WFCTA阵列及数据处理

尹丽巧 中国科学院高能物理研究所

yinlq@ihep.ac.cn

2024年8月4日-11日, 云南大学, 昆明





主要内容

- 一. EAS中的切伦科夫辐射
- 二.WFCTA介绍
- 三.WFCTA的数据标定
- 四.WFCTA的数据重建
- 五.WFCTA与KM2A、WCDA的联合观测数据
- 六.WFCTA的数据事例挑选





一. EAS中的切伦科夫辐射







当带电粒子的速度超过了光在介质中的速度 时,会辐射出光子,称之为切伦科夫光。

带电粒子产生契伦科夫光阈值

$$E_{th} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - 1/n^2}}$$

契伦科夫光的辐射角 $\cos \theta = 1/\beta n$





契伦科夫光的光产额

$$\frac{dN}{dl} = 2\pi\alpha z^2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \sin^2\theta$$

$$\frac{dN}{dl} = 2(3.14)(.007297)(1)^2 \left(\frac{1}{4 \times 10^{-5} \text{ cm}} - \frac{1}{7 \times 10^{-5} \text{ cm}}\right) \sin^2 \theta$$
$$= 490 \sin^2 \theta \text{ cm}^{-1}$$

Particle threshold energies in MeV for the production of Cherenkov photons in media (Cherenkov radiators) of different index of refraction

Medium	Index of refraction (n)	Particle threshold energy in MeV ^a		
		Electron ^b	Muon ^c	Proton ^d
Air	1.00027712^{e}	21.2	4380.9	38925.9
Silica aerogelf	1.05	1.16	240.7	2139.0
Water	1.332	0.263	54.3	482.1
Glass ^g	1.47	0.186	38.5	341.9
Plastic ^h	1.52	0.167	34.6	307.6
Ceramic ⁱ	2.1	0.070	14.5	128.7
Diamond	2.4	0.051	10.6	93.9





大气的折射率随高度的变化:

产生切伦科夫光阈值随高度的变化:

Development of cosmic-ray air showers



 $n = 1 + 0.000283 \ \rho(h) / \rho(0)$







大气的折射率随高度的变化: n = 1 + 0.00

 $n = 1 + 0.000283 \ \rho(h) / \rho(0)$

产生切伦科夫光散射角随高度的变化: $\cos \theta = 1/\beta n$







EAS中的切伦科夫辐射(在地面上的分布)





Rm(m)

2000m a.s.l 观测平面上,不同能量的原初gamma光子产生的EAS中切伦科夫光子横向分布.



4400m a.s.l 观测平面上,不同能量的原初核子产生的EAS中切伦科夫光子横向分布.





二.WFCTA介绍

Wide Filed of view Cherenkov Telescope Array







1. 切伦科夫成像原理

- 一般的大气切伦科夫成像望远镜的关键部分即反射
 镜和光电器件组成的成像探测。
- 海拔越低位置的位置, Cherenkov 光的发射角越大。
- 望远镜的像反映了簇射的纵向发展。
- 通过分析切伦科夫像的特征,可以重建簇射极大位置(Xmax)、能量等。
- 切伦科夫光的波长主要在紫外波段,因此只能晴朗的夜晚工作。











2. WFCTA 构成系统

◆ 望远镜主体

¼海运集装箱(4.4m×3.26m×3.27m),便于移动和调整指向。

◆ 光收集系统

由镀铝球面镜组成,20面整镜4面半镜,接收面积5m²。 反射切伦科夫光子并聚焦至成像探头。

◆ 成像探头

由32×32的SiPM组成,将光信号转换为电信号; 每个SiPM前安装光收集器,增加对光子的手机效率; 单个像素0.5°,总视场16°×16°(PMT); 石英玻璃:用于对相机实行密闭,以阻止灰尘进入。

















◆ 电子学系统 信号处理与读出

◆ 电源系统

提供望远镜工作所需的各种电源 SiPM高压电源、电子学低压电源、散热系统······

◆ 慢控和监控系统

远程控制和检测,包括门开关、电源开关、温度、 高压、电流、天气、月亮位置……

◆ 标定系统

LED:对望远镜成像探头的标定。 激光标定:大气透明度检测。









3. WFCTA 物理目标



主要物理目标: 宇宙线分成分能谱的测量 与KM2A,WCDA联合观测,芯位,方向可以直接从KM2A,WCDA获取。 18台望远镜,分别指向不同的方向,形成连续的视场;有效的减少契伦科 夫光子的泄漏,大大提高有效视场的范围。

















2020-12-09 00:25 Sky IR Image (Tel No={1...} ,Ave Temp={-78.83,...} ,Min Temp={-80.90...})



2020-10至2021-05



1/2 LHAASO Layout: 2365 EDs + 578 MDs



2019-10至2020-05







- 2021-10至2022-05,除阵列位置外,观测与之前相同。用于观测宇宙线轻成分能谱!
- 2022-10至2023-05,在镜筒内添加遮光板,减
 小10PeV以上探测器的饱和效应。用于观测字
 宙线高能重成分能谱!



2023-10至2024-05,6台望远镜调整至进垂直
 观测,并拆除遮光板,降低分析阈能至百TeV
 以下。用于观测宇宙线低能分成分能谱!







为什么不同的望远镜指向可以测量不同能段的宇宙线?

根本原因在于不同指向测量到的簇射所经历的大气厚度不同!

- 望远镜仰角90°时,大气深度600 g/cm²,100TeV的质子簇射极 大在此附近;
- 望远镜仰角45°时,大气深度850 g/cm²,100PeV的质子簇射极 大在此附近;
- 而当我们想要测量铁核能谱时,也需要对簇射所经历的大气深度 进行考虑!

值得注意的是,切伦科夫成像测量需要Xmax在观测平面之上!









➡ /





4. WFCTA 数据处理流程







4. WFCTA 数据处理流程







4. WFCTA 数据处理流程



 ◆相对独立的触发系统和数据采集系统 WFCTA: ~150GB/night ~100files
 KM2A: ~0.5TB/night ~2000files
 WCDA: ~2TB/night ~2000files

◆ 同一小白兔时钟

先产生数据的时间索引,找到WFCTA事例触发时 间±5us内的KM2A、WCDA事例,形成符合索引, 根据符合索引重新组装联合观测事例。













. WFCTA标定

- 参考文献:
- LED标定文章: Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021 (2022) 165824
- 激光标定文章: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1057 (2023) 168759
- 星光标定望远镜指向文章: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1056 (2023) 168662





1. SiPM相机的绝对光子数标定

因为WFCTA的主要任务之一是对EAS的原初能量进行重建,那么得到SiPM相机所记录下来的总光子 数则至关重要。



- SiPM相机标定工作,即标定相机的光子测量系数:一个光子对应多少电子学ADCcount
- 重点, 难点: 精确、实时得到每个像素上的光子数, 18台×1024像素



- 用一个<mark>发光稳定</mark>的LED光照亮SiPM相机
- 用一个经过标定的标准探测器来测量SiPM相机每一处的LED光子数(扫描)







测量方案



标准探测器所测量到的LED光子在相机平面上的分布

绝对增益的获得:

LED光源在SiPM相机表面光分布规律: cos_{θ}^{m} 其中, θ 为扫描平面某一点到LED光源中心的角距 像素内收到的LED光子数N: $\rho_{LED_ch} \times A_{ch}$

$$F_{ph2S_ch} = \frac{S_{LED_ch}}{\rho_{LED_ch} \times A_{ch}} (ADCcount/ph)$$

ADC → 光子



绝对增益的实时标定

- SiPM相机性能(增益、光探测效率)受温度、背景光、工作电压影响;
- 以LED作为稳定标准光源,在WFCTA观测期间实时标定得到的相机光子测量系数F_{ph2S_ch},可以实时反映相 机性能变化、使切伦科夫光强度测量结果不受相机性能变化影响。
- WFCTA观测期间,LED光源以3Hz频率照射SiPM相机;
- WFCTA观测结束后,每30s对SiPM相机进行一次绝对增益的标定,计算SiPM相机单像素光子测量系数*F_{ph2S_ch}*







相机标定系数长时间稳定性变化

- 数据来源: 2021年2月1日至2021年4月17日——T02
- 数据筛选条件: 夜晚、关门、Camera平均标定系数



■ Camera光子测量系数随时间的变化主要来源于Camera温度效应, 0.19%/℃



- 通过一颗绝对标定的LED光源,实现了从石英玻璃到ADC输出信号的光子数的标定。
- 望远镜的反射镜的反射效率如何标定?
- 作为探测器一部分的大气,如何进行标定?





红外测温仪对天气状况做定性的监测







光子在大气中的散射和吸收

■ **瑞利散射**:当光子的波长大于大气分子的尺度时,大气分子对光子造成的散射。其传播系数是波长的函数

$$T_{Rayl}(\lambda) = exp(-\frac{I(\theta, h_1, h_2)}{x_R}(\frac{400nm}{\lambda})^4)$$

其中 $I(\theta, h_1, h_2)$ 是从 h_1 点传播到 h_2 点的大气厚度, $x_R = 2970g/cm^2$ 是波 长为 400nm 的光子发生瑞利散射的平均自由程。

■相位函数(散射角的分布): $1 + cos^2(\theta)$

■臭氧的吸收:

主要发生在大于 10km 的高空。在这个过程中基本所有波长小于 290nm 的光子都被臭氧层所吸收。



■气溶胶散射:光子在大气中传播时还受到与大小类似于光子波长的微尘的散射,称之为气溶胶散射。

$$N = N_{ph}e(-\frac{\lambda}{\lambda(h)})$$
 $\lambda(h) = \lambda_0 e^{(-\frac{h}{H_s})}$ Hs, 大气标高1.2km λ_0 : 地面上气溶胶的散射长度。

□ 相位函数(散射角分布)如左图。

大气中的气溶胶受天气影响大,变化快,对光子的散射和吸收产生较大的影响!







激光标定系统介绍



■ 氮分子激光标定站址:

- L2 (392 米)、L4 (567米) 与 L5 (1023米)
- 氮分子激光器, 波长337.1 nm

■ Nd:YAG激光标定站址:

- L1 (可移动式) 与 L3 (1023米)
- Nd:YAG激光光路, 波长355 nm





激光探测原理

- 激光的发射光强为I₀,经过LL距离的传播到达散射光子 开始进入望远镜视场,此时散射高度为h;
- 散射后的光子传播LT距离之后到达望远镜,经过反射 镜聚焦成像;

 $L(x_L, y_L, z_L)$

Plane

■ 望远镜接收到的光子数可以表达为:

 $I = I_0 e^{-\alpha \cdot ll} S(\delta) e^{-\alpha \cdot lt}$

α是消光系数

 $S(\delta)$ 是散射相函数

当没有气溶胶时,接受光子
 数可由瑞利散射计算。



West<-->East (°









- 通过没有气溶胶时测量的信号,可分析研究气溶胶的 衰减长度和散射角分布函数。
- 目前相关分析工作正在进行,有兴趣的老师同学加入!









- 2. 望远镜绝对能量的标定
 - 在最好的天气下进行,气溶胶散射可以忽略,只考虑瑞利散射! (难点)
 - 可算出到达望远镜门口的光子数,实现对望远镜绝对能量的标定;
 - 可标定不同望远镜的相对增益;
 - 测量气溶胶的性质, 比如气溶胶的衰减长度和散射角分布函数;
 - 监测WFCTA望远镜视场内的大气状况。







3. 望远镜的指向标定

■WFCTA的物理目标是宇宙线能谱的测量,而宇宙线基本是各向同性的,为什么要进行绝对指向的标定?

- 将KM2A, WCDA重建的方向, 芯位转到望远镜焦平面上需要望远镜的指向。
- 相邻望远镜视场的拼接需要望远镜的指向。
- 激光绝对能量标定, 要计算出到达望远镜门口的光子数, 需要望远镜的指向。



星星不仅会眨眼睛、会说话;还可以指引方向。










标定流程

- a) 找出峰值出现的时间, 并挑出孤立的星
- b) 在某个望远镜指向下, 将峰值转到赤道坐标系
- c) 构造chi2, $(\sum (x_{star} x_{sipm})^2 + (y_{star} y_{sipm})^2)$
- d) 使chi2最小的望远镜指向即为望远镜的真实指向

TD1星表, 274nm, 位置精度高 TD1 - TD1 Stellar Ultraviolet Fluxes Catalog (nasa.gov)

星表中星的位值采用J1950标准 需要将J1950 转化为J当晚



(a)

(b)



0.0002

0.1228

0.6

0.8



- 参与标定(拟合)的亮星个数越多, 标定结果越精确,指向精度<0.02°;
- 有上两图为使用20颗亮星拟合的精度, 下面两图为利用拟合指向计算其他73 颗亮星与其理论轨迹的差值。



(c)















- 参考文献:
- WFCTA连续视场及能量重建文章: Radiation Detection Technology and Methods (2022) 6:544-557

https://doi.org/10.1007/s41605-022-00342-4

• 能量重建文章: Liping Wang et.al., PHYSICAL REVIEW D 107, 043036 (2023)





1. 图像清理

清理噪声管子

- 信号大小——小于50(或者100等)光电子的像素清除;
- 时间窗——最亮的像素(探测到的Npe最多的像素)着火时间为准,在其前后 320 ns内着火的像素认为 是信号触发,不在这一时间窗口内的像素被清除

孤立的像素清理

- 找到最亮的像素,以此为中心向外遍历所有的着火像素,与成团着火的管子没有任何连接的像素将 被清理掉
- 相邻着火管子数大于N





2. 图像参数化

Hillas 参数大致可以分为三类:

A. 对像的形状和亮度进行表述的参数

- 大小 (Size):像中所包含的所有光子数
- 长度(LENGTH):光子沿像的长轴分布的RMS
- 宽度(WIDTH):光子沿像的短轴分布的RMS
- CONC(N): N 个最亮的管子中的光子数占总光子数的比例, 此量表征了像的紧密程度
- LEAKAGE: 像的最外圈的光子数占像中总光子数的比例



B. 依赖于所选参考点的参数(IACT: 伽马源的位值; WFCTA: 簇射的到达方向)

- Alpha: 簇射的轴线与像的重心和参考点之间连线的夹角(IACT中用此参数进行背景估计)
- DIST:参考点到像的重心之间的距离, 与到望远镜的距离, 与Xmax的位值相关

C. 依赖于参考方向的参数

δ: 簇射的轴线(即像的长轴)和 焦平面x 轴的夹角



- ◆ 芯位落在KM2A的联合观测事例
- LHAASO 坐标系 X (东) and Y (北)
- <u>蓝线</u>: WFCTA重建的Shower-Detector-Plane(SDP即像的长轴) 与地面的绞线;
- 粉线: 望远镜的位置与芯位的连线, 芯位 由KM2A重建获得;
- 蓝线和粉线重合。
- ◆该联合观测事例在WCDA的测量
 由于该事例是落在KM2A中,那么对于WCDA
 来讲属于芯外事例,因此WCDA重建芯位错
 误,蓝线和粉线不重合。



LHAASO - 高海拔宇宙後観測站









4. WFCTA连续视场的实现

- 完整切伦科夫像的观测是保证能量分辨率的基础
- 单台望远镜为了保证对奇伦科夫像的完整观测,需要牺牲视场+-5°以外的视场,损失实验的有效面积
- 多台望远镜组成的连续视场能够保证对切伦科夫像的完整观测。





iEvent:14 iUse:15 MainTel:1 Rp:128.98 (m) Xmax:563.875



iEvent:14 iUse:15 MainTel:1 Rp:128.98 (m) Xmax:563.875



- 选取主望远镜:最亮的管子所在的望远镜为主望远镜
- 根据望远镜的指向,将次望远镜的管子转到主望远镜的焦平面上。
- 重叠部分区域的SiPM权重为Npe/2, 非重叠部分区域的SiPM权重为Npe











通过连续视场的实现,统计量可增加30%!







5. WFCTA能量重建

Size 与 簇射的原初能量相关,但是有Rp的依赖, 需进行Rp的修正。



此外,利用切伦科夫光子和缪子测量信息可以进行成分弱依赖的能量重建! 在此不做介绍。











◆ 对于质子成分,利用切伦科夫像重建的能量偏差在±2%以内,分辨率为16%@>1PeV

◆ 望远镜阵列连续视场的实现并不影响WFCTA的能量重建!







Rp 对能量分辨率的影响

◆ Rp是望远镜到簇射轴心的距离,但簇射的芯位和方向是由KM2A/WCDA重建获得的,因此地面 阵列的芯位和方向精度会影响Rp的精度。







五. WFCTA与KM2A、WCDA的

联合观测数据







1. 数据符合流程

- ◆相对独立的触发系统和数据采集系统 WFCTA: ~150GB/night ~100files
 KM2A: ~0.5TB/night ~2000files
 WCDA: ~2TB/night
 - ~2000files



- ◆ 使用索引(Index)可以压缩符合时读取数据量,减小 作业所需的内存和带宽。
- ◆根据索引检测KM2A和WCDA的原初事例率,判断探测器是否正常工作。











ES.42507.FULL.WFCTA06.20200211001749.014.event.root

ES.42507.FULL.WFCTA06.20200211001749.014.merge.root

ES.42507.FULL.WFCTA06.20200211001749.014.cal.root

ES.42507.FULL.WFCTA06.20200211001749.014.rec.root





2. WFCTA数据格式变化



◆ 符合数据(WFCTA, KM2A, WCDA解析数据):

- 包含4个表征符合标记和符合时间差变量
- 主要是3个探测器阵列的原初信息,例如WFCTA的高、低增益通道的ADC Count











可用于能谱分析!

2. WFCTA数据格式变化



- ◆ 重建数据(WFCTA, KM2A, WCDA解析数据):
- 包含4个表征符合标记和符合时间差变量
- 主要是3个探测器阵列的原初信息,例如WFCTA的高、低增益通道的ADC Count
- 数据路径: /eos/lhaaso/rec/wfcta_merge/merge_wcda_km2a/V6.3
- /workfs2/lhaaso/wfctarec/Public_Lib/software/Read/Read.cc



- 利用WCDA的重建几何进行计算的 WFCTA相关信息
- 利用KM2A的重建几何进行计算的 WFCTA相关信息
- WCDA 重建信息;
- KM2A 重建信息;
- 三个子阵列的着火信号,用于画事例靶 图或二次重建。





六.WFCTA的数据事例挑选







WFCTA的运行环境

• 云天仪的红外亮温





12 :status

: vector<float>

• 月亮与望远镜的夹角



hybrid event status, including: Whether WFCTA open the door. 1 Yes, 0 no [0] Whether temperature of WFCTA LED is stable. 1 Yes, 0 no [1] [2] Whether DAQ of WFCTA is stable. 1 Yes, 0 no Infrared brightness temperature by infrared camera 1# [3] Moon Phase. 100: full moon, 50: half moon. [4] [5] The angle between moon and telescope's main axis. The elevation of the moon in the horizontal coordinate. [6] High voltage current of telescope (Ampere) [7] High voltage of telescope (Volt) [8] Atmospheric temperature by infrared camera 1# [9] [10] Atmospheric temperature by meteorological tower [11] Atmospheric humidity by meteorological tower [12] wind speed by meteorological tower [13] Infrared brightness temperature by infrared camera 2# [14] Atmospheric temperature by infrared camera 2# [15] WCDA event rate, 1 Normal, 0 no [16] KM2A event rate, 1 Normal, 0 no [17] KM2A good list, 1 Yes, 0 no 不同的环境(例如背景光大小) 会造成分

析的阈能不同! 因此,对于不同的分析需求使用不同的 筛选条件!





■ 望远镜的运行环境和状态挑选

- 云天仪 (<-65)
- DAQ
- 开关门
- 月亮与望远镜夹角 (>30°)
- 高压电压>75V
- 高压电流<1.5A







检查什么? 判断标准是什么?

- ➢ 宇宙线能谱或分成分能谱 $flux = \frac{dN}{dEdAd\Omega dt} = \frac{N_{bin}}{E_{bin} * Apter * t}$
 - 事例率
 - 能量→WFCTA的Size大小
 - Aperture→方向和芯位
 - 成分→C像的长宽比,既包含成分信息,又包含几何信息
 - 数据符合的效率和符合时间窗

▶ 望远镜的运行环境和状态

- 云天仪 (<-65)
- DAQ
- 开关门
- 月亮与望远镜夹角(>30°)或者完全无月
- 高压电压>75V
- 高压电流<1.5A
- KM2A好数据列表
- WCDA事例率稳定

数据质量检查

- 1. 事例率
- 2. WFCTA的Size谱指数
- 3. WFCTA的Size阈值
- 4. WFCTA像的Length/Width
- 5. KM2A符合时间
- 6. WCDA符合时间
- 7. KM2A的符合效率
- 8. WCDA的符合效率

9. KM2A重建天顶角 10. WCDA重建天顶角



数据挑选条件

- 切伦科夫像的挑选条:
 单道阈能: 100Pe
 Npix>10
 像的重心在±6°以内
- KM2A挑选条: NpE2>20 芯位如下





.....



h2

Entries Near

Std Dev

x² (edd)

p0

6409

3.775

0.2952

10.42/47

-1.994 1 0.057

1.176e+10 3 6.343e+09

log10(DSize)

107

事例数统计









- 一. EAS中的切伦科夫辐射
- 二.WFCTA介绍
- 三.WFCTA的数据标定
- 四.WFCTA的数据重建

Email: <u>yinlq@ihep.ac.cn</u> Tel: +86 13261553907

五.WFCTA与KM2A、WCDA的联合观测数据

六.WFCTA的数据事例挑选







LHAASO的大气监测系统














































cloud<-65 moon_angle>30

Npix>10 |MeanXY|<6

Etrig>20 NpE1>15 NuM3>15 log10(NpE1/pow(NhitE,1.7))>-2.2

能量重建公式:

log10(rho40_200_e+150*rho40_200_u)+5.24;

右图为202210-202306观测季数据

