

谈谈宇宙线和 LHAASO 成果

崔 伟*

(清华大学 100084)

什么是宇宙线？尽管由于历史原因宇宙线被称为射线，宇宙(射)线实际是指宇宙中比比皆是的高能带电粒子。在地球上，人类不能够直接感受到宇宙线，但能够感受到宇宙线轰击大气后产生的效应。正因为此，在大约 110 年前，宇宙线的存在就已被发现，并被授予诺贝尔物理学奖。我们现在知道宇宙线由自由电子和原子核组成，主要成分是氢，也包括少量的氦和极微量的重元素。宇宙线中的高能粒子几乎以光速运动，与地球大气粒子作用后可以产生新的(或寿命非常短的)粒子。因此，在人造粒子加速器发明前的几十年，宇宙线是发现新粒子的唯一手段，开启了粒子物理研究的一个黄金时代。当时发现的粒子包括正电子、缪子、 π 介子、K 介子等，为粒子物理领域的发展奠定了坚实的基础。宇宙线粒子的已知最高能量超出了最先进的人造粒子加速器能量极限的千万倍！除了提供一个研究新物理的工具，宇宙线的发现也意味着宇宙中存在着极其强大的粒子加速器，因此吸引了大批天文学家和物理学家的共同关注。与传统天文信使(光子)不同，带电粒子在传播过程中受到星际或星系际磁场的影响，运动轨迹偏转，到达探测器时可能完全失去了起始方向的信息，导致很难基于观测确定宇宙粒子加速器的方位。通过约一个世纪的研究，尽管我们对宇宙线的组成、空间分布及能谱已经有了比较细致的认识，但是对它的起源仍然在寻找线索。

实际上，伽马射线不是宇宙线的基本成分，而是宇宙线中高能带电粒子发出的一种波长非常短的“光”，因此伽马射线探测属于传统天文观测范畴。因为不带电荷，中性伽马射线的传播不受到宇宙中磁场的影响，完全保留了起始方向信息，对确定相关粒子加速器在天上的位置意义重大，因为位

置信息可以帮助判断加速器所处的天体。结合可见光或其他长波段的观测可以帮助我们认识天体类别及特性，理解其中的粒子加速及辐射机制，希望最终可以揭示宇宙线起源之谜。尽管超高能带电粒子发的“光”理论上可以覆盖各个天文观测窗口，但是超高能伽马窗口具有很强地独特性。比如，在可见光或其他长波段解释探测到的信号，可能辐射机制有多种，与超高能粒子关联一般不很直接，需要依赖于理论模型。但是，一旦探测到了来自某个天体的超高能伽马射线，一定就意味着超高能粒子及相关加速器在该天体中的存在，不依赖于任何理论模型。

天文观测始于可见光波段，是因为人类自带了一对可见光探测器。如果我们的眼睛对 X 射线或伽马射线敏感，我们在夜空中看见的不再是满天恒星，而是银河系内的黑洞或中子星双星、超新星遗迹等。探测技术的不断发展推动了新天文窗口的逐一开启，使得我们对宇宙有了更全面的认识。如果仅限于一个窗口的观测，我们对一个天体的认识犹如盲人摸象，会非常片面。举例来说，不少很亮的伽马射线源在可见光波段则显得非常普通，而恒星在伽马射线波段基本探测不到。只有结合对某天体在各波段的观测，才能完整地理解它的性质，这是天文观测进入多波段时代的原因。每个新窗口的开启都意味着更深入认识宇宙的机会。超高能伽马射线处于电磁波谱的最高端，可以说是观测宇宙中极端粒子加速物理的唯一窗口。

在 LHAASO 之前已有实验成功探测到了超高能伽马射线源，为这个崭新的天文窗口拉开了一条缝。通过在 1 平方公里范围内均匀布置的 5000 多个电磁粒子探测器和近 1200 个缪子探测器(即 KM2A 阵列)，LHAASO 加速了超高能伽马天文窗

*清华大学天体物理中心教授

口的开启,并成为在该波段最灵敏的观测设施。LHAASO无法直接探测来自宇宙天体的超高能伽马射线,而是通过探测伽马光子与大气中的分子碰撞后产生的次级粒子,间接地获得入射伽马光子的性质(包括到达时间、传播方向、能量等)。类似于雪崩现象,一个伽马光子与大气作用可以产生许多次级带电粒子,而这些粒子可以与大气进一步作用,产生新一代次级粒子,如此类推,直到粒子的能量不足以产生更多的次级粒子。如果部分次级粒子能够到达地面,就可以被探测到。实验所在的海拔越高,能够探测到的粒子越多,信号就越强,灵敏度就越高。当然了,海拔越高,实验环境就越恶劣,实验建设就越困难。综合考虑,海拔在4~5千米的高山是一个比较可行的选择。

与世界上的同类实验相比,LHAASO的一个特色是结合了地面伽马射线天文观测的多个主要手段,包括大面积粒子探测器阵列(KM2A)、水切伦科夫探测器(WCDA)及大气切伦科夫望远镜(WFCTA)。与中日合作的羊八井粒子探测阵列AS γ 比,KM2A的面积更大,探测器更多,所以在超高能伽马波段的探测灵敏度更高;与美国的水切伦科夫探测实验HAWC比,WCDA的面积超出约4倍,而且探测器分布连续,所以在甚高能伽马波段的探测灵敏度更高。在探测技术与实验设计层面,LHAASO的宽视场探测与国际大气切伦科夫望远镜的窄视场探测形成互补:前者具有天区覆盖广、观测效率高等优势,利于发现新源;而后者具有灵敏度高的优势,利于深度研究。因此,国际合作的潜力很大。

探测到伽马射线的能量越高,就意味着相关天体的粒子加速能力越强,相关的物理条件就越极端,研究发现新物理的概率也就越大。这可以与在地面建造粒子加速器类比:设计能量极限越高,技术要求就越高,困难就越多,需要投入的资源也就越大;但一旦建造成功,粒子碰撞时的总能量越高,产生未知粒子的概率越大。与人造粒子加速器相比,宇宙加速器的能力极限可以超出千万倍,所以预期加速过程的物理非常极端。

那么,LHAASO这次探测到的最高能量伽马射线来自哪个天体?基于定位信息,LHAASO探测到的最高能量伽马射线很可能来自天鹅座中一个大

质量(OB类)恒星聚焦的天区。之前,伽马射线观测已经发现高能粒子在该类天体中存在的迹象,但探测到的伽马射线最高能量比LHAASO测到的低大致3个数量级。与低质量恒星相比,大质量恒星有两大(相关)特征:辐射功率大、星风强。此外,高质量恒星寿命很短,而且生命结束的方式(超新星)具有很强的爆发性,可以在短时间释放巨大能量。可想而知,大质量恒星聚焦之处也是强烈星风碰撞和密集超新星爆发的天区,预期形成大量激波,从而加速粒子至超高能量。LHAASO观测不仅支持了这一理论猜测,而且揭示了OB天体中的粒子加速器可能比想象得更强大。这些伽马射线的能量可达普通医疗所用X射线的千亿倍,潜在伤害性可想而知。但是,人类很幸运地受到了地球大气的保护,免受其害。即使生活在大气层外,一个人被超高能伽马射线击中的概率也非常低(每千年几个)。

在监测类宽视场地面伽马射线实验中,LHAASO不仅现在处于国际领先地位,而且很可能将该优势保持很久。纵观该领域的国际布局,具备相当探测能力的实验还未出现,但LHAASO的成功可能会推动未来更大伽马射线探测阵列的建造。欧洲正在建造高灵敏度大气切伦科夫望远镜阵列(CTA),建成后可以与LHAASO形成很好的互补。与CTA相比,LHAASO的优势主要体现在宽视场和超高能区,所以可预期两大类重大突破。一类是新的伽马射线暂现源;另一类是大量超高能伽马射线天体。许多重要的天体在观测层面属于暂现源:通常太暗,无法被探测到,但偶尔会突然变亮,短时间后又消失。与高能天体物理相关的暂现源包括伽马暴、快速射电暴、超新星爆发、X射线(黑洞)双星突变、耀变体突发、(黑洞)潮汐瓦解事例等,其中多类被认为与宇宙线起源相关,是宇宙粒子加速器的具体体现。

大量超高能伽马射线天体的发现将从另外一个方向推动宇宙线起源的研究。正如引力波源的电对应体探寻已成为高能天体物理的一个很大的热点,预期超高能伽马射线源的光学或射电对应体探寻也将随着LHAASO观测的进展而得到推进。这是证认和研究宇宙粒子加速器的关键所在。