

火眼辣叟

——高海拔宇宙线观测站 (LHAASO) 首批科学成果发表

刘四明

(西南交通大学 611756; 中国科学院紫金山天文台 210023)



图1 LHAASO 位于稻城基地的石碑

高海拔宇宙线观测站是我国“十二五”期间批准立项的国家重大科技基础设施。英文名字为 Large High Altitude Air Shower Observatory, 缩写 LHAASO, 读音为辣叟。Air Shower 是高能粒子(宇宙线)在大气层中诱发的一场以接近真空中的光速传播的高能粒子“雨”。当宇宙线垂直于地面传播时,这场“雨”可以在几平方千米的范围内仅仅持续几纳秒,犹如“一堵火墙”。LHAASO 主要用来探测这场雨的“雨滴”也就是各种粒子的性质和传播特征,进而

获得诱发这场粒子雨的高能粒子的性质。我们通常看到的火光都是由高能粒子产生的,高能粒子“雨”中粒子的平均能量比产生火光的粒子能量要高很多,因此可以认为 LHAASO 就是用来探测宇宙线诱发的“一堵在大气中高速传播的火墙”。考虑到近些年我国已经建成了世界上最大口径的“天眼”射电望远镜,发射了“慧眼”X 射线卫星。我这里把 LHAASO 称作“火眼”,全称“火眼辣叟”,也就是这篇文章题目的由来。下面我们会看到,这颗“火眼”还有“金睛”,在探测宇宙线和高能伽马射线上功能强大!

LHAASO 主要包含 4 种探测手段:在 1 平方千米的范围内均匀分布着 5195 个电磁粒子探测器和 1188 个缪子探测器,简称 KM2A(kilometer square array)阵列;7.8 万平方米的包含 3120 个探测器单元的水切仑科夫探测器阵列,简称 WCDA(Water Cherenkov Detector Array);和广角切仑科夫与荧光望远镜,简称 WFCTA(Wide Field Cherenkov Telescope Array)。通过这 4 种探测器阵列的联合观测, LHAASO 在超高能伽马射线探测灵敏度、甚高能伽马射线巡天灵敏度、宇宙线能谱覆盖范围和宇宙线成分识别的精确度方面均已达到国际领先水平。

自从 2017 年中期开始建设以来, KM2A 已经建成 3/4 阵列并投入运行。WCDA 由 3 个大水池组成,都已经投入常规科学运行。WFCTA 的 18 台望远镜也进入常规切仑科夫光观测运行模式。这些



图2 LHAASO站点远景

部分完成的探测阵列在超高能伽马射线观测上已经取得了重大突破,本文将简单介绍对KM2A一半阵列从2019年12月27日起,308.33有效天观测数据分析得到的初步结果。

人类对宇宙太空的认识主要是通过收集各种电磁波信号来实现的。可见光因为容易被人的肉眼感知而成为人们最熟悉的电磁波,它们不同的颜色对应于电磁波不同的频率。图3给出了电磁波的频率和波长的对应关系,在真空中电磁波的运动速度就是光速,所以其波长和频率成反比。

电磁波和我们的生活息息相关。在上面频谱

的最右端,频率为零的电磁波对应于我们熟悉的直流电,而日常生活用到的交流电就是通过频率为50赫兹(Hz频率单位:波动每秒钟震荡一个周期对应于1赫兹)的电磁波沿着输电线传播来实现能量传输的。在兆(百万)赫兹,我们有收音机的中波通信。调频信号通常通过几亿赫兹的电磁波来传输。我国的天眼望远镜主要工作在几十亿赫兹的频段。太赫兹(10^{12} Hz)频段对应于微波炉的工作频率,在这个频率人们也探测到了来自宇宙空间的非常均匀的微波背景辐射。这一发现为现代宇宙学的诞生奠定了观测基础(广义相对论为其提供了相

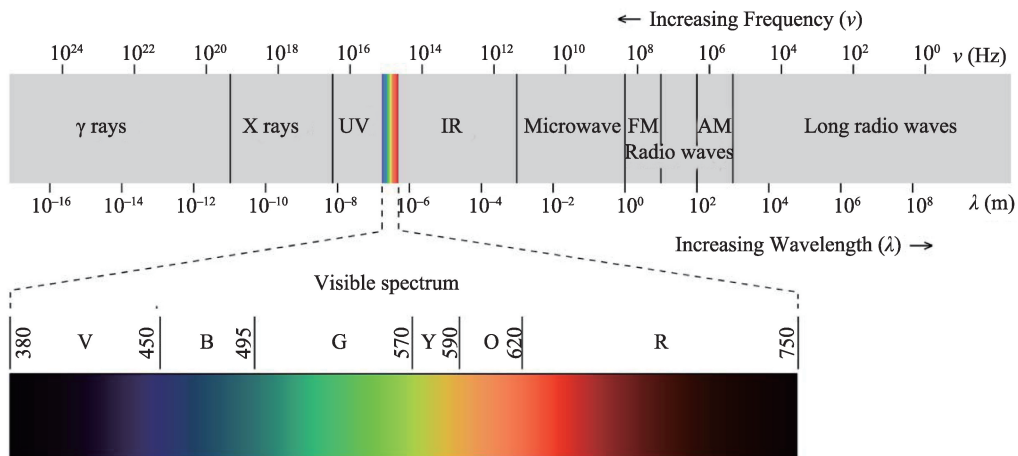


图3 电磁波的频率和波长的对应关系(图片来源: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation)

应的理论分析工具)。

任何有能量的物质都可以辐射电磁波,我们通常用温度来衡量各种物体携带能量的高低。微波背景辐射对应的宇宙空间的温度大约是摄氏零下270度。虽然这一辐射在空旷的宇宙空间比其他频率的辐射要强很多,它本身还是非常微弱的。人体的温度在36摄氏度左右,人体表面电磁波的能量密度要比宇宙空间高近9个数量级!其电磁波的特征频率也要比微波背景高两个数量级,对应于天文学的红外波段(10^{14} Hz)。

太阳的温度高达5千多摄氏度,它的辐射主要在可见光波段呈现。从红到紫电磁波的频率逐渐升高。更高的频段(10^{16} Hz)对应于紫外线,可以用来杀菌消毒,也可以造成皮肤烧伤。频率再提高两个数量级(10^{18} Hz),我们就进入了X射线频段,它在医学上被广泛用来做胸透和大脑扫描等。我国的慧眼空间天文望远镜就是工作在这个频段。

电磁波是由光子组成的,随着频率的增加,光子的能量也成比例地增加,通常情况下光子的数目也会减少。在X射线频率以上人们通常用光子的能量代替频率来描述电磁波的性质。X射线能段光子的能量为几千电子伏(eV,一个电子穿越一个伏特的电压时获得的动能),能量超过几十万电子伏的光子被称作伽马射线。能量再往上延伸,这样的伽马射线光子会更少见,我们通常用它们的能量对其做区分。暗物质粒子探测卫星悟空号就可以探测能量高达几十亿电子伏($1\text{ GeV}=10^9\text{ eV}$)的光子。

图4给出了美国Fermi伽马射线卫星通过五年观测得到的能量在1 GeV以上的伽马射线光子在

全天空的分布以及已经认证的部分超新星遗迹(a)和脉冲星(b)。图中一半以上的点源是非常活跃的类型星体,还有一部分是活动星系(核),它们的空间分布各向同性。分布在银盘上的伽马射线源主要是脉冲星和超新星遗迹。

能量比较低的伽马射线穿越探测器时可以产生各种电磁信号进而被探测到。随着伽马射线能量的增加,它的穿透能力也相应增强。人类制造的最大伽马射线探测器能够直接测量的光子的最大能量大约是1万亿电子伏($\text{TeV}=10^{12}\text{ eV}$),这已经超出了图3显示的频率范围。这些能量以及更高能的伽马光子从宇宙空间进入大气层时会和大气层中的气体作用产生各种次级粒子。这些粒子的能量很高,在大气中的运动速度比电磁波的速度还要快进而产生切伦科夫光。它们对大气分子的电离和激发也可以产生荧光。所有这些过程都在一个厚度只有几米(图5)、宽度可达几千米的平面里完成,并且整个平面以超光速接近地面,这就是所谓的大气簇射。我们可以把这个平面想象成一堵火墙。日常生活中我们时不时的都会被这些火墙扫过,在我们的身体中产生一定的辐射剂量。由于这些火墙中的高能粒子密度比较低,并且火墙以光速运动,我们无法感知火墙的存在。但是利用高灵敏度的探测器,我们还是可以捕获这些火墙。辣斐的火眼金睛就是一个例子。

在大气中传播时,火墙的宽度逐渐增加。并且随着入射光子能量的增加,这个火墙的宽度也会增加。除了高能伽马射线,高能宇宙线(主要是各种原子核和少量电子)也可以产生大气簇射。但是不

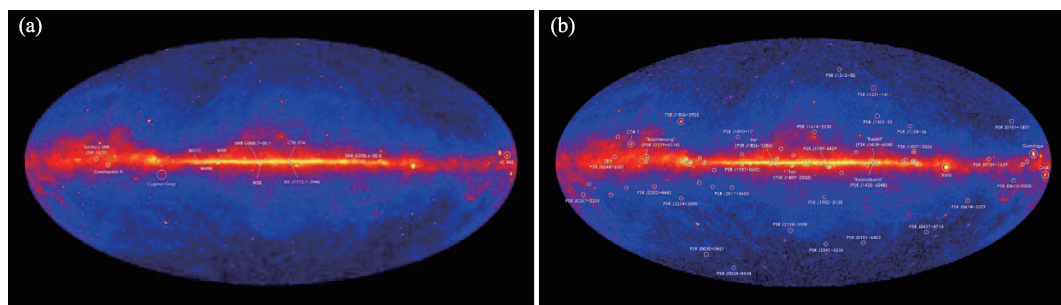


图4 Fermi伽马射线卫星的全天空成像中的一些超新星遗迹(a)和脉冲星(b)(图片来源: <https://svs.gsfc.nasa.gov/11342>)

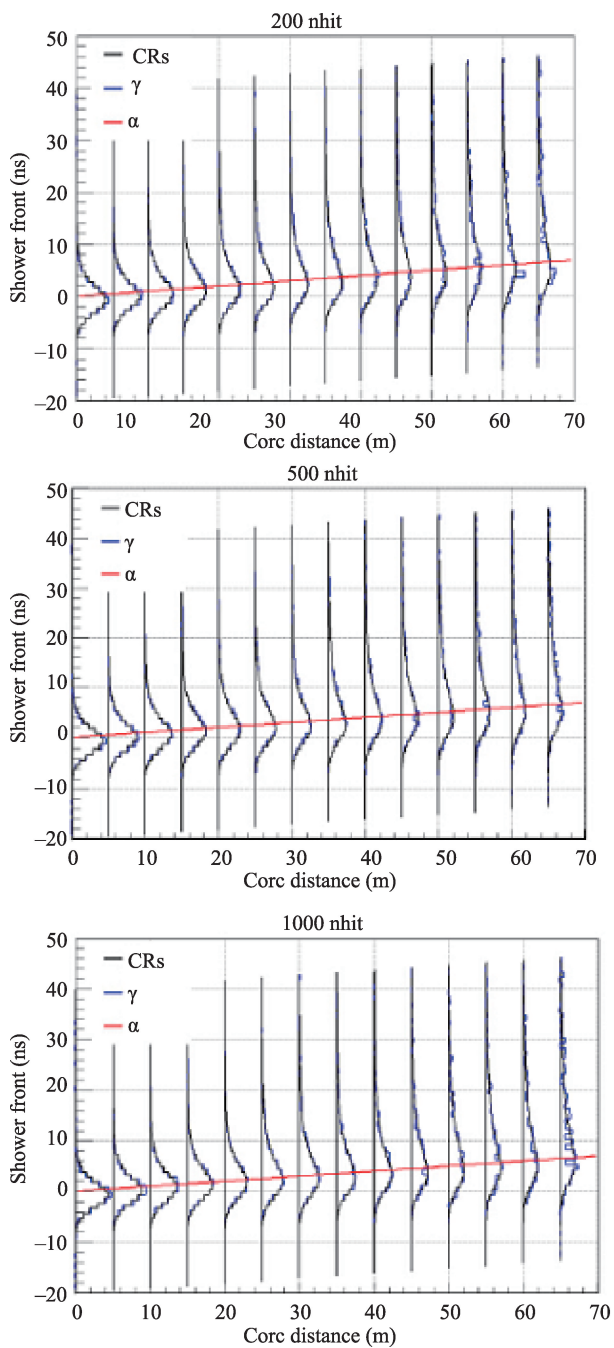


图5 火墙透视图:探测器激发数随时间(纵轴)和簇射中心的距离(横轴)的变化。蓝线对应于伽马射线,黑线对应于宇宙线。

从上到下能量逐渐增加。纵轴时间乘以光速就给出不同距离处火墙厚度^①

同种类的高能粒子产生的簇射的性质不同,我们可以在地面上收集这些簇射中的次级粒子,进而间接探测原初高能粒子的性质。图6显示的就是这一簇射过程的示意图以及LHAASO在地面上布置的各种探测器对它进行的测量。

通过对这种簇射持续近5年的观测,位于我国羊八井的AS_γ实验于2019首次报道了来自蟹状星云的能量在100 TeV(10^{14} 电子伏特)以上的伽马射线^②。在此之前的很多实验,人们探测到的主要是宇宙线产生的簇射。这主要是因为TeV能段和宇宙线的流量相比,伽马射线的平均流量要低至少3个数量级(图7)。即使在蟹状星云这个最亮的伽马射线天体方向,100 TeV以上的宇宙线的平均流量也要比伽马射线高4千倍!因此大气中产生的簇射大部分是由宇宙线产生的。要把这些数量极其稀少的伽马射线产生的簇射从宇宙线产生的簇射背景中鉴别出来,人们发展了一种特殊的探测手段。

图8显示AS_γ实验主要由两种探测器组成。地面上在一个6万平方米的范围内安装了近600个塑料闪烁体探测器,它们主要用来收集簇射中的电磁信号,如正负电子、伽马光子等。在地下3千多平方米的范围内安装了64个水切伦科夫光探测器用来收集簇射中缪子产生的信号。因为缪子的穿透本领比电子高很多,它们可以穿透探测器上面的土壤在地下被探测到。宇宙线产生的缪子要比相同能量的伽马光子产生的缪子多很多。利用这两种探测器中收集到的信号的强度之比,人们就可以更好地把伽马射线产生的簇射甄别出来,这就是所谓的“金睛”。

和AS_γ相比,美国建造的水切伦科夫探测器HAWC因为缺少这颗金睛,其光子的鉴别能力要差很多。图9显示了HAWC的高空照片,它的探测器都分布在地表,无法区分探测到的粒子是否有缪子。

图10给出了它对宇宙线和伽马射线的响应。可以看出,它主要是利用簇射在探测器中的分布特征来区分宇宙线和伽马射线的。宇宙线产生的簇射分布比较弥散而伽马射线的簇射比较集中。如果把宇宙线和伽马射线的鉴别比做人的性别区分的话,可以看出HAWC主要是通过体型来判断男女的,而AS_γ采用的探测方法相当于DNA鉴别。

高海拔宇宙线观测站(LHAASO,辣叟)采用了类似于AS_γ实验中的探测技术,在1平方千米的范

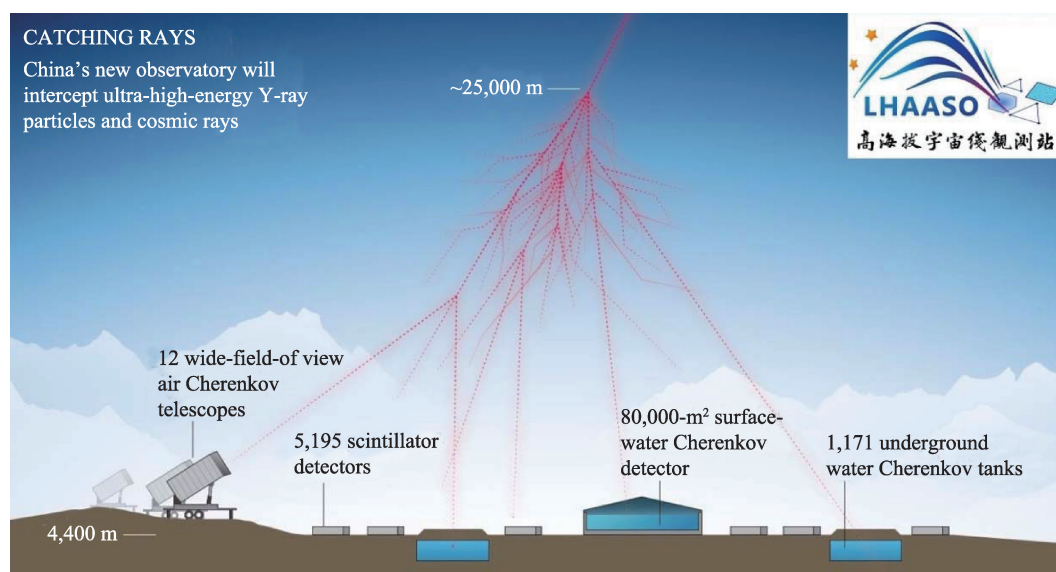


图6 高能粒子产生大气簇射以及辣叟的各种探测器对簇射观测的示意图
(引自英国《自然》杂志, *Nature* 543, 300-301 (16 March 2017) doi: 10.1038/543300a.)

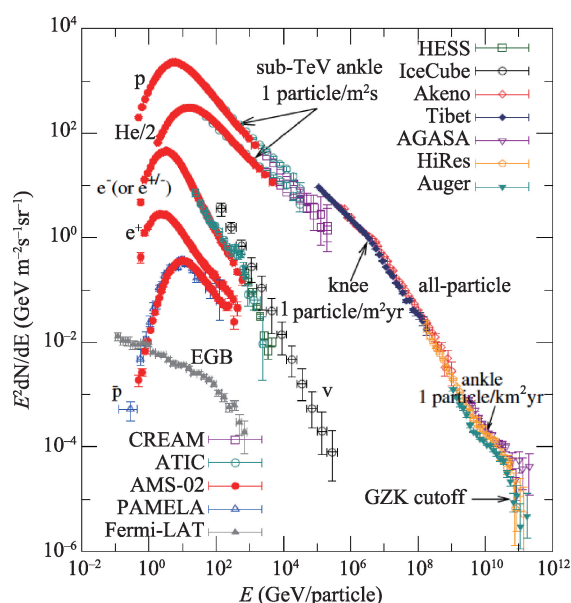


图7 宇宙线流量密度随宇宙线能量的变化

围内布局了电磁信号和缪子探测器,这就是所谓的平方千米阵列(KM2A)。和AS_γ相比,其电磁信号的收集面积提高了20多倍,缪子的探测面积提高了400多倍。这个面积的提高不仅显著地提高了探测效率,还把对伽马射线的观测延伸到PeV(10^{15} eV)能区!这主要是因为高能伽马射线出现的概率随着其能量的升高迅速降低。对于蟹状星云这样最亮的伽马射线源,大约在每平方千米上一年也就能

够接收到一个1 PeV的伽马射线事例,所以只有达到辣叟这样的规模,才有可能记录到1 PeV以上的伽马射线。另外高能粒子产生的簇射的宽度随着能量的增加而增加。几十TeV高能粒子产生的簇射已经分布在上万平方米的范围了(图8、图10),能量达到PeV时,簇射产生的大部分信号将落在这些小探测器的阵列之外从而使得原初粒子的鉴别和能量测量变得很困难。在超高能伽马射线观测上,把KM2A称为火眼金睛当之无愧。

虽然KM2A阵列在2020年初才安装完成了一半,但是到目前为止,它已经探测到80多个来自蟹状星云的能量在100 TeV以上的类光子事例,这接近于AS_γ近5年的探测数量的4倍。更重要的是, KM2A还探测到一个能量大约1 PeV的类光子事例。图12(a)显示,这个事例同时触发了辣叟的3个正在运行的探测阵列。其能量测量精度可达10%,和蟹状星云无关的可能性小于两千万分之一!同时辣叟还探测到十余个辐射能量超过100 TeV的伽马射线天体源!

火眼辣叟的核心科学目标之一是回答宇宙线的起源问题。虽然宇宙线在100多年前就已经被发现,并且在80多年前人们就提出了宇宙线可能主要

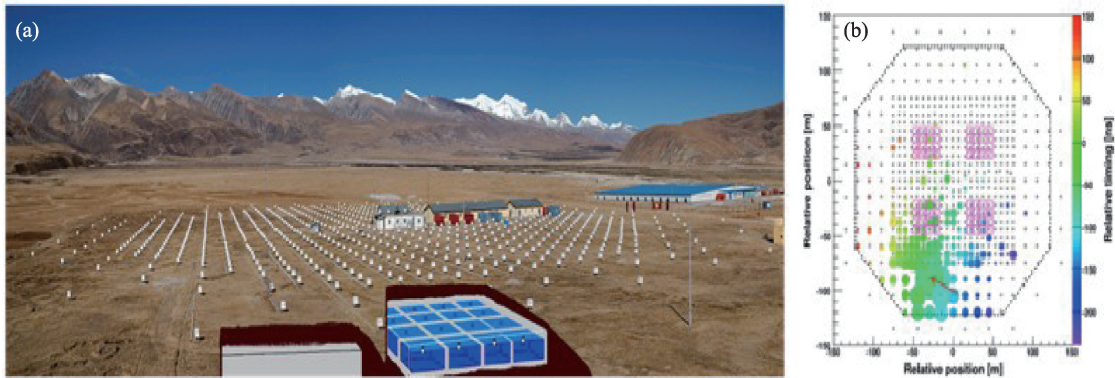


图8 羊八井 AS, 宇宙线实验的探测器布局(a); AS探测到的极高能类伽马光子信号(b)



图9 位于墨西哥的主要由美国政府资助建设的水切伦科夫光探测器 HAWC

来自超新星遗迹的学说^③,但是直到过去十几年伴随着伽马射线天文的发展和宇宙线能谱测量方面取得的显著进展,人们才逐步意识到 GeV 的宇宙线主要来自于超新星遗迹演化晚期的激波粒子加速

过程而 TeV 宇宙线可能主要来自于年轻的超新星遗迹^{④⑤}。需要指出的是,直到今天,我们还没有发现超新星遗迹激波加速可以产生 PeV 宇宙线的直接证据。而火眼辣叟的最新观测表明,超高能伽马射线似乎和脉冲星风云有密切的联系。这就意味着 PeV 宇宙线可能主要来自于脉冲星风云这一相对论性高能天体中的持续粒子加速过程^⑥(蟹状星云是最著名的一个)。在产生脉冲星风云的中子星诞生初期,PeV 的宇宙线也可能在脉冲星风云与其超新星遗迹激波的复杂相互作用过程中被有效地加速^⑦。在火眼辣叟正式投入运行的几年内,把其超高能伽马射线观测与宇宙线观测相结合,我们有望在 PeV 宇宙线起源问题上取得重大突破。

如果把 AS 和 HAWC 对百 TeV 伽马射线的观测比做超高能伽马天文学的敲门砖的话,火眼辣叟不

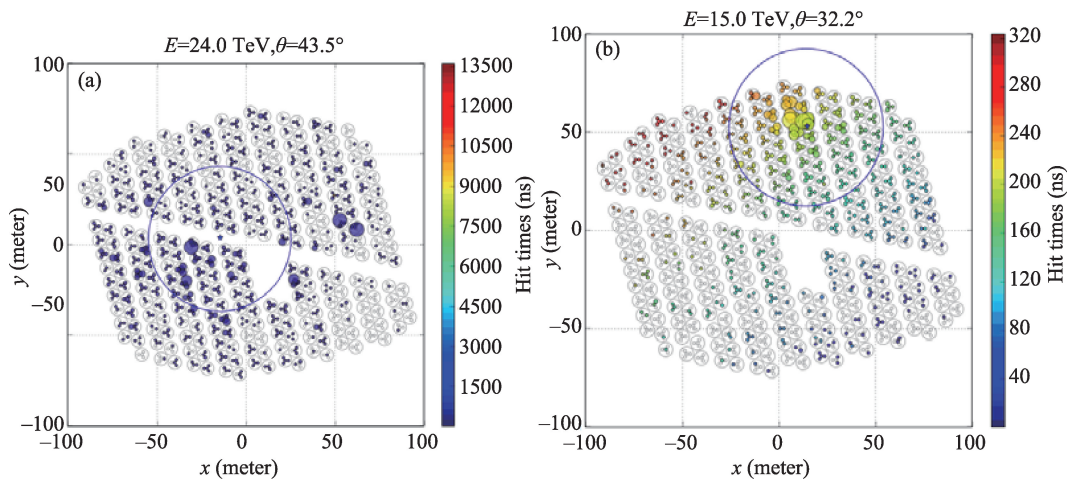


图10 模拟产生的 HAWC 对宇宙线(a)和光子的响应(b)。大圆圈给出簇射中心区域

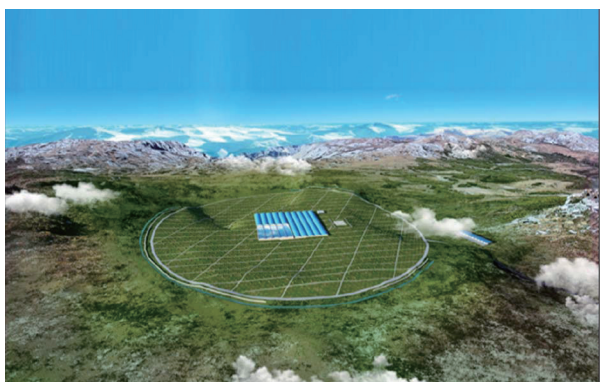


图 11 由分布在 1 平方公里范围的各种探测器组成的高海拔宇宙线观测站(LHAASO)的远景示意图

仅将成为超高能伽马射线天文的方天画戟,而且等到明年全部阵列建成,它将发现上百个超高能伽马射线源,并将详细测量它们能量达到数 PeV 甚至于 10 PeV 的超高能能谱特征,开启超高能伽马天文学这一新的科学分支。结合辣叟同时进行的对能量高达 1 EeV(10^{18} eV)的带电宇宙线能谱的精确测量,

势必对其起源得到更加确定的实验证据。超高能伽马天文是伽马天文(GeV)和甚高能伽马天文(TeV)向高能端的自然延伸。在 GeV 和 TeV 能段我们还能够探测到来自河外高能源的辐射。在 PeV 能段,河外源产生的光子将在传播过程中和微波背景辐射相互作用产生正负电子对(图 7 的宇宙线能谱在 70 EeV 处流量随能量增加的快速下降,也是由于极高能宇宙线和微波背景辐射的相互作用)而消失在飞向地球上的观测者的漫漫长路上。我们预期只有极高能宇宙线(EeV)在银河系中轰击原子核可以产生少量 PeV 伽马射线。因此我们真正走到了电磁波探测的尽头!辣叟开启了整个电磁波谱上最后的一个观测波段,即超高能伽马射线波段,当然这个尽头也是我们当今知识的尽头,一旦辣叟观测到任何反常信号,都将为我们开辟一个全新的探索空间!

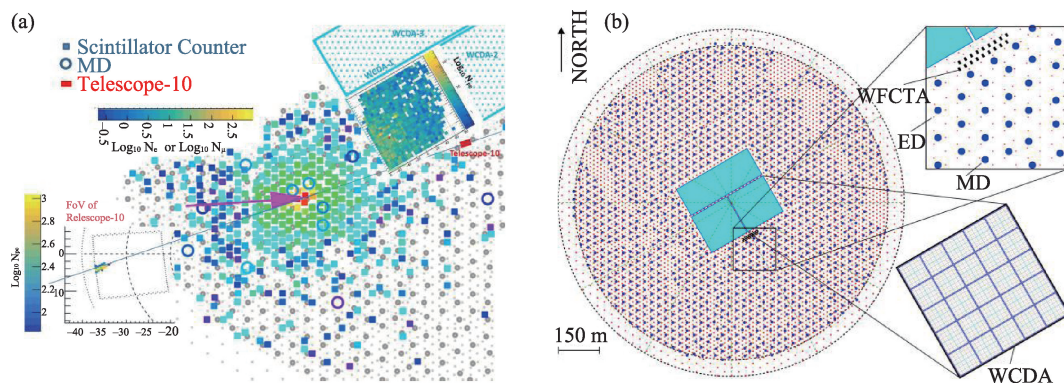


图 12 辣叟探测到的一个来自蟹状星云方向的 PeV 类光子事例(a);建成后探测器的布局(b)

参考文献

- ① 田珍, 利用 ARGO-YBJ 数据对宇宙线锋面研究与 LHAASO KM2A 阵列伽马质子鉴别能力预研, 中国科学院研究生院, 博士学位论文, 2018
- ② AS, collaboration, First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source, PRL, 2019, 123: 051101
- ③ Baade W, Zwicky F. Cosmic rays from super-novae. Astronomy, 1934, 20:259.
- ④ Zhang YR, Liu SM, Yuan Q. Anomalous Distributions of Primary Cosmic Rays as Evidence for Time-dependent Particle Acceleration in Supernova Remnants. ApJ, 2017, 844:L3
- ⑤ Zeng HD, Xin YL, Liu SM. Evolution of High-energy Particle Distribution in Supernova Remnants. ApJ, 2019, 874:50
- ⑥ Yuan Q. et al. A Statistical Model for the Gamma-RAY Variability of the Crab Nebula. Apj, 2011, 730:L15
- ⑦ Ohira Y, Kisaka S, Yamazaki R. Pulsar Wind Nebulae inside Supernova Remnants as Cosmic-Ray PeVatrons. MNRAS, 2018, 478: 926