

LHAASO: 解决迄今未解的宇宙线之谜

Benedetto D’Ettorre Piazzoli 著 曹臻 译

在上个世纪众多令人惊叹并且难以忘怀科学发现中,有一个就是探测到来自外太空的辐射,即现在称之为“宇宙线”的高能基本粒子流。这种辐射来自外太空的第一个证据是由赫斯(V. Hess)通过七次不同高度的热气球飞行实验中测量得到的(1912)。其中最后一次的飞行高度达到5350米,从而证实了这种具有强大穿透力的辐射的确来自大气层的上方而不是来自地球土壤的辐射。通过在日食情况下实施这种飞行实验,他还进一步排除了这种辐射来自太阳的可能性。尽管如此,太阳仍然是非常密集的低能量宇宙线的供应者,这种特定的低能宇宙线以每秒400公里的速度不间断地轰击着地球,也就是我们熟知的太阳风。很幸运,地球强大的磁场把这些低能的宇宙线扫到了旁边,从而避免了我们的大气不至于像火星大气那样被太阳风彻底吹跑。

当更高能量的宇宙线粒子突破了磁场的屏蔽时,大气层进一步保护了地球。这些来自银河系或者甚至银河系以外的高能带电粒子,分布在从 10^9 电子伏特到令人难以置信的 10^{21} 电子伏特横跨12个量级的能量范围上,形成一个数量随能量迅速递减的“谱”。一个整体的图像是,我们的星球作为银河系中的一个普通的天体在环绕银心的运动中从各个方向被带电(宇宙线)和中性(紫外、X射线、伽马射线和中微子)的辐射不间断地轰击,而地磁场和大气提供了一副有效的安全屏障。从这个意义上讲,撇开科学探索的兴趣爱好,研究这个威胁地球上生命存在的自然现象的重要性也是不言而喻的。

在人工加速器尚未充分发展起来的上世纪50年代,宇宙线还是高能物理研究的主要粒子源:许多基本粒子,如正电子、缪子、 π 介子和奇异粒子,都是在宇宙线中发现的,在粒子物理的发展史上扮演了非常显著的核心角色。现如今,宇宙线研究更加关注其自身,因为它们是传递宇宙深处高能极端现象的“信使”,展现给人类的是相对论性的宇宙,也就是熟知的“非热宇宙”,其中充满了剧烈的天体活动,动辄涉及到人工加速器从未达到的高能量。最高能量的宇宙线粒子携带的能量是位于欧洲核子研究中心(CERN)的巨型加速器LHC所产生的质子能量的一千万倍!这些宇宙加速器是如何把粒子加速到如此之高的能量?它们又有什么特性?就成为了基本的科学问题,然而至今没有确切的答案。显而易见,这些宇宙加速器也就成为了检验极高能量条件下物理规律是否还正确、有效的天然实验室。

粒子物理和天体物理因此就成为宇宙线研究的中心课题。宇宙线的起源、加速机制、在银河系内和河外空间的传播是主要的研究目标。不仅如此,我们还试图通过这些研究去探索其他一些仍然未知答案的科学问题,例如宇宙线是否对地球上生命演化产生影响、或者诸如云的生成、天气条件、甚至对气候的影响,进而对类似于航空机组人员以及高频度乘坐长途航班的旅客如何受到宇宙线辐照的影响等的研究。

质子占到90%的宇宙线份额,氦核大约10%,其他一直到铁核的各种原子核只占到1%,其他的带电粒子还包含非常少量的正、负电子和反质子。大约100太电子伏特(10^{14} eV)以下的宇宙线能够直接用加载在探空气球、卫星或者国际空间站(ISS)上的探测器进行观测研究。这些探测器只有大约一平方米左右的较小灵敏面积,而更高能量的宇宙线数量随能量迅速下降,就必须用地基的探测装置开展研究,高能宇宙线(或者伽马射线)粒子与大气层中的原子会发生级联相互作用,从而产生出巨大数量的次级粒子,即正、负电子、缪子、强

子、伽马光子和中微子，形成一次“粒子阵雨”降落地面，学名叫“空气簇射”。除了不可见的中微子，所有这些次级粒子都能够被散布在地面上的粒子探测器所探测到。不仅是次级粒子本身，它们在空气中的级联过程发展中产生的紫外和可见光——切伦科夫辐射——也可以被探测到。

宇宙线粒子的能谱、成分和它们到达方向的不均匀性是理解其起源、加速和传播的关键参数。通过探测簇射的各种组份粒子，我们可以得到能谱和成分，我们也能够得到关于其源头的一定信息。然而，由于宇宙线粒子带电，在其穿越宇宙空间旅途中就被银河系内的磁场偏转，从而搅匀了他们到达地球时的运动方向，也就是说，用它们到达地球的方向，不可能去寻找它们自己出生何地。

高能伽马光子是产生于宇宙线粒子与其源头附近的物质或辐射场的强烈相互作用，它们可以被用来作为一个探针，因为它们是严格沿着直线传播，不受到磁场的干扰，而反向回溯到其源头方向，即宇宙加速器的方向。这就不像带电的宇宙线粒子了。“多信使”的探索方法，即光子与带电粒子的组合研究，向我们展示了破解宇宙线起源这一世纪之谜的愿景。

要想深入地开展这个唯像的研究，就必须发展大型的、多分量探测的宇宙线观测站，能实现高分辨率、高灵敏度的宇宙线和伽马射线测量。LHAASO 正是这样一个由混合型的探测阵列构成的全新一代观测站，她将对破解“宇宙线之谜”做出十分重大的贡献。

LHAASO 已经具备并且还将继续拓宽：

- 1) **正统的探测器及其阵列布局：**密集的闪烁探测器阵列用于测量次级电子并且与之重叠布置了专门用于缪子测量的地地下水切伦科夫探测器阵列，阵列中央还布置了向更低能量延伸的大水池探测器，还有宽视场切伦科夫望远镜阵列用于簇射的纵向发展进行取样测量
- 2) **巨大的规模：**阵列覆盖 1.3 平方公里、40,000 平方米对缪子灵敏的探测面积、约 80,000 平方米水池、以及 18 台切伦科夫望远镜
- 3) **先进的探测技术：**诸如光纤网络、精密探头（硅光电管）、“小白兔”时间同步系统等

这样一个“暴力”与最前沿的先进技术的结合，造就了 LHAASO 超群的特性，达到了前所未有的探测灵敏度。

除此之外，LHAASO 最具特色的优势当然是其海拔高度（4400 米）。这个高度上， 10^{15} 电子伏特的簇射发展到涨落最小的阶段，并且各种原子核的宇宙线在空气中引发的簇射“大小（译者：产生的次级粒子总数）”几乎相同，由此提供了一个不受其成分影响的测量宇宙线能量的理想手段。正是由于 LHAASO 恰当地设置在这样一个高度上，使得 LHAASO 能够开展覆盖从 10^{12} 到 10^{17} 电子伏特甚至更大范围的宇宙线的精细研究，从而能够与卫星探测器对宇宙线所做的直接探测去相互校验。

探寻宇宙线的起源，是通过测量高能伽马光子并沿其到达方向回溯到这些源头。然而，这些伽马射线的数量却远远低于通常的宇宙线粒子数目，LHAASO 的探测装置却有着难以置信的光子鉴别能力，能将它们从天量的宇宙线粒子中挑出来。个中原理是宇宙线粒子引起的簇射次级粒子中含有大量穿透性粒子，即缪子，产于宇宙线粒子与空气原子核之间的核反应。与之相反，伽马光子引起的簇射里的电磁过程只会产生数量极少的缪子。LHAASO 巨大的缪

子探测灵敏面积能够精确地测量出缪子在簇射中的含量,从而使之具有了挑选伽马光子很高的效率:通常的宇宙线可以被剔除到其原有数量的十万分之一。

正如这篇送往《自然》杂志发表的文中所述,作为一个伽马天文观测装置, LHAASO 达到了前所未有的精确度和灵敏度水平。LHAASO 首次在不只一个候选天体上探测到 PeV 光子 ($1\text{PeV}=10^{15}$ 电子伏特) 直接见证了包括将宇宙线粒子加速到几个 PeV 的极端现象(如超新星爆炸产生的遗迹、双星系统、脉冲星风云、大质量恒星星团等)。正式启动了对“拍伏加速器”(Pevatron)的全天空搜捕!

尽管发现了拍伏加速器,区分它们是电子加速器还是宇宙线加速器也绝非易事。大多数情况下,事实上很难于说清楚:我们探测到的伽马射线,是产于高能量的质子或原子核与加速器周边的物质剧烈的碰撞,还是高能量的电子辐射出来的。由于有中微子伴生于前者的碰撞反应,如能够探测到这些中微子,当然就有解了。非常遗憾,地面探测器对中微子的探测无能为力。LHAASO 就只能另辟蹊径,通过精确测量伽马光子的能谱、细致描绘源区发光点的图像,由其特征来判断被测的天体到底是电子加速器还是真正的宇宙线加速器。

LHAASO 最引人入胜的特性之一是其宽广的视场(立体张角约 2 球面度),使之具有连续观测整个掠过头顶的天空,监测在赤道面上 75° 、下 15° 之间的广阔天区(相应的银河系坐标中经度从 15° 到 231° 的范围)内银河系内、外发生的各种伽马波段耀发活动,特别是河外的伽马源或者是巨大的爆发现象如伽马射线暴,同时还可以测量河内、河外的弥散伽马射线。这是一个可以预期的巨大收获,仅仅需要几年的全天扫描观测而已。

对于超过 PeV 的宇宙线 LHAASO 还能做什么?宇宙线能谱在 3 PeV 附近有一个著名的弯折,就是俗称的“膝”。超过膝,能谱变得更加陡峭,很可能是能量更高的粒子会更多地从银河系逃逸出去,还有河内加速器的加速能力上限两个机制的组合效应。广泛的共识是,标准的扩散激波加速过程能够提供的宇宙线能量极限就在 PeV 的量级,放大效应机制和传播过程中的再加速是解释直到 100 PeV 的宇宙线存在的机制。河内的源头也就在这些能量附近就枯竭了,而出现从河内的源头向银河系外的宇宙线源的转换。相应的(译者:弥散)伽马射线非常稀少而且还并不能回溯到任何特定的源头。因此,精确地测量宇宙线本身的能谱和元素成分就成为探索其起源的必要手段。传统的办法是用测量的数据去与基于不同宇宙线成分组合模型模拟的结果进行比对,从中获得些部分(通常是含混不清的)解答,但显然都失于给出确实、可靠的答案。的确,许多底层的关于源、加速和传播的模型,都给出比较接近的能谱,却存在关于成分很大的认知差异。超过“膝”的能量,还是一个尚未很好地探索过的区域,到目前为止也就是在观测水平获得了“所有种类粒子”的一个总的能谱,看起来也许有些许特性。

测量单元素成分或退一步到 5 种成分组合(氢、氦、碳氮氧、镁铝硅、铁)一直到 100 PeV 甚至于更高的独立能谱是一个非常具有挑战性的课题。LHAASO 能实现这一目标吗?要做到这一点,必须实现对逐个簇射事例区分其进入大气顶端原初粒子的种类。LHAASO 的多种探测器复合观测,提供了簇射的多分量测量信息,可以重建每个簇射中次级粒子在横向和纵向的详细的分布。模拟研究显示,使用多个实验上测到的成份敏感参数来挑选单一的成份分量是可能实现的,这是迄今为止没有任何实验实现过的目标。

按其设计, LHAASO 将会持续、稳定地运行许多年,积累海量的宇宙线数据,据此可以

深入研究许多宇宙线物理中的未解课题。LHAASO 将实施“全天区”、“全时段”、宽广能量范围（从 10^{11} 到 10^{15} 电子伏特）伽马射线的监测，探寻宇宙线的源头、瞬态现象、以及弥散的伽马射线。LHAASO 还展现出测量单一成分的宇宙线能谱和到达方向不均匀性分布令人兴奋的前景，覆盖包含了“膝”以及从河内到河外过渡区广阔能量范围。

由此，我们可以预测：存在很大的机会解开宇宙线之谜，并照亮“非热宇宙”的壮丽景观。

(文章版权《现代物理知识》所有)