

LHAASO 实验发现来自宇宙的最高能量光子

李成翊 马伯强

(北京大学 100871)

北京时间2021年5月17日,中国高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)在国际顶尖期刊《自然》杂志发表以“Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources”为题的文章,公布了LHAASO实验合作组关于能量超过拍电子伏特(PeV)量级的超高能伽马射线光子观测的首个结果,这也是人类探测到的来自宇宙的最高能量的伽马射线光子事例。这一实验结果将有助于人们更好地理解高能粒子的宇宙学起源以及它们在宇宙极端区域的加速机制,同时也为检验基础物理学的理论及概念(如狭义相对论的洛伦兹不变性假设)提供了很好的机会。

1. 西藏高原上的宇宙线实验室——LHAASO

坐落于四川省甘孜藏族自治州稻城县的“高海拔宇宙线观测站”(Large High Altitude Air Shower Observatory, 英文简称LHAASO, 中文名称“拉索”)是我国“十二五”期间立项建立的重大科学基础设施项目,也是我国下一代复合式高山地基宇宙线和伽马射线研究装置。LHAASO建设在海拔4410米的海子山上,因此它能够充分观测宇宙线粒子与地球大气产生的级联簇射次级粒子,进而对高能宇宙线做出非常精确的测量。由于来自外太空的宇宙线通常由带电的核子组成,这样的高能带电粒子在宇宙空间穿行时往往会受到天体磁场的影响而被

弯折,这就使得搜寻高能宇宙线的源头变得极为困难。LHAASO作为新一代的高山宇宙线实验室,主要是通过观测高能宇宙伽马射线来试图破解宇宙线的起源。人们相信,能够将宇宙线粒子加速到极高能量的射线源附近应是一个天体活动十分剧烈的区域,在这样的地方也会产生超高能的伽马光子(即光的量子),而光子由于不带电,不会受到宇宙磁场的影响,因而高能光子会沿着比带电粒子更加笔直的路径传播。当地球上的探测器接收到这样的高能光子事例后,人们便可以逆着光子传播来的方向去定位发射这些光子的天体源,进而大致确定产生高能宇宙线的源头区域或源天体。

为了探测宇宙线粒子,LHAASO采用了三类不同的探测器,分别为覆盖1.3平方公里的5195个电磁粒子探测器阵列和灵敏面积4.2万平方米的缪子探测器阵列(即平方公里阵列;KM2A)、有效面积为7.8万平方米的水切伦科夫光探测器阵列(WCDA)以及十八台广角大气切伦科夫望远镜阵列(WFCTA),总占地面积达1.36平方公里。利用复合式探测器阵列的自身优势,即三个探测器子阵列可以相互协作,互为补充,LHAASO装置在宇宙线起源、全天区伽马射线搜寻和甚高能时变现象方面等都具有世界领先的探测水平。在LHAASO的三个子阵列中,平方公里阵列KM2A主要用于测量10万亿电子伏特(即 10^{13} eV, 或10 TeV, TeV是能量单位,读作“太电子伏特”)以上的宇宙伽马射线,其主体工程于2017年11月开始建设,于2019年年底完成超一半规模的探测器建造,并在其余部分尚未完工的

情况下便投入了试运行,产出部分观测结果。预期 LHAASO 全探测器阵列将于 2021 年 6~7 月正式竣工,届时 LHAASO 将具有更强的探测能力,并将在超高能区的观测灵敏度上达到世界最高水平。

2. LHAASO“看到”宇宙最高能量的光子

近日,中国高海拔宇宙线观测站(LHAASO)合作组基于 KM2A 探测器阵列在试运行期间得到的数据分析在英国《自然》杂志发表了最新科学文章“Ultra-high-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources”^①,宣布发现首批“拍电子伏宇宙线加速器”和最高能量宇宙线光子,开启了超高能伽马天文学实验探测及研究的新时代。相关结果也在文章发表当天(即 5 月 17 日)以中国科学院高能物理研究所与 Springer Nature 联合发布会的形式向公众进行了介绍。

在发表的文章^①中,LHAASO 合作组的科学家们报道了在银河系的银盘上发现的来自十二个伽马射线源的超过 530 个超高能光子事件,也就是光子的能量在 100 万亿电子伏特以上的事例,且结果显示 KM2A 探测器对这些超高能伽马辐射的观测显著性超过了 7 倍标准偏差,意味着这些观测结果都是十分可靠的。对于其中两个射线源(LHAASO J0534+2202 和 LHAASO J2032+4102),探测到的伽马射线光子的最大能量超过了 800 万亿电子伏特,而此次 LHAASO 报道的最高能量的光子来源于标记为 LHAASO J2032+4102 的辐射源,对应于天鹅座内非常活跃的恒星形成区,光子能量最高达到 1400 万亿电子伏特(即 1.4×10^{15} eV,或 1.4 PeV,PeV 是能量单位,读作“拍电子伏特”,比 TeV 高一千个量级),且该伽马射线源在能量高于 100 TeV 的能段的观测显著性达到 10.5 倍标准偏差,由此可见 LHAASO 装置的灵敏度之高。由于此次探测到的 1.4 PeV 事件是人类迄今为止测量到的最高能量的

宇宙线光子,同时也是首次在天鹅座区域发现 PeV 伽马光子,因此 LHAASO 的结果不仅为银河系中存在 PeV 宇宙线加速器提供了直接的证据,也引起了科学界的广泛关注,讨论这一实验结果的重要意义正成为全球高能物理界的研究热点。值得一提的是,尽管 LHAASO 合作组在文章中报道了这些聚集在银盘面附近的射线源的能量和位置,但却并未明确指出这些伽马射线是由哪些候选天体发出的。因此这些伽马光子的起源问题还有待未来的研究进一步揭示。

此次 LHAASO 探测到数百 TeV 以上的高能量段伽马射线具有非常重要的物理意义,这主要体现在两个方面。一是刷新了人们对银河系内“宇宙线加速器”的认识。在 LHAASO 的结果之前,人们并不相信在我们生活的看似“温和”的银河系中会有如此剧烈活动的天体或恒星区能够产生这样高能量的粒子,而如今 LHAASO 的观测结果将迫使人们重新思考银河系中可能大量存在的 TeV 和 PeV 宇宙线加速器的本质。在通过对 LHAASO 首批超高能伽马光子的深入研究后,人们将能够更好地理解这些高能粒子的宇宙学起源以及它们在宇宙极端区域的加速机制,甚至有望通过其研究宇宙演化和高能天体演化。LHAASO 结果的第二个重要价值是它为人们提供了一个检验基础物理理论乃至探测新物理的机会。由于人们对超出现有物理框架的新物理可能出现的能量标度没有十足的把握,而且目前在人造的大型粒子加速器上也并未发现任何可信的新物理信号,人们便将检验基础物理和探索新物理的希望寄托于天文观测,这是因为高能天体物理过程产生的宇宙线的能量往往可达数百 TeV 乃至 PeV 量级以上,远超过地球上的粒子加速器可达到的一到十倍 TeV,这使得人们有望观测到在较高能量标度才可能有所体现的新物理迹象。因此 LHAASO 的实验结果对于开展新物理前沿的研究,尤其是检验和探索洛伦兹不变性的物理,具有非常重要的意义。

3. 洛伦兹不变性破缺——通向量子引力之路

谈及新物理,我们首先会想到现代物理学的两大支柱理论,也就是人们熟知的量子理论和广义相对论。我们知道自然界的四种基本相互作用中的三种,即强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用都可以在量子场理论的框架下得到较好的描述,这就是人们称之为粒子物理标准模型的理论,它在20世纪60年代至70年代被逐渐完善,并在过去的半个多世纪中不断接受着大型粒子对撞机实验的检验;而第四种基本相互作用,也就是引力相互作用则需要单独由爱因斯坦在1915年创立的广义相对论中进行描述。在这一框架下,引力不再被视为一种通常的作用力,而是作为时空弯曲的几何效应出现。爱因斯坦的广义相对论对引力物理的数学描述十分优美,并被迄今为止的众多实验观测不断证实。然而当人们试图将四种基本力统一在同一个理论框架下时,或者说当人们把量子理论和广义相对论结合起来时,却发现这两者之间存在着难以弥合的不相容性。这主要表现在引力的量子化疑难上,因为人们发现当采用通常的量子化程序去做引力的量子化时,会出现计算结果的无穷大,且无法消除(即所谓的“引力不可重整”)。然而如果不将广义相对论纳入到量子框架中,那么前者必然只是一个经典的理论,或者说是一个低能下的有效理论,所以人们相信一定会存在一个更基本的量子引力理论,它可以完备且自洽地描述引力和量子物理。目前有诸多有潜力的量子引力候选理论,比如弦理论、圈量子引力、扭量理论、渐近安全引力、因果动力学三角剖分等等,然而由于相关实验验证的缺失,这些理论在目前都还无法被证实或证伪。

尽管广义相对论和量子理论还未被完全融合到一个令人信服的理论框架下,爱因斯坦在20世纪初期提出的狭义相对论却早已和量子理论成功结合,这也就是我们前面提到的量子场论,由此进一步衍生出了粒子物理的标准模型。我们知道洛伦

兹不变性是爱因斯坦狭义相对论的一个基本假定,因而它也是标准模型的基本对称性,它的意义在于惯性系在洛伦兹变换(即洛伦兹步进和空间转动)下物理定律的不变性。然而一些量子引力理论预言在普朗克能标附近($E_{\text{Planck}} \approx 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV}$)洛伦兹不变性有可能不再成立,即出现所谓的洛伦兹不变性破缺。因此精确检验洛伦兹不变性以及探索其破缺带来的新物理现象将有助于人们间接检验量子引力模型,甚至有望为我们指明走向大统一理论的道路。自Amelino-Camelia等人^②在1998年首次提出利用高能天文现象来检验量子引力可能导致的洛伦兹不变性破缺效应以来,在过去的二十年中,对洛伦兹不变性破缺的理论和唯象学讨论已经成为粒子天体物理和宇宙学等领域的研究热点。

虽然理论模型预言的洛伦兹不变性破缺是在普朗克尺度上发生的,但这种对称性的破缺也会在我们所处的低能世界中产生一些可观测的微小效应,也就是所谓的“洛伦兹破缺的遗迹(relic)”。这些遗迹现象为人们打开了一个检验洛伦兹不变性破缺的窗口,同时也是为数不多的量子引力的观测窗口。在这里我们仅考虑在量子电动力学(即电磁相互作用的量子场理论,英文简称QED)中光子部分的洛伦兹不变性破缺,那么由于普朗克尺度洛伦兹不变性破缺的存在,光子的色散关系会受到额外的修正,进而产生超出狭义相对论的新物理预言,这些预言主要有三个方面。一是真空中的光速 v 不再是一个常数 c ,而是光子能量依赖的(甚至是光子极化依赖的)。二是在传统QED中被严格禁止的反应道(如单光子到正负电子的衰变道)变得可以发生。第三是某些在传统物理中允许发生的反应过程的阈值能量会发生改变(称为“反常”),例如双光子湮灭到正负电子对过程(即 $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反应过程)的阈能量会存在反常。正如在第二节中所提到的,人类在地面实验室中建造的粒子加速器目前所能达到的最高能量只有几十倍TeV,往往不足以检验这些洛伦兹不变性破缺带来的极微小效应,于是一些发生在宇宙学距离上的高能天文物理过程(如

LHAASO 实验进行的天文观测)为我们提供了检验这些超出标准物理现象的绝佳机会。

4. LHAASO 助力洛伦兹不变性破缺研究

我们在前一节中提到,洛伦兹不变性破缺所引起的光子反常色散关系会导致不同能量的光子的传播速度不同,这就意味着从某一天体源辐射出的不同能量的光子(假定这些光子从源处同时发出)到达观测者的时间将是不同的。通过这一现象,人们可以对洛伦兹不变性破缺做出检验。通常采用的天体辐射是具有较短时标的高能天文现象,比如伽马射线暴、活动星系核(或耀变体)以及来自脉冲星的高能伽马辐射等,其中伽马射线暴(简称伽马暴,英文简称 GRB)作为一种来自宇宙深处的短时标、高能量的伽马射线突增的爆发现象,常常被用做检验洛伦兹不变性破缺的天体物理探针。事实上,在先前的一些研究^{③④⑤}中,基于对费米伽马射线空间望远镜探测到的一系列伽马暴光子到达时间差进行分析,相关结果建议了一个线性能量依赖且亚光速的真空光速改变(所谓“亚光速”,是指高能光子速度比低能光子要小一点,因而高能光子是亚光速的),且这一效应的压低能标大约为 3.6×10^{17} GeV。更为保守地,考虑到伽马暴光子的到达时间延迟可能部分或全部来自源内禀的发射时间差,又或来源于光子在宇宙空间传播时受到星际物质影响所致,先前工作中的这一结果可以被认为是对洛伦兹破缺能标做出的一个保守限制,也就是这种亚光速型的线性洛伦兹不变性破缺应至少发生在 3.6×10^{17} GeV 或更高的能量标度上。

如今,借助此次 LHAASO 探测到的迄今为止最高能量的光子,一些最新的研究^{⑥⑦}试图从其他角度对洛伦兹不变性破缺做出更高精度的检验或限制。的确,正如前一节所提到的,洛伦兹不变性破缺还会导致诸如光子自衰变以及双光子湮灭反应的阈反常等现象。在其中一篇工作^⑥中,本文作者

指出,此次 LHAASO 的观测结果能够让我们通过对这两个过程的讨论来进一步理解洛伦兹不变性破缺的物理,这主要体现在两个方面。一是 LHAASO 的 PeV 光子能够对超光速型的洛伦兹不变性破缺做出更强的限制。由于前面提到的光子自衰变过程仅在超光速洛伦兹不变性破缺下才会发生(所谓“超光速”,是指高能光子速度比低能光子要快一点,这时高能光子是超光速的),因而任何对超高能光子的观测都意味着对相应洛伦兹破缺能标的一个限制。LHAASO 探测到的 1.4 PeV 光子事例对超光速型的线性洛伦兹不变性破缺能标的限制结果可达约 2.74×10^{24} GeV(与另一篇工作^⑦中得到的结果类似),借此可以进一步对一些预言超光速洛伦兹破缺的理论模型做出更加严格的约束,例如对于被称为标准模型扩展(英文简称 SME)的场论模型, LHAASO 将导致其相关参数被限制到低于 10^{-6} 的量级,远低于该参数应与 1 相近的自然期待。第二个方面是我们建议 LHAASO 的观测结果可能支持一个亚光速型的洛伦兹不变性破缺。提出这一建议的理由是考虑到在不存在洛伦兹不变性破缺的情况下, LHAASO 的 PeV 光子很可能在传播路径中通过双光子湮灭与宇宙微波背景辐射光子发生反应,从而无法被地球上的观测者接收到;而在发生亚光速型的洛伦兹不变性破缺的情况下,这一反应的阈值能量被改变,使得能量高达 PeV 量级的光子能够在宇宙空间传播过程中存活下来,而不被微波背景辐射光子吸收。不过值得提及的是,由于此次 LHAASO 探测到的都是银河系内的辐射源,它们到我们的距离相对较近,考虑到双光子湮灭反应的自由程较长,即使不存在上述洛伦兹破缺效应,这些超高能光子也有一定几率传播到地球,因此我们提议在未来利用 LHAASO 进一步搜寻来自河外的 PeV 能量的宇宙线光子,以此作为对亚光速洛伦兹不变性破缺的重要检验。

此外,在这项工作^⑥中,我们进一步指出目前对光子部分洛伦兹不变性破缺的唯象观察,包括上述 LHAASO 实验导致的最新结果,都可以被一种以弦

理论为基础的时空泡沫模型所解释^{⑧⑨}。这类量子引力模型以IA型弦论(I型超弦理论的T对偶表述)或IIB型弦论为基础,预言微小尺度下的时空不再光滑,而是呈现量子化的“泡沫”结构^{⑩⑪⑫}。这种时空泡沫的存在破缺了严格的洛伦兹对称性,而泡沫化的量子时空本身又等效于一种色散介质,从而对物质粒子(如光子等)的色散关系做出量子引力诱导的紫外修正。对这类模型感兴趣的读者可以自行查阅前面引述的参考文献,这里我们就不赘述了。重要的结论是,这类弦论模型会给出真空光速与光子能量线性依赖的预言,同时光子只能以亚光速传播,因而在这样的模型中,光子是稳定存在的,不发生自衰变,但却可以推知高能光子与宇宙背景辐射光的湮灭存在着阈反常。很显然,通过对比前面提到的结果,这些理论预言与LHAASO的实验观察是相符的。据此,我们认为,借助LHAASO将来可能探测到的更丰富的高能天文现象,人们能够对一些洛伦兹破缺的理论做出更强的限制,同时也很有希望对一些理论模型给予支持,正如我们在这项最新的研究^⑥中所揭示的那样。

5. 展望

在当今高能粒子天体物理现象被广泛用于基础物理检验及新物理探索的时代,我国的LHAASO探测器阵列作为目前工作在超高能区(TeV和PeV)的伽马射线天文观测站,拥有比世界上其他同类望远镜更高的灵敏度和更大的能量探测范围。相信在不远的将来,LHAASO观测站完全有能力探测到更多的高能宇宙线光子事件、发现更多数量的宇宙伽马射线辐射源以及其他更加丰富的高能天文现象。相信LHAASO未来的观测结果将助力宇宙线起源等基本问题的研究取得突破性的进展,也有望进一步对基础物理检验做出贡献,例如对普朗克尺

度的洛伦兹不变性破缺做出更高精度的检验或限制,并有望揭示潜在的量子引力理论的更多重要性,为人类最终走向物理学的统一之路做出贡献。

参考文献

- ① Z. Cao, F. A. Aharonian, Q. An et al. (LHAASO Collaboration), Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources, *Nature* 594, 33 (2021). doi: 10.1038/s41586-021-03498-z
- ② G. Amelino-Camelia, J. R. Ellis, N. E. Mavromatos, D. V. Nanopoulos and S. Sarkar, Test of quantum gravity from observations of γ -ray bursts, *Nature* 393, 763 (1998)
- ③ H. Xu and B.-Q. Ma, Light speed variation from gamma-ray bursts, *Astropart. Phys.* 82, 72 (2016)
- ④ H. Xu and B.-Q. Ma, Light speed variation from gamma ray burst GRB 160509A, *Phys. Lett. B* 706, 602 (2016)
- ⑤ H. Xu and B.-Q. Ma, Regularity of high energy photon events from gamma ray bursts, *JCAP* 1801, 050 (2018)
- ⑥ C. Li and B.-Q. Ma, Ultrahigh-energy photons from LHAASO as probes of Lorentz symmetry violations, *Phys. Rev. D* 104, 063012 (2021). arXiv:2105.07967
- ⑦ L. Chen, Z. Xiong, C. Li, S. Chen and H. He, Strong constraints on Lorentz violation using new γ -ray observations around PeV, *Chin. Phys. C* 45, 095104(2021)
- ⑧ C. Li and B.-Q. Ma, Light speed variation in a string theory model for space-time foam, *Phys. Lett. B*, 819, 136443 (2021). doi:10.1016/j.physletb.2021.136443
- ⑨ C. Li and B.-Q. Ma, Light speed variation with brane/string-inspired space-time foam, *Results Phys.* 26, 104380 (2021). doi: 10.1016/j.rinp.2021.104380
- ⑩ J. R. Ellis, N. E. Mavromatos and M. Westmuckett, Supersymmetric D-brane model of space-time foam, *Phys. Rev. D* 70, 044036 (2004)
- ⑪ J. R. Ellis, N. E. Mavromatos and D. V. Nanopoulos, Derivation of a vacuum refractive index in a stringy space-time foam model, *Phys. Lett. B* 665, 412 (2008)
- ⑫ T. Li, N. E. Mavromatos, D. V. Nanopoulos and D. Xie, Time delays of strings in D-particle backgrounds and vacuum refractive indices, *Phys. Lett. B* 679, 407 (2009)