

关于LHAASO发现PeV粒子的问答 ——F. Aharonian教授谈 LHAASO观测结果

F. Aharonian^{1*} 著 曹臻² 译

(1. 德国马普核物理研究所/都柏林高等研究所; 2. 中国科学院高能物理研究所 100049)

什么是宇宙线? 宇宙线的起源被称为世纪之谜, 其科学意义是什么?

著名的宇宙线物理学家布如诺·罗西把宇宙线描述为“稳定持续不断的带电粒子雨, 以近乎光的速度落到地球上, 每时每刻来自所有方向”。更准确一点: 宇宙线是发源于太阳系外的相对论性粒子——质子、原子核、电子。

这个称之为“宇宙线天体物理学”领域的核心问题曾经是并继续是寻找加速这些粒子至相对论性高能量的潜在天体。由于混乱的星际和星系际磁场对带电的粒子的折射效应, 它们出发地的方向信息已经彻底丢失了, 在地球上, 我们就探测到(几乎)各向同性的宇宙线强度, 而它们可能是来自于大量的银河内甚至于银河系外的源。这些源天体有着不同的起源机制并且可以用完全不同的物理参数来描述, 诸如能量分配平衡表、时间历史、加速机制等。这项任务, 就好比用如熬了上百万年的“一锅粥”一般的混乱现象的少量观测事实(能谱、成分和对各向同性的微小偏离)来寻找它们的源头, 如果不是完全的无望, 至少也是一个巨大的挑战。

伽马射线相较于宇宙线中的其他粒子, 有什么探测方面的优势和特殊意义?

只有中性和稳定的粒子能提供宇宙线加速

器位置的信息。幸运的是, 大自然对我们是仁慈的, 提供了这种粒子——伽马射线(“相对论性”光子)和中微子。两种粒子都能在宇宙线加速器的内部或者它的周围通过宇宙线与周边的物质的相互作用有效地产生, 因此就携带了关于这些宇宙线“工厂”位置的唯一信息。

更重要的是, 因为从粒子物理和量子电动力学我们知道关于伽马射线和中微子产生几乎所有的细节, 因此基于测量到的伽马射线和中微子的能谱和时间信息, 我们可以重建出这些加速器的许多详细特征。

作为高能现象的信使, 中微子的作用与伽马射线是类似的, 但也有本质上的差别。中微子只在强相互作用过程中(译者: 的次级强子衰变中)产生, 同时, 与伽马射线不同的是, 中微子只与周围的物质、磁场和辐射场发生非常微弱的相互作用。因此, 它们携带了高能过程发生的某些“隐秘”区域的信息, 而这些区域对于伽马射线而言是不透明的。

超高能伽马天文窗口的科学意义和重要性是什么?

在过去的20年里, 我们见证了伽马天文革命性的进展。伽马射线的能量范围从低能(或者叫 MeV; 1MeV=1兆电子伏特)和高能(或者叫 GeV; 1GeV=1京电子伏特)能区到甚高能(或者叫 TeV;

*德国马普核物理研究所/都柏林高等研究所教授, 国际著名天体物理学家

1TeV=1 太电子伏特)和超高能(或者叫 PeV; 1PeV=1 拍电子伏特)能区的跃变。对伽马射线的研究需要特别设计的探测器来精确地测量它们的到达方向和能量。低能和高能区是用空间探测器,而用地基的探测装置能够有效地开展甚高能和超高能区的探测。

当下,我们关于 MeV/GeV 伽马天文的知识,主要来自于 Fermi 卫星的 LAT(译者:大面积望远镜)的测量结果。用所谓对产生追踪技术,在卫星发射前最乐观的预期也得到了证实,即发现数千伽马射线源。

令人更加印象深刻的是在 TeV 能区取得的成功。拜 HESS、MAGIC 和 VERITAS 实验采用的立体成像空气切伦科夫望远镜(IACT)技术所赐,这个领域迅速发展成为符合正规的天文学标准的观测。过去的 10~15 年的观测已经产生了许多重要的发现,而这项技术的发展离其饱和状态还相去甚远。作为下一代伽马射线探测器,切伦科夫望远镜阵列(CTA)的设计,正是冲着再提高探测灵敏度 10 倍和扩展到从 10 GeV 到 100 TeV 的能量覆盖度这一雄心勃勃的计划而来的。IACT 阵列用来探测点状或者轻度扩展的伽马射线源。

另一方面,IACT 阵列技术在搜寻延展的结构和孤立的或者暂现的伽马射线现象存在局限性。在这方面,基于直接测量广延空气簇射(EAS)中次级粒子的阵列探测技术,就是一种互补的探测方法,比如(译者:西藏羊八井的)ARGO(译者:ARGO-YBJ)、(译者:AS γ)和水切伦科夫探测器 HAWC 等实验。这种技术可以延申到 100TeV 以上的能区。LHAASO 的观测结果,令人信服地展现了这项技术的潜力,并且打开了宇宙电磁能谱上新的超高能(UHE)窗口。

开启一个新的天文窗口的标志是什么? LHAASO 又是如何打开超高能伽马天文这一最高能量的天文窗口的?

两个事实说明了 LHAASO 巨大的成功:

(1)集巨大探测面积、超强伽马/质子区分能力、很好的能量分辨率和适度的角度分辨率于一身的独特性能。其巨大的探测面积(1平方公里)满足伽马光子对统计性的需求,独特的背景宇宙线质子和核的排除能力(万分之一到十万分之一剩余率),结合不错的能量分辨率(<20%)适度的角度分辨率(0.2°到 0.3°),足以在 UHE 能区(>100TeV)开展深度的形态学和谱学研究。

(2)大量存在的 UHE 伽马射线源,展现了其天文学类型多样性。

上述要点中的第一条是长期广泛地期待的,LHAASO 的超级规模是实现这些性能的目标之使然,而获得的成果证实了当初的主要设计理念之合理性。相反,第二条,即大量的存在性是一个巨大的出乎意料的惊喜。这些 UHE 伽马射线源的发现,意味着伽马射线产生区域的内部或周围存在着粒子的拍伏加速器(无论是对电子还是质子)。惊喜的另一面,却是对现有理论严重的挑战:这些粒子加速器是何以能够(译者:在如此极端的条件下)运行(见下面的详细讨论)。可以先把理论所面临的问题放在一边,即如何把粒子加速到高达 PeV 的能量,LHAASO 的结果告诉我们:银河系到处都是这些近乎完美地设计出来的“天然”粒子加速器。

LHAASO 探测到的最高能量的伽马射线,有什么特殊意义?

利用部分完成的 LHAASO 探测器和不到一年的曝光量,就成打地发现了这些 UHE 伽马射线源,意味着银河系内部大量存在着拍伏加速器,这的确是一个巨大的惊喜。0.1PeV 的光子只能由 PeV 的父辈粒子产生,无论是质子通过 p-p 强相互作用,还是电子通过逆康普顿散射,这些粒子如何被加速到 PeV,都是巨大的挑战。在流行的理论框架内,问题在于银河系内的质子只能在年轻的超新星遗迹、或者是超亮的年轻巨质量恒星(1 万到 10 万倍太阳亮度)之间相互碰撞的星风才有可能被加速到 PeV 的能量。而且,两者都要求我们把理论模型中的关键

参数设为极端(几乎不真实)状态(比如所谓波姆极限扩散、磁场放大效应等)。对于电子,银河系里唯一能够将它们加速到 PeV 的是所谓脉冲星风云。这里,我们必须面对的必然是“绝对极端的加速器”:粒子的加速效率必须达到按第一性原理所允许的(译者:极端)边界——按照经典电动力学,粒子的加速率效率 $v=eBc$, B 是磁场强度, c 是光速, e 是粒子的电荷。换句话说,我们所见的是“大自然”完美地设计出来的机器,它们是运行在极端或者绝对极端条件下的粒子加速器:几乎 100%的加速效率!这里包含两重含义:(1)100%的利用了所有可能的能源(动能、电磁能、引力能等)来把粒子加速到相对论性能量;(2)加速率(译者:单位时间内获得能量增量)必须达到可能的最大值。

LHAASO 这次探测到的超高能伽马射线能量有多高?对人体有危害吗?一个人被这样的射线击中的频率有多高?

不会,地球的大气保护了我们免受这些伽马射线的伤害。但即使这些伽马射线能够穿过大气进入到我们的身体,也完全不会是什么大问题,光子会与我们的身体相互作用产生两个电子(译者:正负电子对)它们将会在体内产生离化,而这件事跟任意其他的相对论性粒子所作的是没有啥差别的,不管怎么说,大气中存在的缪子和电子从数量上来说,可是比 UHE 伽马光子多出来好几个量级了。

LHAASO 的世界领先优势可以保持多少年?预计未来 LHAASO 还将有什么重大发现?

LHAASO 应该被称之为现在运行起来了的“未来探测器”,也就是说它代表的是第三代探测器,当瞄准从 TeV 到 PeV 能段的宇宙线和伽马射线测量的第二代探测器还停留在设计阶段之时,它就取数

运行了。当下,只有一个相当于 WCDA 规模的潜在探测器(SWGO)刚刚提出建议在南半球开展 0.1 到 100 TeV 伽马射线探测,而甚至于还没有 KM2A 规模的瞄准 10 TeV 到 10 PeV 能段的任何其他计划在可预见的将来提出来。LHAASO 还是一个宽视场的探测器。

我们可以预见大多数的令人激动的发现将会出现在未来 1~2 年,之后的一个阶段的核心目标,将围绕相对较强的一些源开展深度的谱学和形态学研究,当然还会伴随着一批弱的伽马射线源的发现,这种深入的研究将围绕 1 PeV 或者更高一些的能量进行。根据去年观测的经验,没有哪个源具有超出每年 1~2 个 PeV 光子的发射能力,这就意味着我们将需要 LHAASO 保持运行(至少)二十年,尤其对 KM2A 而言。放眼望去,在此期间 KM2A 都不存在任何竞争,无论是在北半球还是在南半球。

同时,在度过了未来几年最激动人心的“发现期”之后,WCDA 会作为一个强有力的全天普查装置用来扫描北半球,特别是成为对 AGN 的伽马射线耀发和孤立事件比如伽马射线暴及其余晖,非常有效地猎手,至少十年(甚而是 20 年),WCDA 都会主导北半球的观测研究。

伽马天文注定是一个多波段(MWL)的综合性研究。对于空间上扩展的源,LHAASO 的探测灵敏度已经超越了其他波段的观测伙伴,如 X 射线和 MeV/GeV 伽马波段,以及甚高能中微子探测器。下一代的 X 射线探测器、低能伽马射线探测器和超高能中微子探测器能否在未来 10 至 20 年内出现,应该是正确解读 LHAASO 结果的关键因素。

LHAASO 连续运行二十年,将会极大地惠及天体物理和粒子天体物理界。这里 LHAASO 关于伽马源成果的首次报告才只是冰山一角。未来数年,我们预见的发现也许会彻底改变我们关于最高能量和极端现象非热宇宙的知识和流行的基本概念。