

多信使天体物理主力实验装置 LHAASO 及其未来

曹 臻

(中国科学院高能物理研究所 100049)

多信使天文学始于观测手段的不断丰富和理论研究强烈的动机,使人们有了能力和机会在统一的物理框架内研究复杂多样的非热宇宙的天体物理现象,探索宇宙的演化。伽马天文作为其中最为充分发展的学科,无论在能量的跨度上还是在测量的精细程度以及取得的成就方面,都是各种信使中的佼佼者。LHAASO 作为全波段上最高能量的探测器,具有前所未有的灵敏度,将该领域带入了高光时节。大量的发现使我们有机会真正逼近了核心科学问题,发现了膝区宇宙线源的大量候选天体,利用弥散伽马射线的测量追踪了宇宙线在星际空间的传播,还精确测量了宇宙线粒子在地球附近的各项分布。大量的发现也提出了新的要求,为未来发展指明了方向。

1. 多信使天体物理时代

天体物理是探索天文现象的物理机制的前沿研究领域,借助于观测手段的不断丰富、测量精度的不断提高,在过去的一个世纪里飞速发展,极大地丰富了人类对宇宙的认知。尤其是对非热宇宙的探索,从 20 世纪 60 年代起,以脉冲星、类星体、微波背景辐射的发现为标志,不断扩展人类的视野,新现象层出不穷,不断挑战人类知识体系的极限,例如宇宙线及随后大量新粒子的发现,极大地推动了如粒子物理等领域的快速发展。而反过来,也将天体物理的研究随之推向更高的能量水平、更极端的环境条件,不断产生突破性的进展,发现宇宙深处令人惊讶的奇特现象,有些甚至完全突破了现有知识体系,如暗物质、暗能量等。而传递来自宇宙深处的信息的“信使”早已不局限于传统的电磁波,

甚至于不局限于代表非热宇宙特征的 X 射线、 γ 射线标志性信号,荷电的高能粒子即宇宙线更是将单个粒子的能量水平推向了千万倍高于最强大的人工加速器产生的粒子能量的高位,使其加速机制成为百年悬案,无人可解。而宇宙线和粒子探测技术的进步,也使探测 1 TeV (10^{12} 电子伏特)以上光子成为可能,并成为传递非热宇宙现象的一个极为重要的信使,相关的研究领域还特别冠以“高能伽马天文学(光子能量 >0.1 GeV= 10^8 电子伏特)”^[1]、“甚高能伽马天文学(光子能量 >0.1 TeV)”^[2]和“超高能伽马天文学(光子能量 >100 TeV)”^[3]之名,以别于传统的放射性伽马射线波段的观测研究。随着位于南极 2000 米冰层下面的 Ice Cube 实验探测到 200 TeV 以上中微子信号^[4],明显超出了宇宙线在大气中产生的中微子背景,就宣告了中微子这个新的信使已经加入了我们这个探索宇宙深处奥秘的宏大行动。更有甚者,经过 100 年的艰难探索,人类的确探测到了来自黑洞碰撞-并合或者黑洞与中子星并合时发出的引力波^[5],我们的信使家族又增加了新的成员。短短的十几年的时间,我们怀着激动的心情,目睹这个领域发生的巨大进步,人类对于宇宙的知识以可以目测的速度得到了丰富。令人惊奇的革命性变化,还来自“高海拔宇宙线观测站(LHAASO)”实验^[6]为我们打开的超高能伽马射线天文观测窗口,它不仅向人类展现了最高能段非热宇宙的壮丽画卷,更为重要的是,我们成为了亲历者,亲手推开了这扇窗户,不难想象我们是处于何种兴奋的状态。而且兴奋不仅仅发生在第一瞥,出乎意料的发现持续不断地涌现,甚至于颠覆了我们以前的认知,也清晰地感觉到正在逼近我们原来设定的“终极”目标,即发现宇宙线的起源。然而认知宇宙的历程从来

没有所谓的“终极目标”,超高能光子信使给我们带来的是更多未知的现象和对现有理论、模型的挑战。

这篇文章,就聚焦伽马光子和荷电宇宙线这两个更传统的信使最近给我们带来的惊喜和冲击。

2. 信使一:最活跃的粒子天体物理领域——伽马射线天文学

光子是最传统的宇宙信使,借助它人类不但可以直接看见遥远的天体,而且可以监测其变化从而了解它的演化规律。但在这里,我们的话题不是这种直接看得见的可见光波段光子,而是能量至少比它高出10亿倍的GeV高能伽马光子,这显然是不可能“看”见的了,必须用高能物理探测器去捕捉这种信使,而以此开展的天文研究就是粒子天体物理,也可以叫高能天体物理。这些高能光子不可能从热辐射过程中产生,而其辐射机制就是本领域的核心课题:人们就是要去寻找何种过程使粒子能发出如此高能量的伽马射线。首先就需要去探测何种天体能够发出这种辐射,正是因为具有高灵敏度的探测装置,比如FERMI-LAT卫星探测器就是高能伽马波段最强大的探测器,在轨十多年来,它已经发现了7100多个天体。这就是这个领域如此活跃、不断产生惊人的科学发现的原始动力。地面切伦科夫成像望远镜技术(IACT)不断进步,在20世纪90年代迅速规模化发展,以HESS^[7]、MAGIC^[8]和VERITAS^[9]为代表的IACT阵列,不但具备了足够的灵敏度还具有精细的空间分辨本领,也发现超过200颗“甚高能”伽马射线源天体,成果丰硕。但这种探测装置的视场很小,大大限制了其新源发现能力。近十年来,宽视场的甚高能探测技术有了长足的进步,尤其是LHAASO从2019年开始科学观测,彻底改变了这个领域的面貌。

2.1 LHAASO系最灵敏的大视场巡天装置

高海拔宇宙线观测站是通过测量高能宇宙线(含伽马光子)在大气层里产生的空气簇射,并重建

其到达方向和能量,实现对荷电宇宙线成分和能谱的精确测量、以及伽马源的搜寻并对源区辐射强度分布和能谱展开精确测量。由于采用了宇宙线研究历史上最大规模的缪子探测阵列来测量簇射事例中缪子的含量,从而实现了空前的伽马事例的鉴别能力,在100 TeV以上实现了背景事例10万倍的去效率,达到“无背景测量”,加上空前的1平方千米的阵列规模,使之成为最灵敏的伽马望远镜,对光子能流高于 10^{-14} TeV/cm²/s^[10]的伽马源能够开展有效的观测,比当前一代切伦科夫望远镜阵列技术提高了100倍以上,甚至比未来一代的大型阵列的设计指标还要高20倍以上。相比于切伦科夫望远镜技术,不但观测时间上实现了98%以上的有效利用(望远镜技术大约是10%的利用率),瞬时视场也达到1/7天空,从而实现对北半球的全覆盖,能够对伽马源开展无偏差扫描搜寻。由于其高效的簇射探测能力和巨大接收面积,LHAASO还具有对极其稀有的“超高能”伽马光子具有足够的观测能力,例如来自“标准烛光”蟹状星云超过1000 TeV(也就是1 PeV)的光子事例率大约就是每平方千米每年一个。

LHAASO的超强灵敏度和大视场两大优势的组合,使其不但能够发现伽马源最亮的核心辐射区域,这也就是传统的用望远镜技术看到的“源”,而且还能够精确测量周围扩展开来的伽马射线分布,尤其可以测量伽马射线强度随离“源”不同距离的变化规律,这已经突破了传统天文学的观念,即不仅仅对天体本身的观测,还能测量“天体”对周围的影响。这种能力,在搜寻宇宙线的起源方面非常有用,使我们能够追踪宇宙线从其加速源区向外扩散时与环境物质的相互作用和发射伽马光子的全过程,从而更有效地确定“源天体”的物理和天文特征,进而确定宇宙线的源甚至其加速粒子的机理。

全天候、全时段的观测能力与大视场的结合,还非常有利于捕捉罕见的暂现天文事件,例如伽马暴事件、超大质量黑洞驱动形成的活动星系中心的耀发现象、新星的爆发现象、超新星的爆炸,等等。

这些现象通常发生在非常遥远的星系里,甚至于达到几十亿光年的距离,这些信使因此携带着宇宙演化的重要信息,收集并破解这些稀有的信息无疑对增进人类对宇宙的了解非常重要,尤其是这些事件发来的高能量信使,它们具有极其重要的科学价值,甚至少数几个光子就具有对现有模型或理论产生颠覆性的作用。LHAASO的超高灵敏度对此具有独特的优势,并在2022年就迅速得到了验证。

2.2 系列重大发现开启新时代

LHAASO的强大发现能力在2020年初半个阵列建成并投入运行之后就得到了充分的展现,11个月的数据就出乎预料地发现银河系内大量存在发出100 TeV以上伽马射线的源^[1],其中两个源发出的光子甚至于超过了1.4 PeV,由于大大超出了现有理论模型的预期,当时的分析采用了非常严格的判选标准对所发现的“超高能伽马源”进行甄别,12个超级宇宙加速器的候选天体赫然整齐地排列在银道面上。短短两年的全阵列稳定运行,产生了丰富的观测数据,这个数目已经增加到43^[12],清晰地展现了银河系是一个充满加速能力超过1 PeV的超级宇宙加速器的地方,可以充分地开展相应的“超高能伽马天文学研究”,标志着一个新的时代的开启。

更加令人惊讶的是,许多源的伽马光子能谱并没有显示原来预期的粒子加速能力的疲软或枯竭,这些超100 TeV光子并非零星孤立的事件,而这些源都有一个规律性的能谱,比如幂律谱,稳定地延伸到几百 TeV的高能区,这与流行理论认为银河系内的粒子加速源普遍存在加速极限1 PeV的“常识”大相径庭,不仅改变了人们对银河系不存在特别强的粒子加速能力的“惯性思维”,更重要的是给解决宇宙线物理中的一个长期困扰的问题带来了很大的希望,即1 PeV到1000 PeV的宇宙线粒子是在哪里产生的? 低于1 PeV的宇宙线,比较传统的认知是来自于银河系内的超新星遗迹,源自于Fritz Zwicky关于总能量的经典估算和Enrico Fermi著名的粒子加速模型;而能量远超1000 PeV的宇宙线基

本上确定是来自于银河系外的源。LHAASO的初步发现基本上确认了这些超过1 PeV的宇宙线可以由银河系内的源加速产生,而且很大程度上表明它们不是来自超新星遗迹,LHAASO对一颗年轻的SNR,Cas A的观测具有相当的典型性^[13]。

另外一个鼓舞人心的发现是几乎所有原来知道的高能天体,比如脉冲星、脉冲星风云、伽马射线双星系统包括微类星体、大质量星团等,都与LHAASO发现的超高能伽马源存在潜在的关联,这就大大地扩展了寻找高能宇宙线起源的范围,而不局限于超新星遗迹。如前所述,具体对每个源的深入研究发现,我们不仅仅发现了这些简单的关联,往往是发现了围绕这些源的延展结构,表征着源所发出的粒子与环境的相互作用,结合其他波段对于环境物质分布的测量,对于确定被加速粒子的种类和粒子的辐射机制很有帮助。但同时,这些新的现象也对观测提出了更高的要求,特别是高分辨率的定点观测,多数情况下,LHAASO现有的空间分辨能力对于区分源区内比较密集的天体的具体贡献来说,就显得不足,需要高分辨、高灵敏度的定点观测设备来完成更进一步的观测研究。这将在第5节和第6节里进一步讨论。

在这些高能宇宙线源的候选天体中,两类天体尤其是它们的代表性天体,即蟹状星云代表的脉冲星风云和天鹅座的大质量恒星团OB2,引起了高度的关注,针对性的深入研究,让我们进一步逼近了宇宙线起源的终极答案。首先是天鹅座OB2,这是一个充满巨大质量的年轻恒星的密集星团,它们吹出强烈的星风,迅速消耗着质量,平均寿命约百万年的量级,与周围的物质或星风作用产生的激波,可能将粒子加速到非常高的能量。而这些高能量的粒子注入到星际空间就形成了宇宙线,而这样的恒星形成区通常也就位于大质量分子云或原子气体团内部,扩散出来的宇宙线粒子与云和气体碰撞,就发出了伽马光子,通常情况下,光子的能量约为宇宙线粒子的1/10左右,这就是LHAASO观测到的光子。而其中最高能量的光子就标志着宇宙

线被加速到的极限。2.5 PeV 的光子表征了这样的——一个宇宙加速器至少能够把粒子推到 25 PeV 的高能量,这是人类首次发现这么强有力的加速源^[4],而且就在距离太阳系 4500 光年处。虽然关于这个宇宙线加速源还有很多重要的性质,有些尚未完全了解清楚,但已经朝向解开宇宙线起源之谜,又迈出了坚实的一大步:发现了超过宇宙线能谱上“膝”的高能量宇宙线源,“膝”(位于~3 PeV)在以往的模型中被看作是银河系宇宙线加速器的极限,如前所述,我们还“看见”了宇宙线从源向外注入到宇宙空间的全过程。

另外一个天体是我们熟悉的蟹状星云,它是被人类认证的第一个超新星遗迹,而且是 1928 年哈勃提出并通过查找中国宋朝的典籍认证的。近 100 年来的观测研究,已经确认了这是一个由星云中心高速旋转的脉冲星吹出的星风与星际介质碰撞产生的激波进而加速星风内高速粒子的源,星风主要是由正负电子对组成的等离子体,而电子和正电子在脉冲星外围约 100 微高斯的磁场中通过同步辐射和撞击微波背景辐射光场或星光或同步辐射光子等特别低能量的光子而产生高能辐射,成为被 LHAASO 等望远镜测量到的高能伽马光子。这看起来是近乎完美的理论模型并在 20 个量级的跨度上与实验数据吻合。然而,LHAASO 打开了人们从未测量过的几百 TeV 以上的观测窗口,并精确测量了其伽马光谱^[5],发现这个光谱一直延伸到 1.4 PeV,意味着电子、正电子被加速到至少 2.8 PeV 的高能量,这似乎大大地超过了人类可以想象的“合理的”加速过程,除非这是一种被称为“极端加速器”的近乎理想的电磁环境,其加速效率达到了不可思议的 26%,而通常的超新星遗迹中的激波加速效率要比它低 100 甚至 1000 倍!这是非常引人入胜的研究课题,因为它对更加基础的物理规律提出了挑战。虽然迄今为止 LHAASO 的观测数据在统计上尚不足以确认,但似乎存在这样的趋势:最高能量的这些伽马光子并不是电子、正电子产生的,而是脉冲星风里带来的少量重子物质被加速到非

常高的能量,并与星际物质碰撞产生的。这样,蟹状星云就成为“膝”能量以上宇宙线的一个可能源头。银河系内类似于蟹状星云的脉冲星风云为数众多,它们合起来就可以成为宇宙线一个不可忽略的份额。

前面已经提到,LHAASO 具有极强的捕捉瞬态事件的能力,在 2022 年 10 月 9 日发生了千年不遇的伽马暴事件的观测中,得到了完美的体现。发生在 20 多亿年前的一个超级太阳坍缩引发了迄今最亮的伽马暴事件,而这一束光就落在 LHAASO 视场内,持续约 20 多分钟,借助于其强大的灵敏度,LHAASO 记录到超过 64,000 个 0.2 TeV 以上的伽马光子^[6],还包含超过 10 TeV 的光子,这大大地超过了预期,因为星系际空间存在着各星系发出的红外背景光,能量越高的伽马射线在传播到地球的路径上,就越容易被吸收,使宇宙变得不透明。这次接收到创纪录的 13 TeV 伽马光子,直接的推论是:对于 TeV 伽马射线来说,宇宙实际上要比现有理论认定得更加透明,同时也对现有伽马暴的“标准模型”提出了挑战^[7]。这种空前的大统计量测量,将伽马暴的高能辐射机制提升到前所未有的精确研究水平,许多传统模型的成分都得到了体现,使之成为教科书的经典内容,然而精确的测量结果也显示了与“标准模型”的明显偏离,这就促进了伽马暴相关的研究向更加深入的方向迈进。普遍的共识是,这批数据将对未来多年的伽马暴研究产生重要影响。

基于 LHAASO 的伽马射线观测,一大批深入的研究结果涌现出来,不但大大地繁荣了该领域的研究,还切实增强了对宇宙的理解,尤其令人兴奋的是让我们看见了与宇宙线的传统研究课题——“膝”及其成因,或者更广泛一点就是宇宙线的起源产生了相当紧密的关联。这里,不得不提到 LHAASO 对银河系内弥散伽马射线分布的测量,令人惊讶的是,测得的伽马流强竟然远超根据地球附近测得的宇宙线流强来推算的结果^[8],引发深入的思考和进一步的探索。

3. 信使二：最传统的粒子天体物理领域——荷电宇宙线的测量和物理

作为宇宙线的基本组成成分,荷电粒子是最早被确认的宇宙线粒子。经过110多年的测量与研究,高能宇宙线主要是各种原子核,来自太阳系以外,而且,除了放射性元素以外,每种原子核的相对浓度与太阳系内的各种元素的丰度几乎直接可比,这就使宇宙线发挥了“宇宙陨石”这个信使的作用,传递了遥远外太空中的物质信息。更重要的是宇宙线包含能量远高于人工加速器所能产生的粒子,所以它们是人类了解“超高能”天文现象的唯一信使。然而,宇宙线最重要的特征之一是其流强(即单位时间内从单位立体角穿过单位面积的宇宙线数目)随能量迅速下降,大概能量每升高10倍,流强下降1000倍,对于能量很高的宇宙线探测必须利用整个大气层作为介质,让高能粒子在大气中充分与空气中的原子核碰撞,产生级联反应,通过在地面上测量其次级粒子进而重建整个级联过程的方法,来间接测量入射到大气层顶端的“原初”宇宙线粒子的性质,包括其到达方向、能量和种类。由此可见,提高测量的精确性是非常困难的,尤其是原初粒子的种类的判断。长期以来,高能宇宙线的测量停留在对所有粒子不加区分的“全粒子”能谱的测量,以及各种原子核的平均相对占比(称为“成分”, composition)的估计这种相对粗糙的水平上。由此带来许多相互关联的不可排除的系统误差,尤其是LHC精确测量了质子-质子非弹性相互作用截面之前,问题的纠缠程度更为深重。LHAASO的设计本来就追求伽马事例与宇宙线事例之间很强的区分能力,正好也提供了对宇宙线各种组分之间较好的区分能力。为此,还建设了18台宽视场($16^\circ \times 16^\circ$)空气切伦科夫望远镜,对级联过程在大气中的发展进行成像测量,结合地面测量组成多变量立体复合式测量系统,大大提高了宇宙线事例的测量精度。充分利用LHAASO巨大的有效接收面积,使高能宇宙线间接测量进入了精确测量的时代。

3.1 进入精确测量时代

精确测量包括两个方面的含义,其一是大统计量,保证在所关心的能量范围内记录到足够多的事例,统计误差要确保小于系统误差;其二是控制系统误差足够小,以保证物理因素引起的谱分布的变化得以分辨,同时尽量消除各种因素之间的纠缠。在实验上实现的方法首先就需要高的探测接收度,而更重要的是需要对级联过程进行尽可能充分的测量,要采用多种探测手段组合的复合式观测。典型的例子是粒子物理实验中的大型谱仪,从粒子碰撞的作用顶点、粒子径迹、级联过程(量能器)到缪子等多个物理参数进行精确测量,通过多变量的复杂分析方法,以至于深度机器学习人工智能手段来提取粒子的种类、能量等物理参数。一个实际的标志性宇宙线实验就是AMS02空间探测器,采用了6种探测器集合组成了巨大的完整磁谱仪,实现了高精度的宇宙线粒子种类鉴别和能量的精确测量,发现了宇宙线许多重要的性质,而这正是得益于其高精度的测量能力。其中尤以发现各种宇宙线能谱在刚度 ~ 0.2 TeV处变平缓的现象令人印象深刻,超出了长期以来认为宇宙线能谱服从简单幂律函数的传统认知。NUCLEON、DAMPE等实验进而发现质子能谱在 ~ 13 TeV处变陡^[19], DAMPE发现氦核能谱在 ~ 34 TeV处的同样的变陡行为^[20],进一步给出了可能存在单一邻近宇宙线源造成弥散宇宙线能谱畸变的重要结果。

但由于空间探测器受到运载能力的限制而不能做成具有很大接收度的装置,因此只能对50 TeV以下的低能宇宙线开展有效的测量,而高能宇宙线的测量只能采用前述的广延空气簇射的间接测量方法。LHAASO采用四种探测手段测量空气簇射,以及机器学习开展多变量分析,终于实现了将质子、铁核和质子与氦的混合样本与其他成分的分离,纯度可以达到90%以上,这是在能量高于100 TeV的高能宇宙线测量中首次实现,意义重大,是实现各种纠缠的解耦的关键。对于单一成分的样本,尤其像铁核这样的重核,它们在空气中的级联

过程导致的涨落具有比较接近的规律,有利于有效地控制测量的系统误差。另一个重要的系统误差来源是高能粒子碰撞的相互作用模型的不确定性,得益于LHC的精确测量,对模型做出了很好的限制,在“膝”区(小于100 PeV)宇宙线的研究中,这个不确定性也得到了有效的抑制。为宇宙线实验进入到精确测量时代做好了铺垫。

3.2 LHAASO 间接测量单一成分宇宙线能谱实验

在过去5年的观测中,LHAASO采集了超过2亿高质量的簇射事例。对1 PeV以下的铁核能谱、各种成分的“膝”所处的能量范围内的能谱,开展了针对性的测量。初步的分析发现位于400 TeV附近,铁核谱表现出类似于质子、氦核谱分别在13 TeV和34 TeV的变化特征,初步佐证了DAMPE实验的发现,即宇宙线能谱在“膝”前区存在一个清晰的结构,并且几乎发生在同一刚度,似乎反映了共同起源的特性。

在10~200 TeV这一能区,另一项重要而有趣的研究是采用被月亮遮挡的宇宙线“负束流”与地磁场组成的磁谱仪来确定宇宙线测量的绝对能标。初步的分析发现可以给出20 TeV处的能标^[21],虽然最初的精度只能达到30%,但主要误差来源是月亮阴影位置测量的统计误差,随统计量的增加,有望将误差控制在10%以下。最新的研究表明,挑选铁核事例来分析月亮的阴影效应,甚至有望实现更高能标的测定。

100 TeV以上的质子引起的簇射事例可以通过4个物理参数的测量与联合分析,从整个宇宙线事例样本中挑出来,由于质子与氦核引起的空气簇射非常相似,挑选出干净的纯质子样本难度很大,为了保证样本的高纯度(比如大于90%),挑选的效率只能达到20%左右。充分利用其巨大的接收度,这种看似不可能的测量就这样在LHAASO实现了。初步的分析结果展现出清晰的“膝”结构,这是人类首次直接测量这个结构,之前都只能用各种成分混

合在某种模型假设下,通过拟合各种成分混合的宇宙线“总谱”来间接推断质子的能谱和它的膝状结构。可想而知,各种不确定性严重地相互纠缠,对于具有“膝”这种快速变化的能谱的测量自然会受到不确定性的很大困扰,至今所能利用的类似分析结果(如德国KASCADE实验的结果)系统误差达到100%以上^[22],不利于开展精细的物理模型或理论研究。不但如此,LHAASO的测量首次实现了较低的阈能,与天基探测器的直接测量结果几乎可以连接,如DAMPE的能谱已经延伸到~80 TeV。可以预见,LHAASO的精确测量结果将对这个研究领域产生巨大的推动作用。

如果对质子与氦核不加区分,就可以挑选出氢和氦混合的事例样本,从而对这个混合样本的能谱开展大统计量的测量,因为这个样本的挑选效率非常高,达到80%左右。虽然这个测量存在氢、氦混合引入的复杂的不确定性。但结合对纯质子谱的测量,LHAASO也可以对氦的能谱结构做出很好的限制。

当然,最令人期待的是对铁核谱及其“膝”结构的精确测量。由于所关注的能量范围比质子谱的膝的能量高了至少1.3个量级,宇宙线的事例率大大降低,预计需要5年的观测运行,才能得到足够的统计显著性,实现精确的测量。

4. 徐徐揭开百年谜题的神秘面纱

LHAASO测量了各种宇宙线成分混合的总能谱,以及平均成分随能量的变化,展示了LHAASO作为一个综合性能很强的大型宇宙线测量装置有能力提供高精度的测量结果,能够对物理模型产生实实在在的限制。利用对多个物理参数的精确测量,有效限制了宇宙线粒子能量测量中的系统误差,加上巨大的统计样本,能谱的测量显示了清晰的“膝”结构,而膝的位置与以往其他实验的测量吻合,这是预期的结果。重要的是LHAASO的测量首次让人们看清楚了宇宙线成分在“膝”处发生的相关性很强的突变^[23]。其实这也是多年来人们期

盼的结果,但只有当LHAASO具有了对成分的高分辨率,才有揭示其精细结构的可能性。随着更精细的单独成分能谱的测量逐渐发表,更多精细的结构及其关联将会渐次展现出来,就好像一层神秘的面纱被徐徐揭开。尤其是种类众多的超高能伽马射线源被逐渐发现,它们所代表的宇宙线注入量也会得到更可靠的估计,通过银河系内的弥散伽马射线分布的细致测量和大型宇宙线“泡”状结构的细致研究对宇宙线的传播规律的认识也得到很大的提升。

综合起来,我们正在不断地发现除了超新星遗迹以外的各种新类型的宇宙线源候选天体,包括年轻大质量星团、脉冲星风云等,尤其是对超过“膝”的高能宇宙线的源,测定他们的注入量,研究宇宙线粒子在银河系内的传输,探索太阳系周围环境对宇宙线传播的影响,精确测量地球上宇宙线粒子的各种分布,逐渐解开宇宙线起源的百年谜题。

5. 新发现提出新问题

新的科学研究领域的打开,总是以其特有的标志性的发现为代表的,通常源于观测手段上的革命性突破,而这也必然带来大量出乎意料的新现象,提出新的挑战。LHAASO对宇宙中广泛存在的超级加速器的发现,正好具有这样的特征。首先,超高能伽马天文观测给我们展现非热宇宙具有普遍的延展性,而非孤立点状天体组成的天空;其次,每一个宇宙加速器总是存在多个可能的候选天体源,而类似蟹状星云那样孤立的点状源天体非常罕见,这对超高能伽马天文设备的空间分辨率提出了极高的要求;第三,对多波段、多维度的天文联合观测提出了更高的要求,不但要能够准确定位加速粒子的源天体,还需要测量其周围的靶物质分布,才能正确理解超高能伽马射线的辐射机制。这些新问题,都对未来的研究提出了新的要求和挑战,突破了传统天文学的范畴,一些甚至是相互排斥的观测能力必须同时提升。首先,宽视场高灵敏度的望远

镜系统成为必备的装备,这方面LHAASO已经取得了长足的进步。其次,要求高分辨率探测装置具有非常高的灵敏度。传统的定点观测天文装置通常具备足够的分辨能力,如切伦科夫望远镜阵列技术,其空间分辨率比LHAASO要高5至8倍,能够有效分辨候选宇宙线源区域内的各个天体,然而,当前一代望远镜阵列的灵敏度只有LHAASO的几分之一,寻求有效的方法提高高分辨率望远镜的灵敏度是当务之急。第三,要开展深度的多波段、多信使的联合观测,催生了多信使天文学,使之进入到快速发展阶段,尤其是开展有组织、跨单位、多台大科学装置联合的建制化研究,将有力地增强在该领域的发现能力,孕育重大的科学发现。针对灵敏度的提升,我们已经做出了明确的部署。

6. 大型切伦科夫望远镜阵列(LACT)将大幅提升高分辨测量的灵敏度

将切伦科夫望远镜技术运用到高海拔站点,可以大幅降低单台望远镜的造价,从而可以有效增加探测装置的接收度,直接提高探测灵敏度;建在LHAASO站点,还可以充分利用LHAASO的地下缪子探测器阵列对伽马事例的鉴别能力,进一步辅助望远镜阵列提升探测灵敏度;制定针对性的定点观测策略,最大限度地有效使用观测时间,充分发挥望远镜的发现能力。计划在LHAASO的1.3平方千米场地上布设由多个子阵列组合而成的大型切伦科夫望远镜阵列^[24],望远镜总台数将达到32台,单台望远镜视场达到 6° 以上,采用硅光电管相机技术确保有效开展月盲观测,在晴朗的冬夜实现约12小时的观测。对若干重点关注的宇宙线候选源天体实现超过500小时的深度曝光,某些重要的源甚至可以达到1000小时的曝光量,在100 TeV以上实现与LHAASO同等的灵敏度,辨明具体的发光天体,进一步确定辐射机制及其背后的粒子加速机制。在LACT建成后的3至5年内,将对一批银河宇宙线源给出确定的认证。

7. 总结

LHAASO成为当今核心的高能宇宙线和伽马射线探测装置,发挥着不可替代的重要作用。从源头到星际空间传播,LHAASO通过伽马射线对1 PeV以上的宇宙线进行了追踪研究,并对于到达地球的带电宇宙线粒子进行了精确地测量,逐渐揭开了高能宇宙线起源的谜底,体现了多信使天文学强大的能力,由此也展现出非热宇宙无限的风光,新现象层出不穷,挑战也随之而来,不论对现有理论还是观测能力都提出了挑战。在伽马天文我们已经找到了应对挑战的方法与途径,在未来我们还要进一步扩展多信使天文学的疆界,大力发展中微子天文学,使其探测装置也具备与LHAASO的伽马探测可比拟的灵敏度,才能直接探测银河宇宙线源发出的伴生中微子信号,给宇宙线起源,尤其是能量高于“膝”的宇宙线起源百年谜题,一个完整的答案。

参考文献:

- [1] W. B. Atwood et al. (Fermi-LAT), *Astrophys. J.* 697, 1071 (2009)
- [2] S Funk, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 65:245 (2015)
- [3] Z. Cao, S. Chen, R. Liu and R. Yang, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 73:341-63 (2023)
- [4] R. Abbasi et al. (IceCube), *PoS ICRC2023*, 1064 (2023)
- [5] B. P. Abbott et al. *Astrophys.J.Lett.* 848, L12 (2017)
- [6] Z. Cao, *Nature Astron.* 5, 8, 849 (2021)
- [7] F. Aharonian et al. (H.E.S.S.), *Astron. Astrophys.* 457, 899 (2006)
- [8] J. Sitarek et al. (MAGIC), in “33rd Int. Cosmic Ray Conf.”, 0074 (2013)
- [9] D. B. Kieda (VERITAS), in “33rd Int. Cosmic Ray Conf.”, 0700 (2013)
- [10] F. Aharonian et al. (LHAASO Coll.), *Chin.Phys. C* 45, 025002 (2021)
- [11] Z. Cao et al. (LHAASO Coll.), *Nature* 594:33 (2021)
- [12] Z. Cao et al. (LHAASO Coll.), *Astrophys.J.Suppl.*, in press (2023), 2305.17030[astro-ph.HE]
- [13] Z. Cao et al. (LHAASO Coll.), *Astrophys.J.Lett.* 961, 2, L43 (2024)
- [14] Z. Cao et al. (LHAASO Coll.), *Science Bulletin*, in press (2024), e-Print: 2310.10100 [astro-ph.HE]
- [15] LHAASO Coll., *Science*, 373, 425-430 (2021)
- [16] LHAASO Coll., *Science*, 380, 1390-1396 (2023)
- [17] LHAASO Coll., *Sci.Adv.* 9, 46 (2023)
- [18] Z. Cao et al. (LHAASO Coll.), *Phys. Rev. Lett.* 131, 15 (2023)
- [19] DAMPE Coll., *Sci.Adv.* 5, eaax3793 (2019)
- [20] F. Alemanno et al. (DAMPE Coll.) *Phys. Rev. Lett.* 126, 201102 (2021)
- [21] F. Aharonian et al. (LHAASO Coll.), *Phys. Rev. D* 104, 062007 (2021)
- [22] T. Antoni et al. *Astroparticle Physics* 24, 1-25 (2005)
- [23] Z. Cao et al. (LHAASO Coll.), *Phys. Rev. Lett.*, 132, 131002 (2024); arXiv: 2403.10010 [astro-ph.HE]
- [24] Zhipeng Zhang et al., arXiv:2402.11286v1



欢迎投稿, 欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

2024年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款:

2010~2021年单行本每期10元; 2022~2023年

单行本每期15元; 2010~2019年合订本每本60元。

订阅方式

(1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。

(2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行

账号:0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;

(4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊。