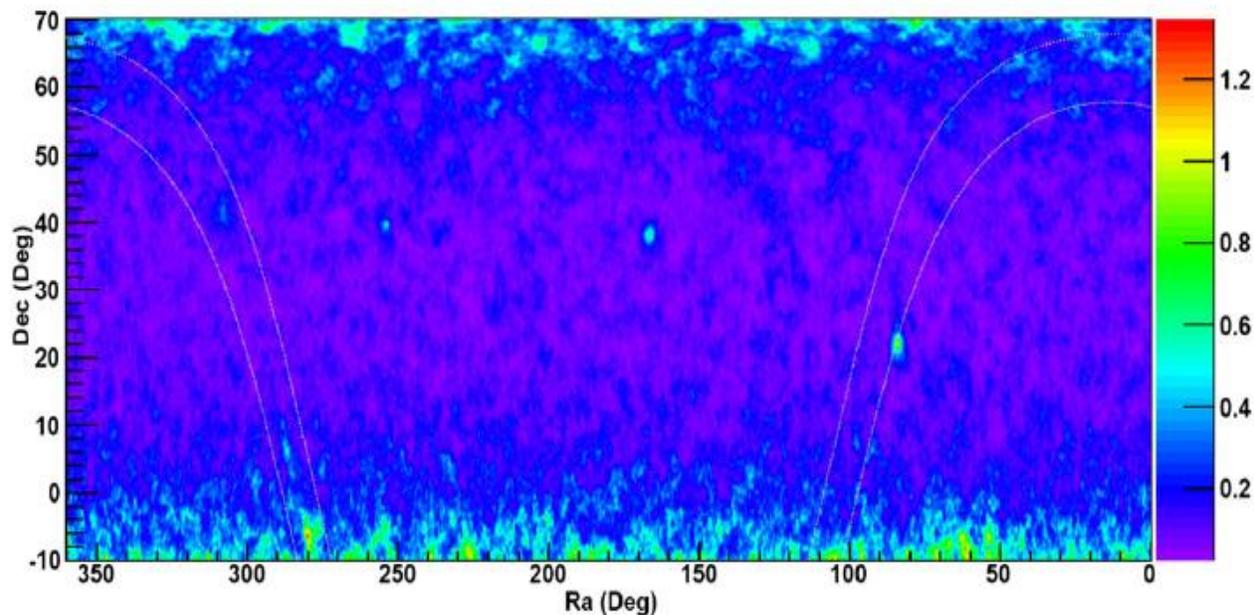


ApJ 779:27, 2013

| ARGO-YBJ Name | R.A. ^a (deg) | Decl. ^a (deg) | l (deg) | b (deg) | S (s.d.) | Associated TeV Source |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------------|---------------------------------|
| ARGO J0409-0627 | 62.35 | -6.45 | 198.51 | -38.73 | 4.8 | |
| ARGO J0535+2203 | 83.75 | 22.05 | 184.59 | -5.67 | 20.8 | Crab Nebula |
| ARGO J1105+3821 | 166.25 | 38.35 | 179.43 | 65.09 | 14.1 | Mrk 421 |
| ARGO J1654+3945 | 253.55 | 39.75 | 63.59 | 38.80 | 9.4 | Mrk 501 |
| ARGO J1839-0627 | 279.95 | -6.45 | 25.87 | -0.36 | 6.0 | HESS J1841-055 |
| ARGO J1907+0627 | 286.95 | 6.45 | 40.53 | -0.68 | 5.3 | HESS J1908+063 |
| ARGO J1910+0720 | 287.65 | 7.35 | 41.65 | -0.88 | 4.3 | |
| ARGO J1912+1026 | 288.05 | 10.45 | 44.59 | 0.20 | 4.2 | HESS J1912+101 |
| ARGO J2021+4038 | 305.25 | 40.65 | 78.34 | 2.28 | 4.3 | VER J2019+407 |
| ARGO J2031+4157 | 307.95 | 41.95 | 80.58 | 1.38 | 6.1 | MGRO J2031+41 TeV J2032+4130 |
| ARGO J1841-0332 | 280.25 | -3.55 | 28.58 | 0.70 | 4.2 | HESS J1843-033 |

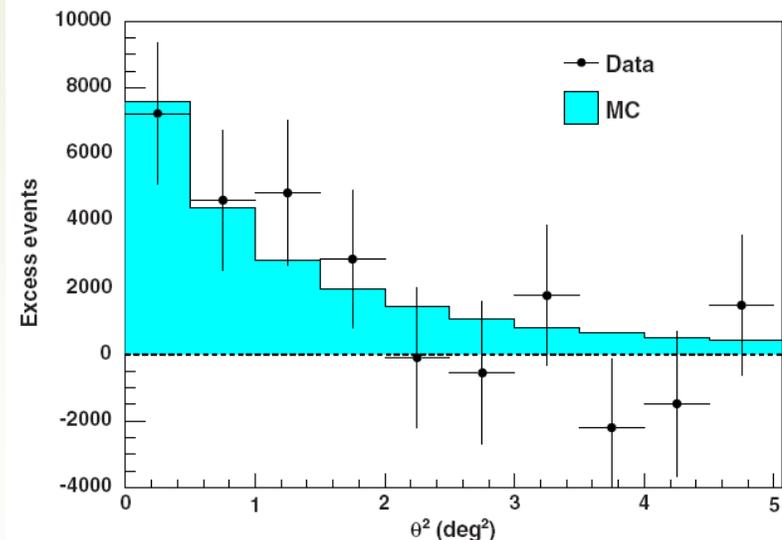
ARGO-YBJ星表

ARGO-YBJ给出的TeV流强上限

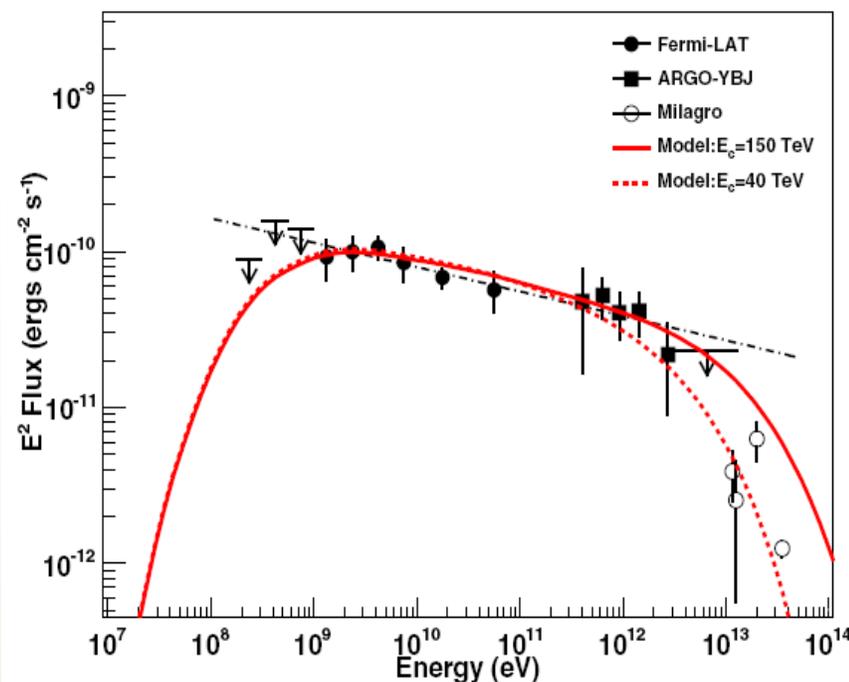
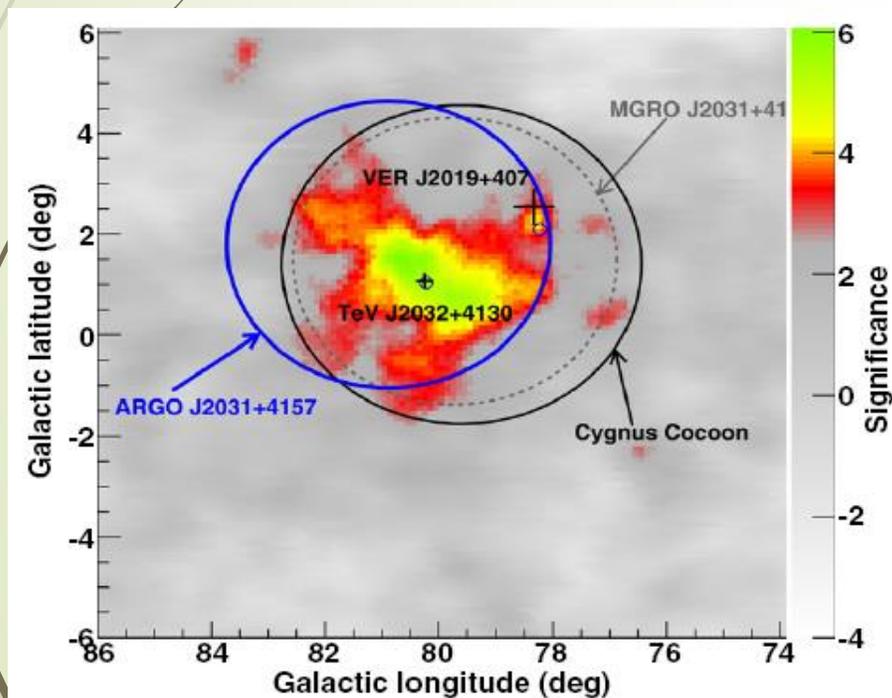


4.3 扩展源的分析

- 扩展源不同于点源，需要通过实验数据估计其扩展度，然后再估计其流强，否则会低估其流强。
- ARGO-YBJ通过位置、扩展度和能谱特征认证了首个TeV“超泡”。



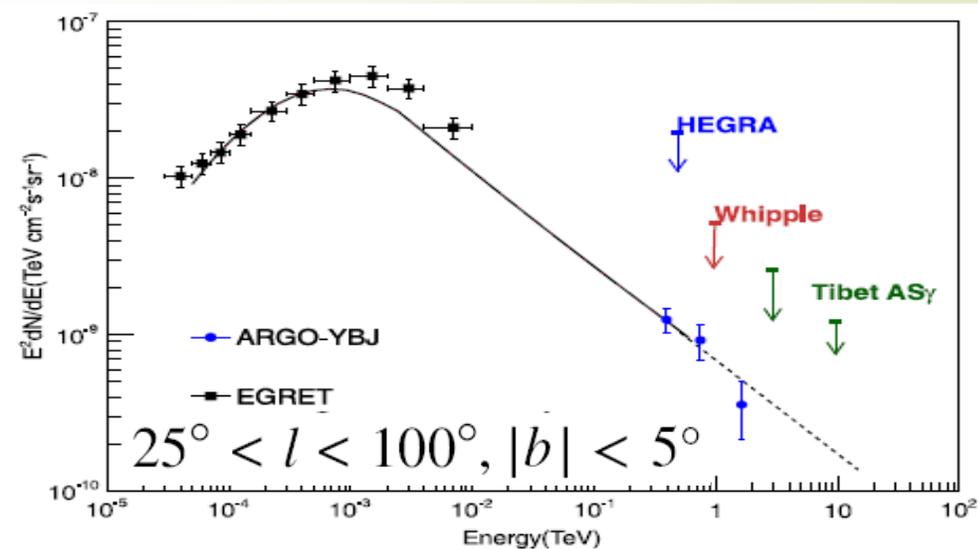
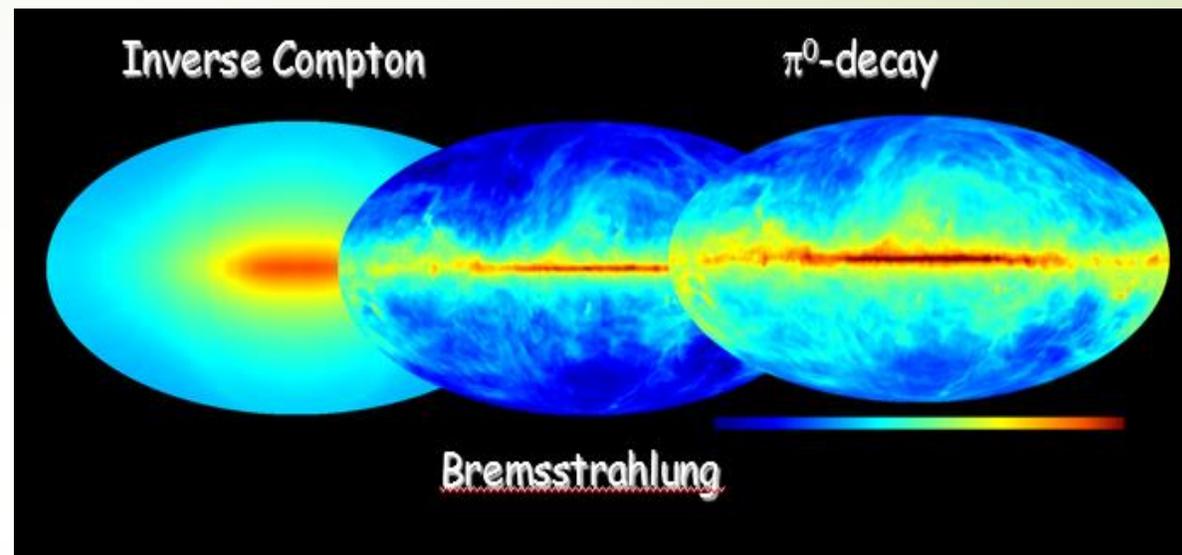
$$\sigma_{\text{ext}} = (1.8 \pm 0.5)^\circ$$



ARGO-YBJ
ApJ 790:152, 2014

银河系弥散伽马辐射测量

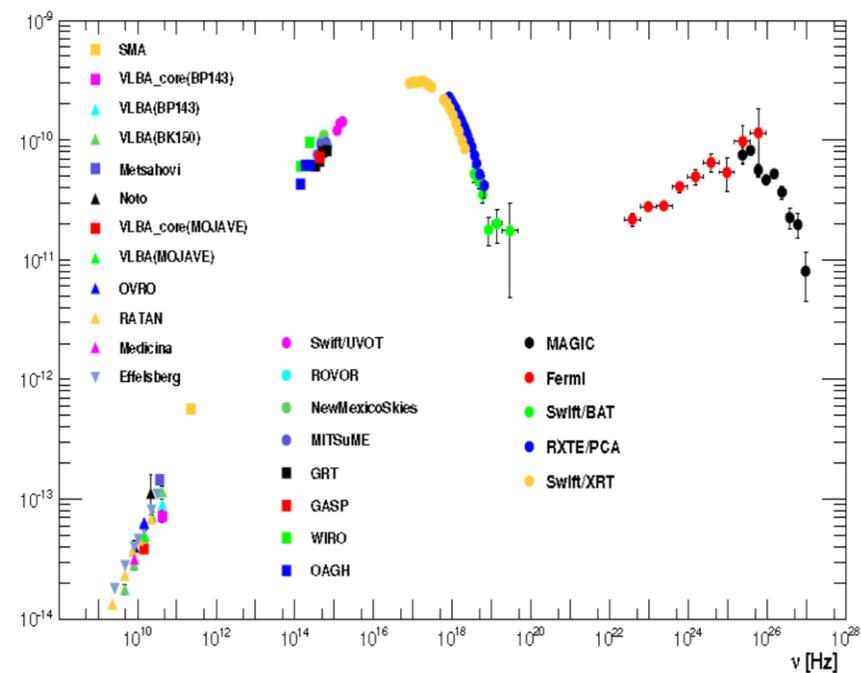
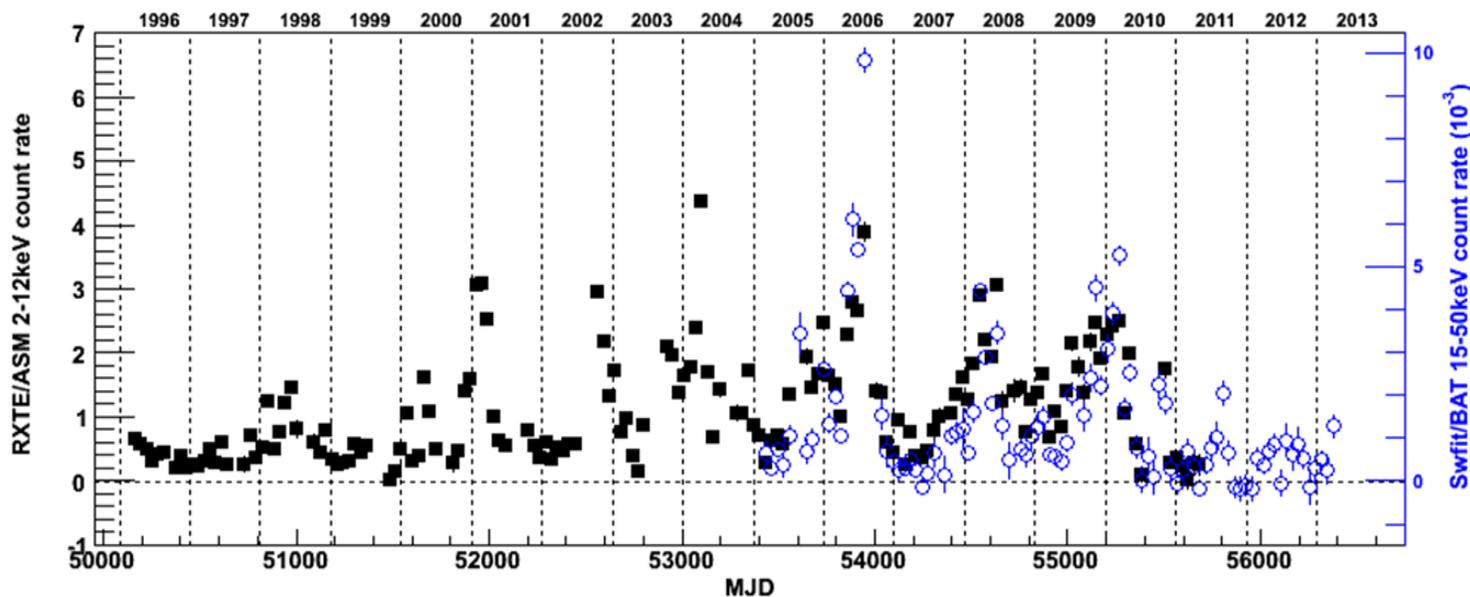
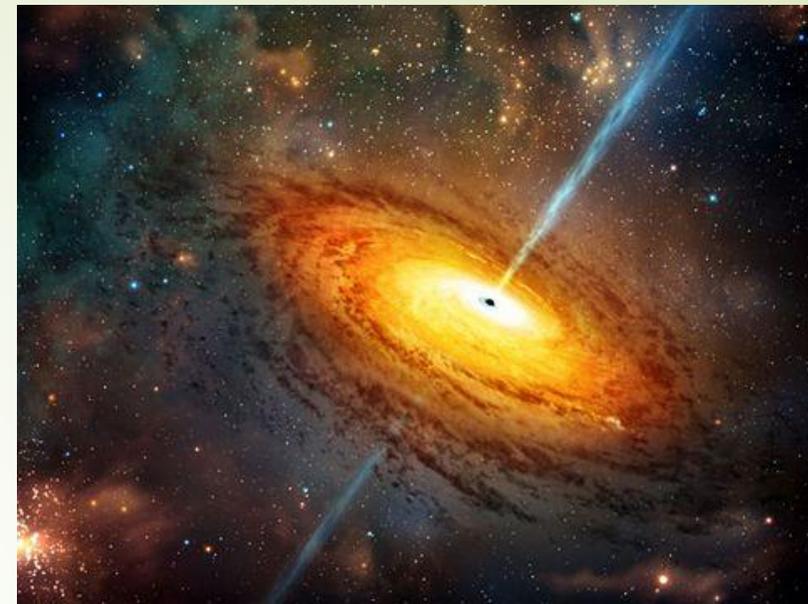
- ➔ 分析区域非常大，前面所述的背景估计并不能给出正确测量。
- ➔ 银道面上有许多已知和未知的伽马射线源，会污染相应的弥散伽马测量。
- ➔ ARGO-YBJ填补了TeV测量的空白。



ARGO-YBJ, ApJ 806:20, 2015

4.4 AGN的监测

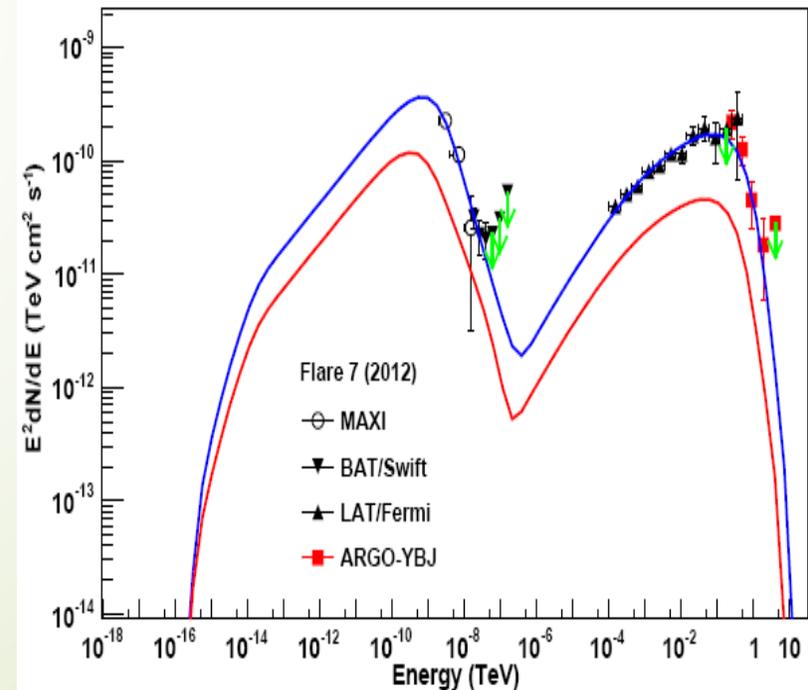
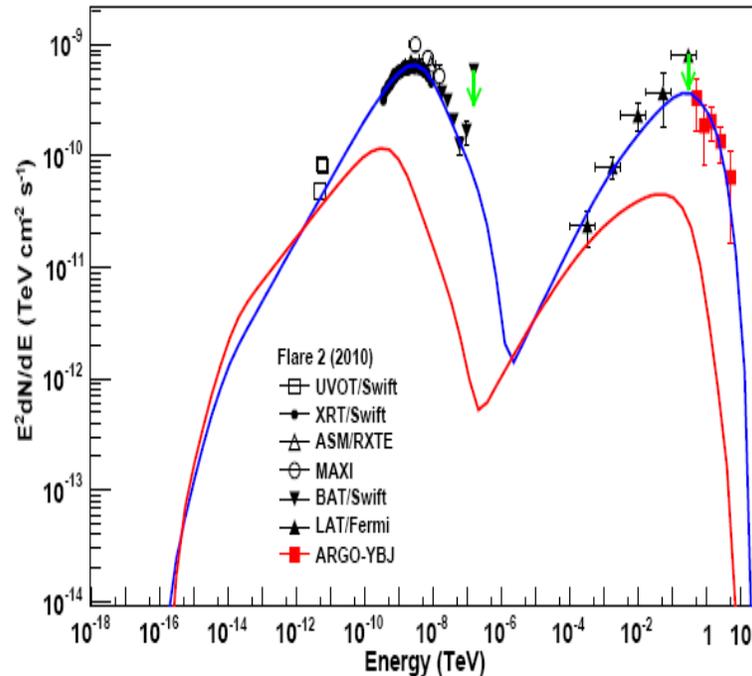
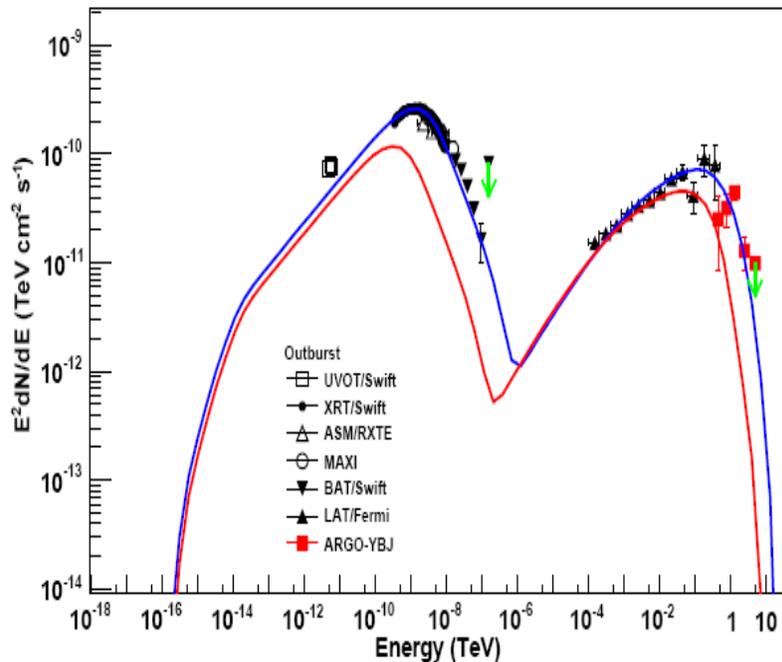
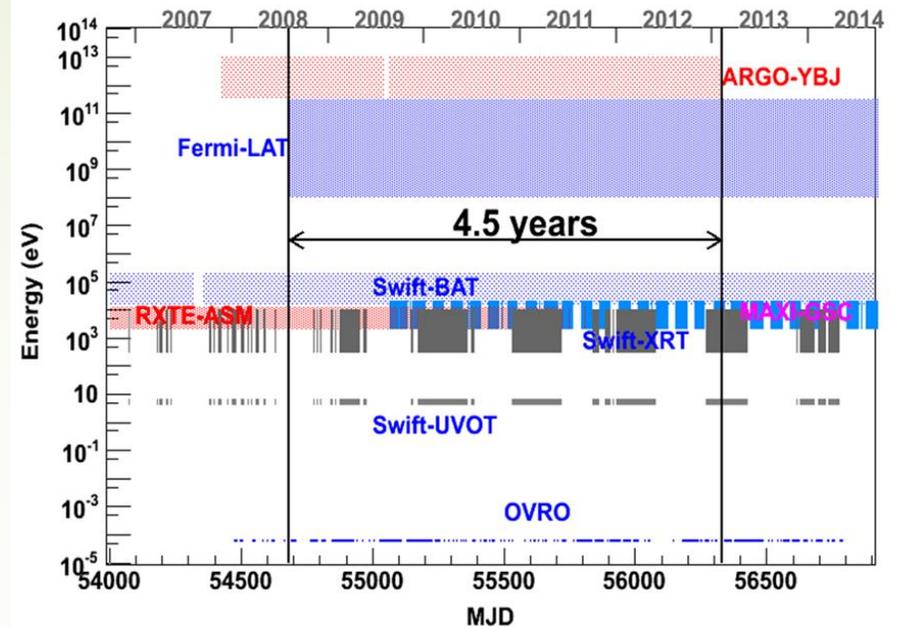
- 超大质量黑洞 ($10^6-10^{10} M_{\odot}$)、吸积盘、jet ($0.1-10^6 pc$)
- 从射电到TeV伽马
- 流强非常不稳定



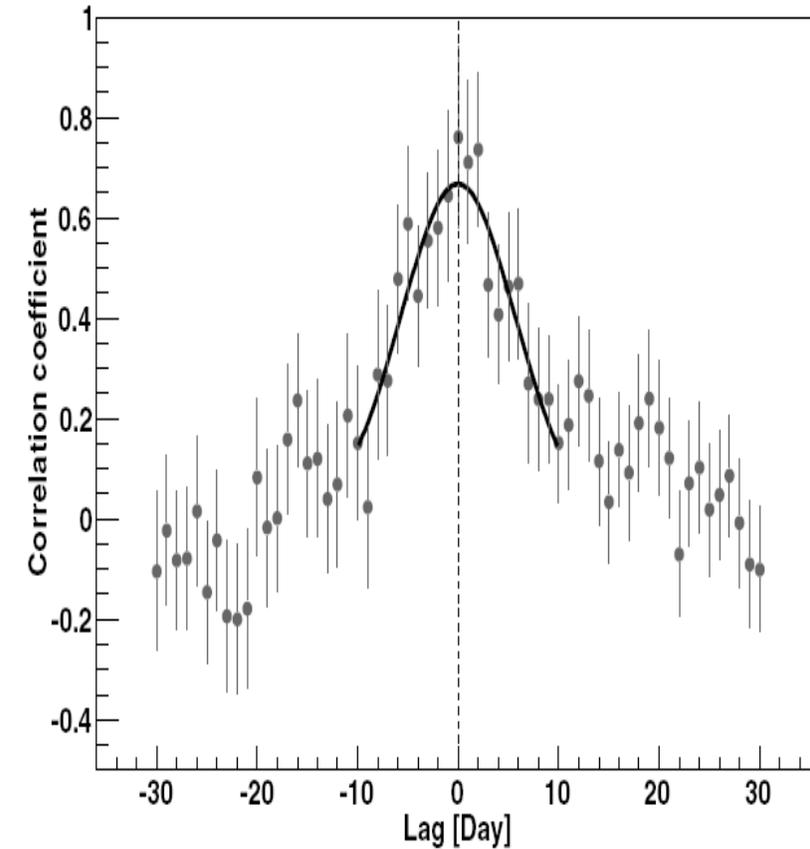
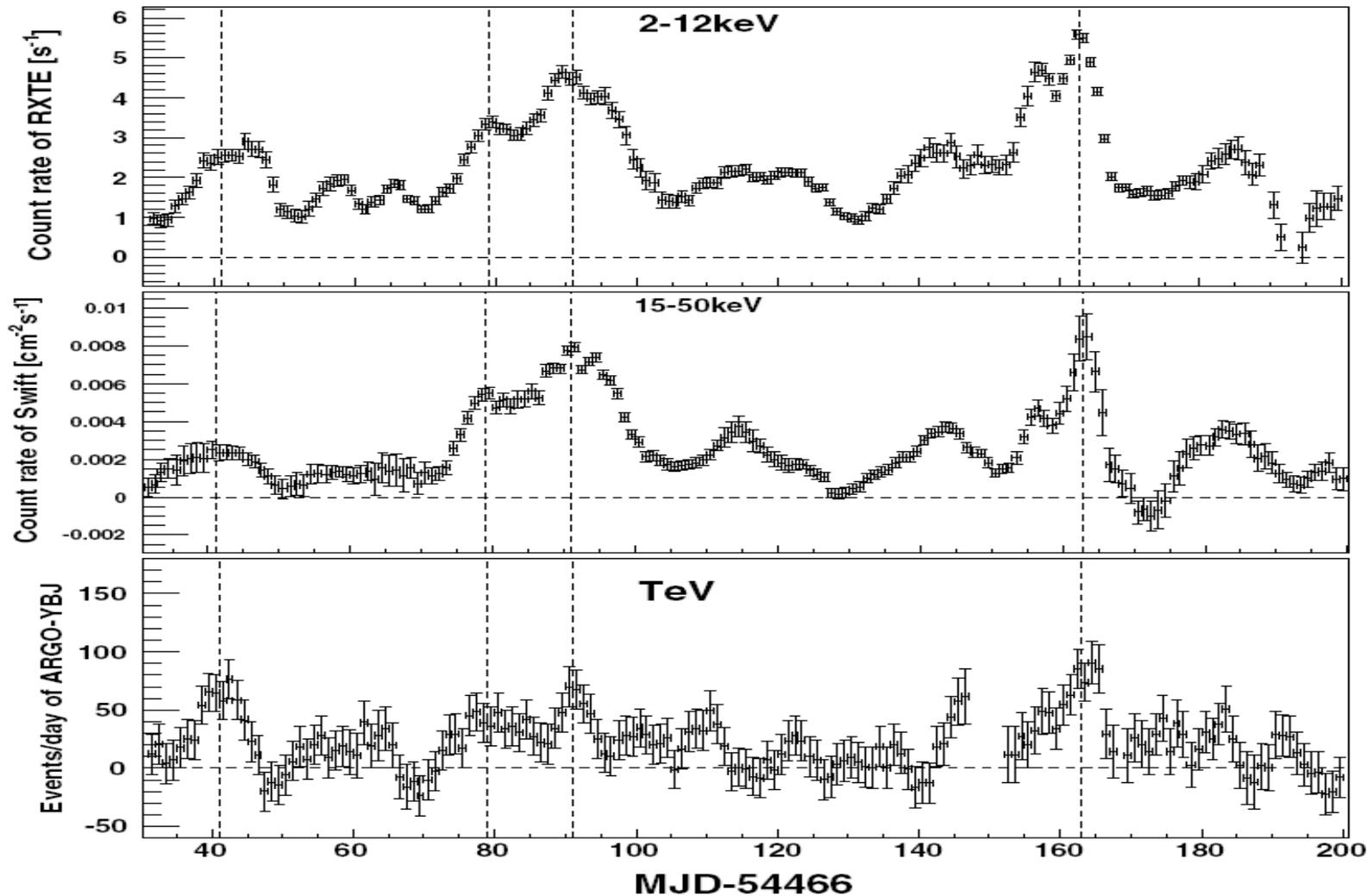
ARGO-YBJ实现对Mrk421的多波段观测

➔ 系统研究其爆发期间多波段辐射变化特征，三类爆发！

ARGO-YBJ, ApJS, 222:6, (2016)



X-ray与TeV的长期关联性

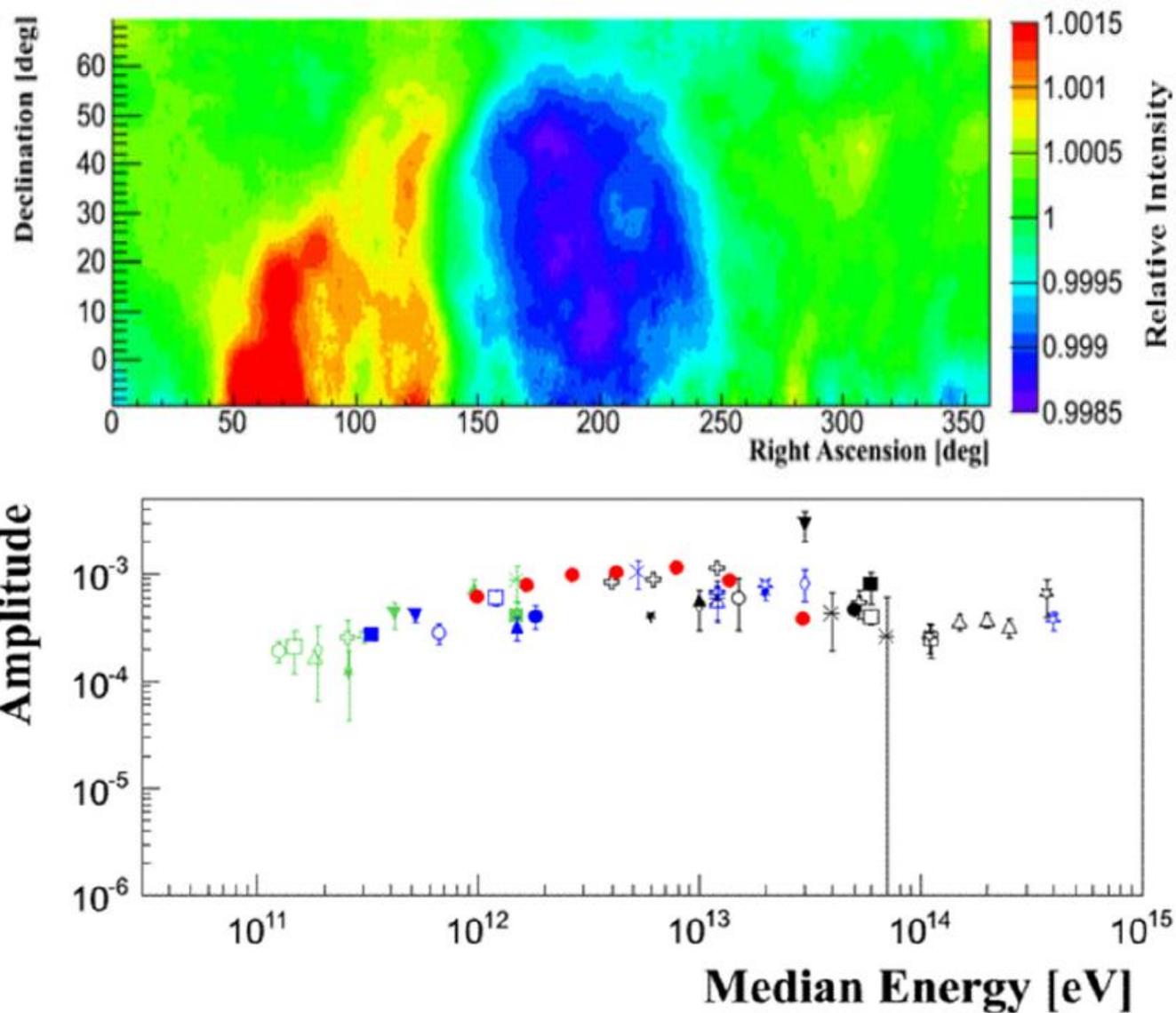


支持X射线与TeV伽马同源!

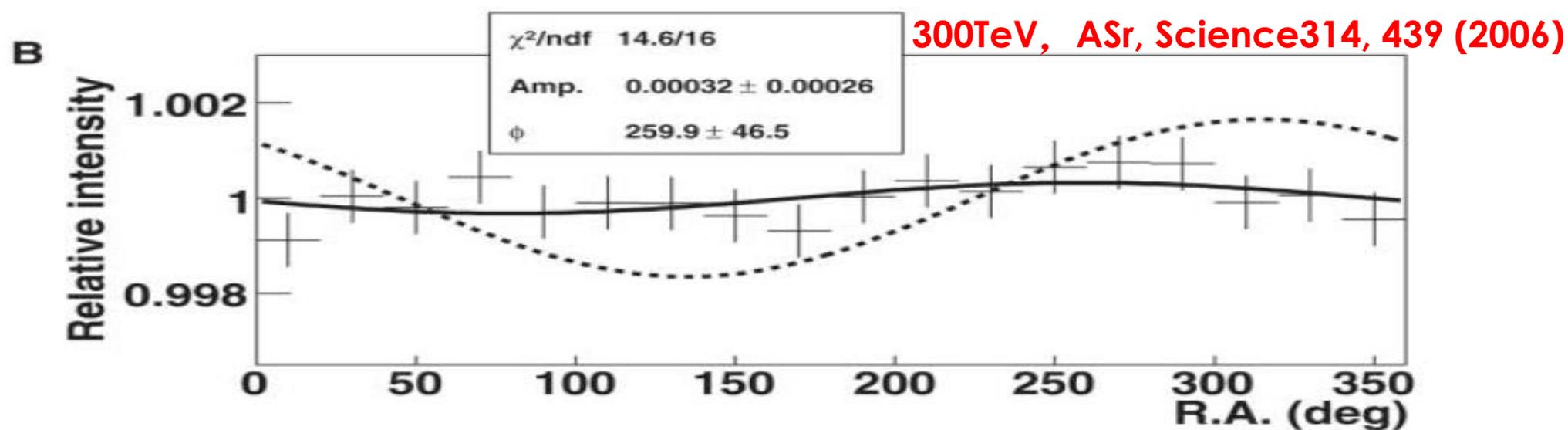
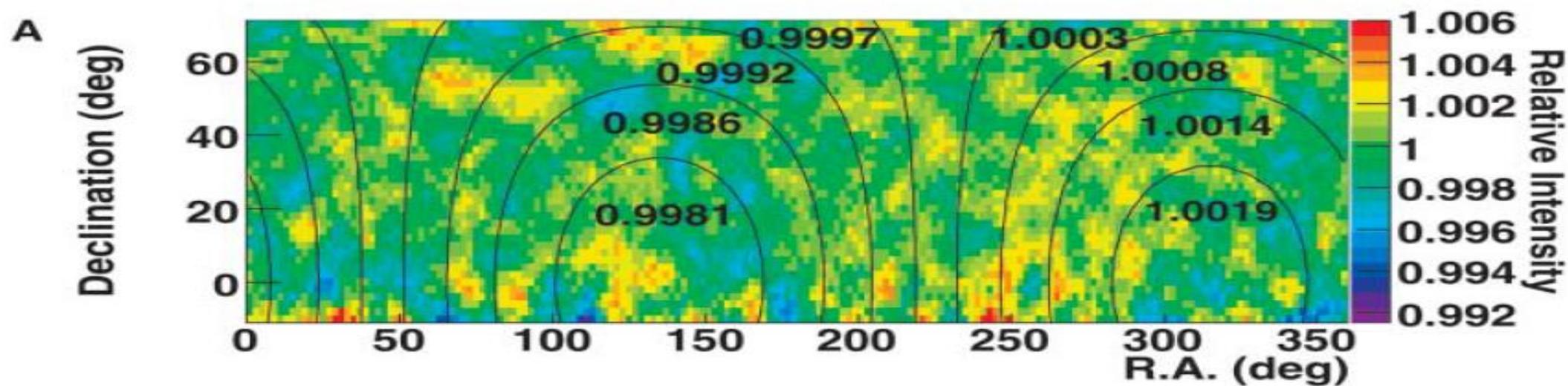
4.5 大尺度各向异性分析

- 宇宙线流强大致各向同性，但是具有0.1%幅度的各向异性，由于自关联性，简单的利用前面的背景估计方法很难得到正确的各向异性结果，需要更精确的背景估计方法。

ARGO-YBJ, ApJ 809:90(2015)

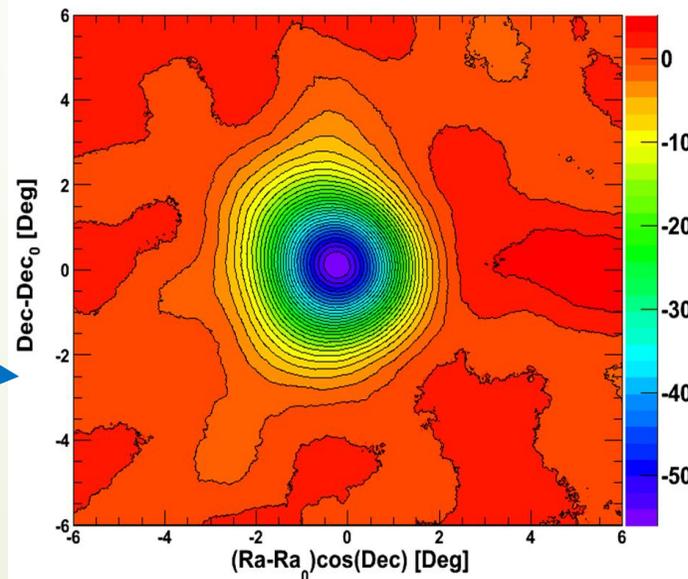
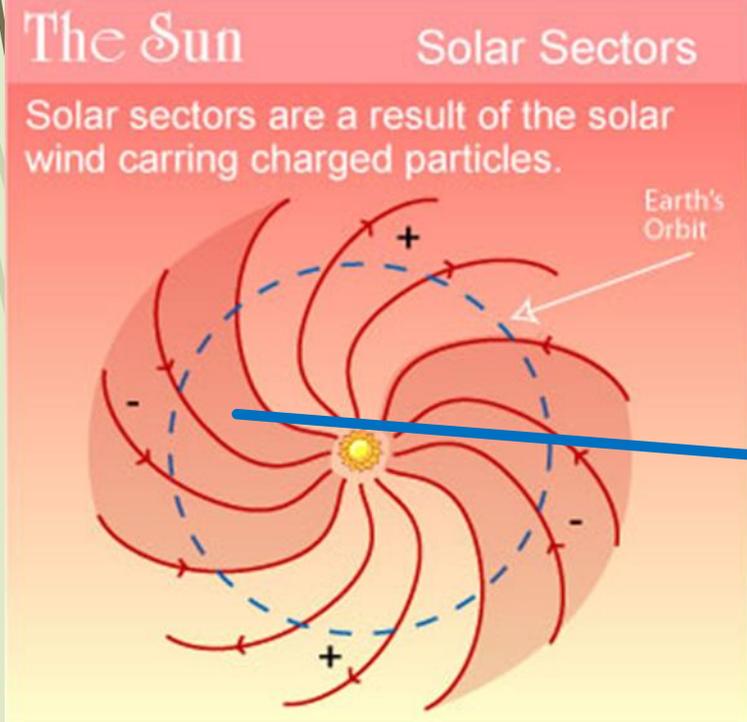


宇宙线与银河系共转

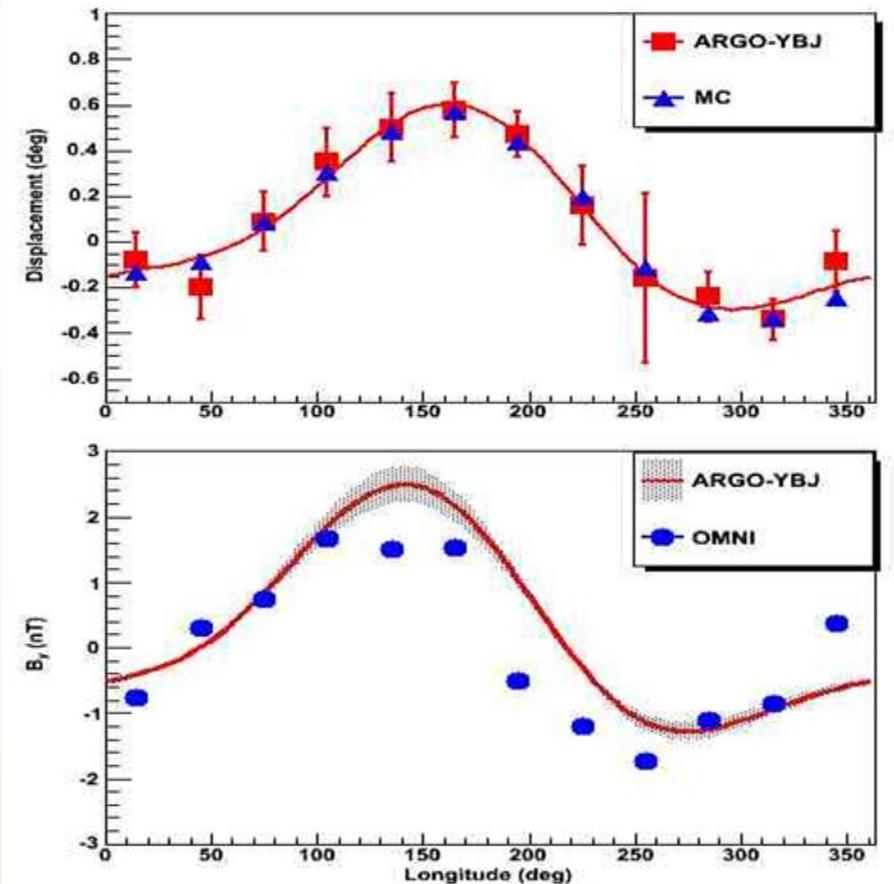


4.6 日地空间磁场的测量

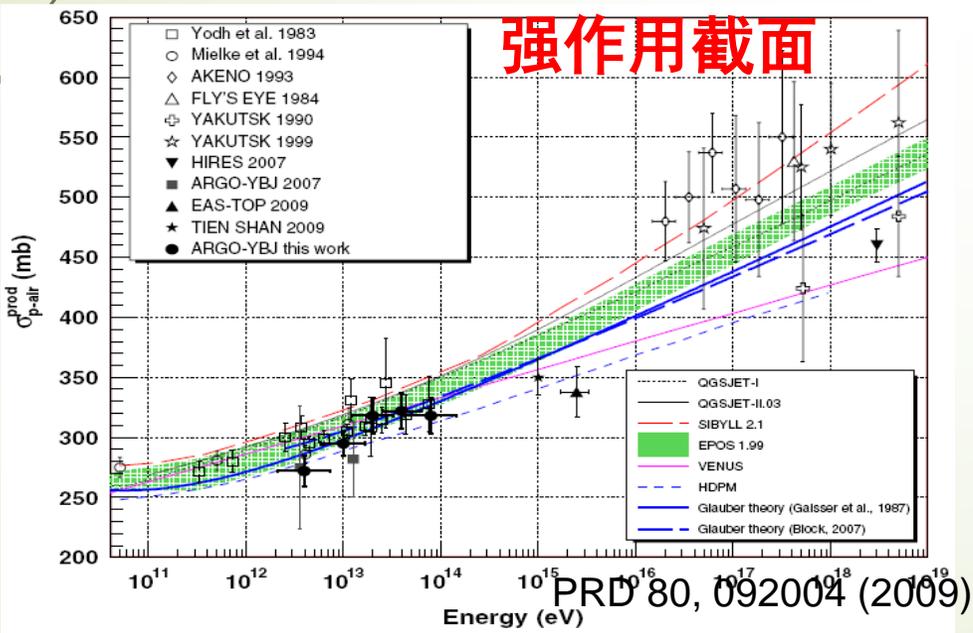
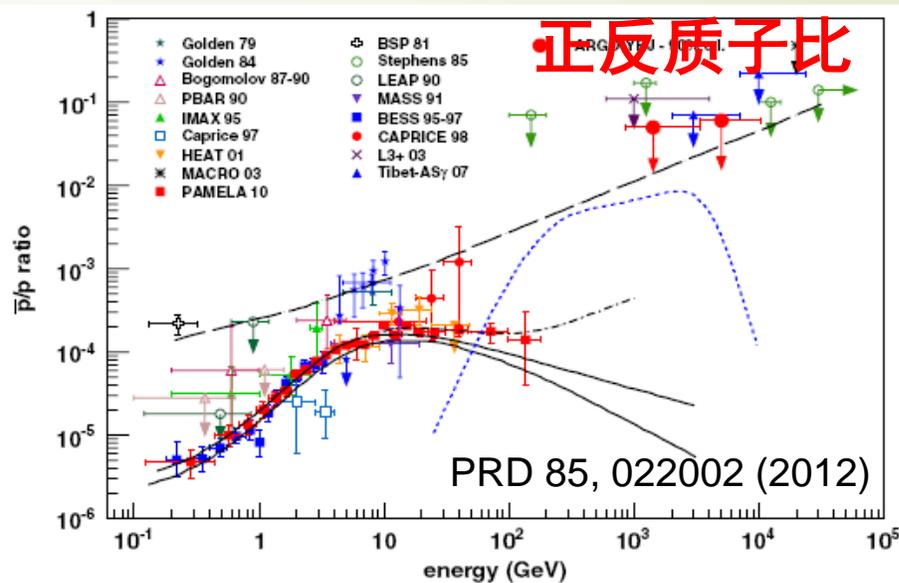
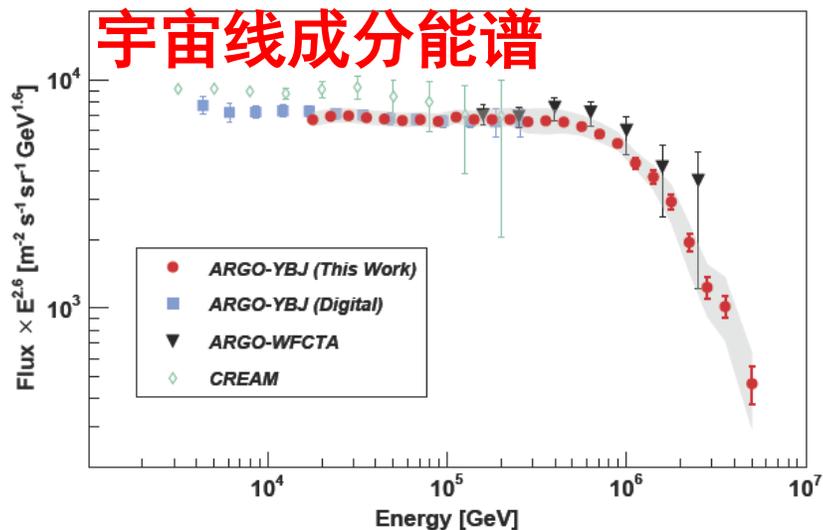
- 宇宙线为带正电荷粒子，可以作为探针快速探测空间磁场变化，而宇宙线的太阳阴影可以展现相应宇宙线在日地空间受磁场的影响。
- ARGO-YBJ首次利用日影测量行星际磁场。



ARGO-YBJ, ApJ 729,113 (2011)



ARGO-YBJ其它研究



小结

- ▶ 数据分析所面对的物理问题各式各样，需要具体考虑分析方法在不同情况下可能造成的不良影响，并利用智慧消除其影响，并给出可靠的测量结果。

总结

- ▶ 宇宙线在宇宙中普遍存在，但其起源地和加速机制未知，中国宇宙线实验经过几代人努力，已站在国际前沿，未来LHAASO在100TeV伽马天文的独特优势有可能打开一个新的天文窗口，并为宇宙线起源问题解决做出重要贡献。
- ▶ 宇宙线实验也是一个多科学研究平台，可以开展宇宙线物理、伽马天文、太阳物理、粒子物理等。