

利用 LHAASO 实验检验相对论并探索新物理*

马伯强[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

2024-04-05 收到

[†] email: mabq@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240405

Testing relativity and exploring new physics from LHAASO observations

MA Bo-Qiang[†]

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘要 中国高海拔宇宙线观测站(LHAASO)探测到了迄今最高能量的宇宙光子,其能量超过拍电子伏特量级,开启了超高能伽马天文学的新时代。LHAASO 合作组完整记录了伽马暴 GRB 221009A 的全程爆发过程,首次测得来自伽马暴超出 10 TeV 的高能光子。这些发现不仅对人们理解宇宙线起源具有重要意义,也为检验相对论并发现新物理提供了很好的契机。文章简要介绍 LHAASO 的这些观测结果,并指出这些结果可在检验爱因斯坦狭义相对论中洛伦兹不变性、恒定光速的基本假设,以及探索新物理机制的研究中发挥重要作用。

关键词 中国高海拔宇宙线观测站, 伽马天文学, 宇宙线起源, 相对论, 轴子

Abstract The observation of the highest-energy cosmic photons by the Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) has opened a new era of ultra-high energy gamma-ray astronomy. The whole process of gamma-ray burst GRB 221009A was observed, including the first detection of photons with energies around or above 10 TeV. I briefly review these discoveries and show that they not only play an important role in understanding the origin of cosmic rays, but also can be used for testing the basic assumptions of Lorentz invariance and constant light speed in relativity, and for exploring new physics beyond the standard model.

Keywords LHAASO, gamma-ray astronomy, origin of cosmic rays, relativity, axion

2021年5月,中国高海拔宇宙线观测站(LHAASO,又称“拉索”)合作组在《自然》杂志发表文章^[1],报道了实验组的科学家们在银河系内发现的来自12个伽马射线源的超过530个超高能光子事件,也就是能量在一百万亿电子伏特以上的光子事例,其中光子能量最高达到一千四百万亿电子伏特(即 1.4×10^{15} eV,或1.4 PeV)。这是人类迄今探测到的来自宇宙的最高能量的伽马射线,也标志着超高能伽马天文时代的来临。2022年10月9日,LHAASO合作组捕捉到来自高

亮度伽马暴 GRB 221009A 的数万个能量范围在几百 GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$)到十几 TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$)的高能光子,并首次测得来自伽马暴超出 10 TeV 的高能光子事例^[2, 3]。这些观测结果不仅有助于揭开宇宙线起源的世纪之谜,还为检验相对论和探索新物理提供了前所未有的机遇。

高海拔宇宙线实验室 LHAASO^[4]是我国“十二五”期间立项建设的重大科技基础设施,位于四川省甘孜藏族自治州稻城县的海子山上,海拔 4410 m,是世界同类科学装置中灵敏度最高的超高能伽马射线和宇宙线探测器。LHAASO 由三类

* 国家自然科学基金(批准号:12335006)资助项目

探测阵列组成,分别为覆盖1.3平方公里的5216个电磁粒子探测器和灵敏面积4万多平方米的缪子探测器阵列(即平方公里阵列)、有效面积7万多平方米的水切伦科夫光探测器阵列和18台大角切伦科夫望远镜阵列,总占地面积达到1.36平方公里。这些探测器的组合使得LHAASO适宜观测来自宇宙的能量范围在10 TeV至PeV量级的高能光子,标志着人类迈入超高能伽马天文时代。

2021年5月,LHAASO合作组^[1]报道了银河系内的12个辐射能量高于十万亿电子伏特的伽马射线源。对于其中的两个射线源,LHAASO探测器观测到的伽马光子的最大能量超过了0.8 PeV,而此次探测到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1.4 PeV。这是人类迄今观测到的最高能量光子,同时也是首次在天鹅座区域发现PeV伽马光子,突破了人们对银河系粒子加速的传统认知,也揭示了银河系内普遍存在超高能宇宙线加速器的事实。LHAASO的这一观测结果引起了国内外学界的广泛关注和讨论。

此次LHAASO对超高能宇宙光子的探测具有十分重要的科学意义。由于宇宙线是来自外太空的高能粒子,通过观测这些“天外来客”,人们可以分析它所携带的信息,比如其产生地“源”天体以及传播路径上的宇宙空间信息。这些信息将有助于人类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,甚至有望一窥天体演化及宇宙早期历史的奥秘^[4]。因此这些高能粒子往往被物理学家认为是理解宇宙的探针。此外,这些来自宇宙的高能伽马光子也能够为我们检验基础物理理论乃至探测新物理提供很好的机会。由于人类在地球上建造的粒子加速器目前只能将基本粒子加速到十万亿电子伏特左右的能量,而宇宙中发生的一些高能天文过程却可以产生更高能量的宇宙线粒子,因此LHAASO的观测结果有助于人们开展新物理前沿的研究,尤其是检验和探索洛伦兹不变性破缺方面的物理^[5-8]。

在爱因斯坦的狭义相对论中,洛伦兹不变性(或洛伦兹对称性)作为一个基本假定,其意义在

于惯性系在洛伦兹变换下物理规律的不变性,这也是现代粒子物理标准模型的基本对称性。相对论的另外一个基本假设就是光速为恒定的常数,也就是常说的光速不变性假设。由于标准模型不能描述引力的行为,所以人们需要将描述亚原子领域的量子理论和描述引力的广义相对论统一起来,构造所谓的量子引力理论。然而一些量子引力模型预言在普朗克尺度上洛伦兹不变性可能不再成立,即出现所谓的洛伦兹不变性破缺。这种对称性的破缺会在我们所处的低能世界中产生可观测的微小效应,比如真空光速的改变、光子衰变的发生以及双光子湮灭到正负电子对过程的阈能量“反常”等等^[9]。这些新物理现象往往难以在地面实验室中进行检验,于是一些高能天体物理过程就成为检验洛伦兹破缺的绝佳平台。最典型的例子就是检测高能光子的传播速度是否与低能光的速度(也就是我们常说的光速)有微小的差别(图1)。具体来讲,高能光子速度稍微超过低能光速的称为超光速型洛伦兹破缺,而高能光子速度稍微低于低能光速的称为亚光速型洛伦兹破缺。这些高低能光子的非常微小的光速差别难以在地球实验室内检测,而通过宇宙学距离长期传播的

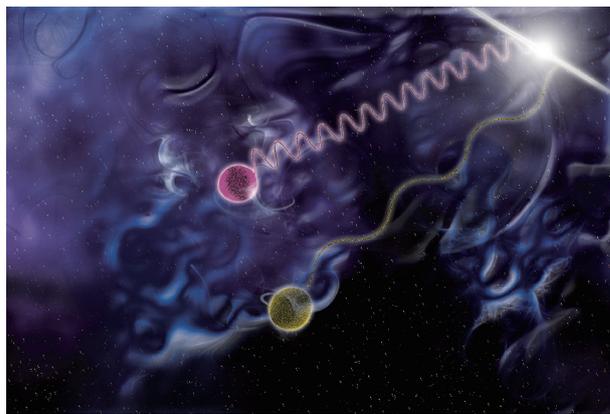


图1 相对论假设光子总是以相同的速度(即真空光速)传播,并遵循相同的物理规律。然而一些弦理论模型预言在细小的尺度上,时空本身充满量子引力涨落。这些“时空泡沫”会减慢波长较短的高能量光子(红色圆点)的传播速度,使得真空光速与光的能量或频率有关,而非一个常数。经过漫长宇宙距离的积累,在源处同时发射的高低能光子到达观测者时会出现可观的时间差(图片来源于NASA/Sonoma State University/Aurore Simonnet)

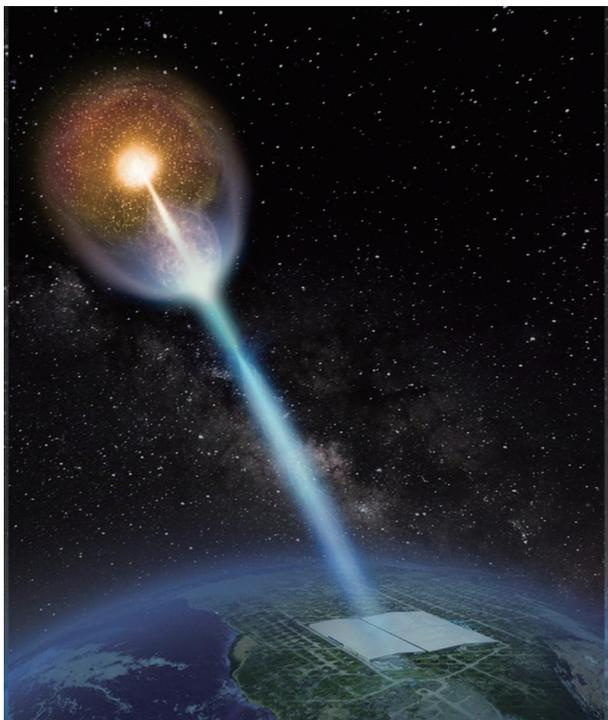


图2 2022年10月9日,中国“拉索”完整地记录了迄今最亮伽马暴 GRB 221009A 高能辐射全过程的示意图。这次观测打破了伽马射线暴光子最高能量、最亮伽马射线等人类观测宇宙中伽马射线暴的多项记录(图片来源于 LHAASO 合作组)

积累,来自于宇宙的高低能光子的细微速度差就有可能表现为可观的到达时间差而被观测到^[10-14]。

借助此次 LHAASO 探测到的迄今为止最高能量的宇宙光子,一些研究^[5-8]对洛伦兹不变性破缺做出更高精度的检验或限制。特别地, LHAASO 合作组在其发表于《物理评论快报》的一项研究^[5]中对超光速型的洛伦兹破缺导致的光子衰变过程(即光子衰变到一对正负电子或衰变到三个伽马光子)进行了细致分析,并将洛伦兹对称性破缺的能量标度提高了约十倍。这是对这一类洛伦兹对称性的最严格检验,也在一定程度上再次验证了爱因斯坦相对论的时空对称性。文献[6, 7]中也同样指出, LHAASO 观测到的这些超高能光子可助力洛伦兹不变性检验方面的研究。按照标准模型,高能光子是稳定的,如果允许洛伦兹对称性破缺,高能光子就可能衰变为正负电子对或者多个伽马光子。由测得高能光子的最高能量可以对洛伦兹破缺参数给出约束。结果显示^[6, 7],

LHAASO 对 1.4 PeV 光子事例的探测将导致对超光速型的线性洛伦兹破缺能标的限制被提高到约 2.7×10^{24} GeV, 超出普朗克能标(约 10^{19} GeV)大约五个量级,进而可以对预言超光速光子传播的理论模型做出更强的限制。这些结果进一步排除了光子的超光速洛伦兹对称性存在破缺的可能性。

不过,上述结果并没有限制所谓的亚光速型的洛伦兹不变性破缺,也就是高能光子在真空中的传播速度略小于低能光子的图景。事实上,结合先前基于伽马射线暴光子到达时间延迟的分析^[10-14],文献[6, 7]指出 LHAASO 对超高能伽马光子的观测有可能支持一个亚光速型的洛伦兹破缺,这是因为按照标准模型,能量高于 400 TeV 的高能光子在宇宙距离的传播中会与宇宙背景光子发生正负电子湮灭过程而被吸收,因此, LHAASO 测得超过 1 PeV 的极高能光子就是令人惊奇的。但如果允许亚光速的洛伦兹破缺,高能光子与背景光子发生的正负电子湮灭反应会被禁戒,从而可以在宇宙传播中被观测到^[6, 7, 15]。为此,文献[6, 7, 15]提议在未来进一步搜寻来自银河系外的 PeV 宇宙光子,以此作为对亚光速洛伦兹不变性破缺的一个重要检验。此外,目前光子部分洛伦兹破缺的诸多唯象观察,包括上述 LHAASO 实验给出的最新结果,都可以在一种以弦理论为基础的时空泡沫模型中得到理解^[16, 17]。这类模型预言微小尺度下的时空不再光滑,而是呈现由量子引力效应导致的随机“泡沫状”涨落。泡沫化的量子时空在局域上破缺严格的洛伦兹对称性,从而对光子在真空中的传播产生影响^[18]。圈量子引力理论也预言了光子的洛伦兹破缺^[19]。研究表明,这类理论能很好地匹配 LHAASO 关于 PeV 光子的观测结果。借助 LHAASO 丰富的观测数据,人们对时空洛伦兹对称性做出更加严格的检验,同时也有望对某些量子引力模型给予支持^[6, 7, 16-19]。

2022年10月9日,史上地球接受亮度最强的伽马暴 GRB 221009A 被大量伽马天文观测设施观测到(图2)。LHAASO 合作组探测到来自该伽马暴的数万个能量在 200 GeV 以上的高能光子,其中

最大能量可接近 18 TeV^[2, 3]。这些观测结果打破了伽马射线暴光子最高能量、最亮伽马射线等人类观测宇宙中伽马射线暴的多项记录。这是国际上首次探测到 10 TeV 量级的伽马暴光子, 这个结果对研究伽马暴的高能机制和超出标准模型的新物理提供了契机。根据标准模型, 高能光子在宇宙传播过程中, 会与星系间背景光子湮灭生成正负电子对, 从而阻止来自遥远星体超出阈值的高能光子的探测^[15]。但洛伦兹破缺使得高能光子与背景光子的湮灭反应被禁戒, 从而超出阈值的高能光子也能在宇宙中传播^[15]。文献[20]在该伽马暴发生的第二天就根据事先的理论预言^[15]和具体数值计算^[21]发文分析指出, 虽然该伽马暴的红移距离属于偏小的 $z = 0.1505$, 但根据标准模型的计算, 大于 18 TeV 的高能光子在传播过程中就应该被星系间背景光子吸收而不能到达地球, 发现来自伽马暴的超过 10 TeV 光子就可能意味着洛伦兹对称性破缺或新物理存在的可能性。因此, LHAASO 的伽马暴数据为国际同行开展对洛伦兹对称性破缺和新物理研究提供了新契机。

LHAASO 合作组对伽马暴 GRB 221009A 数据的细致分析表明^[4], 测得的最高能量的伽马光子只能限定在 10 TeV 以上, 由此可以结合其他分析对洛伦兹破缺参数给出比较强的限定^[4, 22-24]。因此, 洛伦兹破缺只是一种微弱的可能性, 暗示着也存在其他新物理机制的可能性, 类轴子粒子就是其中一种。类轴子粒子是一种假说中存在的极轻的赝标量玻色子, 能在磁场中与光子耦合并相互转化。此性质是在实验中检验类轴子存在的重要探索手段之一, 而此前未有确切的实验证据证明类轴子的存在。

用轴子粒子与光子转化的机制可以解释 LHAASO 观测到超出 10 TeV 光子的反常现象^[25, 26]: 在穿过源星系的磁场时, 高能光子在磁场作用下转换为轴子与光子的混合束, 经过星系间区域时, 高能光子被银河外的星系背景光吸收, 而对应的轴子不参加与背景光的反应。最终, 在穿过银河系磁场到达地球观测者之前, 轴子可以与银河系磁场反应转换为高能光子, 从而能够被

地球上的观测者观测到存在 10 TeV 量级的高能光子。通过对 LHAASO 实验数据的细致分析, 可以对轴子质量和耦合参数的取值范围给出进一步的约束^[3, 26]。

LHAASO 的实验结果不仅可以开展对光子相关的洛伦兹对称性破缺和新物理的研究, 也可以用于开展对其他粒子的洛伦兹破缺研究。例如, LHAASO 合作组通过分析来自蟹状星云的 PeV 量级的高能光子, 得到了高能光子能量与其产生源处母电子能量之间的关系^[27]。由此可以得到, 对于 1.12 PeV 的蟹状星云高能光子, 其母电子能量高达 2.3 PeV。基于这一假设, 文献[28]获得的对电子超光速线性洛伦兹破坏的约束高达 10^{25} GeV 量级。在这一研究基础上, 文献[29, 30]对光子衰变和电子衰变反应开展联合研究, 从而得到了对光子及电子洛伦兹破缺参数的联合约束。

上面的研究表明, LHAASO 合作组的成果为同行们开展相对论检验并探索新物理的各种研究提供了丰富的素材。相信在不远的将来, 我国的 LHAASO 宇宙线实验站会源源不断地探测到更丰富的高能天文现象。这些观测将能够为人们破解宇宙线起源、探索普朗克尺度的洛伦兹不变性及探索新物理机制提供全新的视角, 并取得开拓性的进展, 为物理学和天文学的深入发展做出更多的贡献。

参考文献

- [1] Cao Z *et al* (LHAASO Collaboration). *Nature*, 2021, 594: 33
- [2] Huang Y, Hu S, Chen S *et al*. LHAASO observed GRB 221009A with more than 5000 VHE photons up to around 18 TeV. *General Coordinates Network*, 2022: 32677
- [3] Cao Z *et al* (LHAASO Collaboration). *Science*, 2023, 380 (6652): 1390
- [4] Cao Z *et al* (LHAASO Collaboration). *Chin. Phys. C*, 2022, 46: 035001
- [5] Cao Z *et al* (LHAASO Collaboration). *Phys. Rev. Lett.*, 2022, 128: 051102
- [6] Li C, Ma B Q. *Phys. Rev. D*, 2021, 104: 063012
- [7] Li C, Ma B Q. *Sci. Bull.*, 2021, 66: 2254
- [8] Chen L, Xiong Z, Li C *et al*. *Chin. Phys. C*, 2021, 45: 095104
- [9] He P, Ma B Q. *Universe*, 2022, 8(6): 323
- [10] Shao L, Xiao Z, Ma B Q. *Astropart. Phys.*, 2010, 33: 312
- [11] Xiao Z, Ma B Q. *Phys. Rev. D*, 2009, 80, 116005

- [12] Xu H, Ma B Q. *Astropart. Phys.*, 2016, 82: 72
 [13] Xu H, Ma B Q. *Phys. Lett. B*, 2016, 706: 602
 [14] Xu H, Ma B Q. *JCAP*, 2018, 01: 050
 [15] Li H, Ma B Q. *JHEAp*, 2021, 32: 1
 [16] Li C, Ma B Q. *Phys. Lett. B*, 2021, 819: 136443
 [17] Li C, Ma B Q. *Results in Physics*, 2021, 26: 104380
 [18] Li T, Mavromatos N E, Nanopoulos D V *et al.* *Phys. Lett. B*, 2009, 679: 407
 [19] Li H, Ma B Q. *Phys. Lett. B*, 2023, 836: 137613
 [20] Li H, Ma B Q. *Astropart. Phys.*, 2023, 148: 102831
 [21] Li H, Ma B Q. *Eur. Phys. J. C*, 2023, 83: 192
 [22] Li H, Ma B Q. *JCAP*, 2023, 10: 061
 [23] Li H, Ma B Q. *Mod. Phys. Lett. A*, 2024, 39(04): 2350201
 [24] Cao Z *et al* (LHAASO Collaboration). Stringent tests of Lorentz invariance violation from LHAASO observations of GRB 221009A. 2024, arXiv:2402.06009
 [25] Zhang G, Ma B Q. *Chin. Phys. Lett.*, 2023, 40: 011401
 [26] Wang L, Ma B Q. *Phys. Rev. D*, 2023, 108: 023002
 [27] Cao Z *et al* (LHAASO Collaboration). *Science*, 2021, 373: 425
 [28] Li C, Ma B Q. *Phys. Lett. B*, 2022, 829: 137034
 [29] He P, Ma B Q. *Phys. Lett. B*, 2022, 835: 137536
 [30] He P, Ma B Q. *Phys. Rev. D*, 2023, 108: 063006

读者和编者

Q&A

Q: 为什么电子层的命名是从K开始而不是从A开始?

A: 这是一个历史问题。

在了解原子结构之前,人们已经研究了原子光谱。重金属元素靶在受到高能电子轰击时会放出X射线(比如现代物理实验室中使用的X射线,典型参数是40 kV加速电压、40 mA电子束流强,Cu靶或Mo靶),随着电子束能量的变化,同种元素的靶可以产生多种不同频率的特征X射线。最开始人们把这些X射线按波长从短到长依次命名为A、B、C线……但是后来人们意识到,可能还有能量更高(也就是波长更短)的射线尚未被发现,于是改用从中间字母开始排序,即K、L、M…,而将A—J空出。注意,直到这时我们还在聊原子光谱,并没有牵涉电子壳层。

几十年后,人们了解了原子的内部结构,也理解了X射线特征谱线本质是外来电子将内层电子激发后,原子的外层电子向内层空穴跃迁,同时以光子形式释放的能量。而K、L、M线分别是原子外层电子向最内层、次内层、第三内层的空穴跃迁时释放出的,因此就把原子从内到外的第一、二、三层电子分别叫做K层、L层和M层了。当然,K系X射线还可以细分成 K_{α} 、 K_{β} 等

Q: 量子纠缠能否传递信息?如果能的话,信息的传递速度是否超过了光速?

A: 量子纠缠可以传递信息,但无法实现超光速的信息传递。量子纠缠态是用“一个”波函数来描述两个(或多个)量子整体。例如,粒子a、b纠缠态的波函数

表示为

$$|\Psi\rangle_{ab} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_a |1\rangle_b + |1\rangle_a |0\rangle_b)$$

这个波函数给了我们一些信息,等式右边的系数代表波函数的归一性,括号内第一项说明粒子a处于0态且粒子b处于1态,第二项说明粒子a处于1态且粒子b处于0态,加号(叠加态)说明两个粒子既有可能处于第一项描述的状态,也有可能处于第二项描述的状态,两种可能性等权。

信息是对不确定性的消除。测量前,我们就已经知道这两个粒子分别都能具有两种可能的状态(0态和1态),而且两个量子的状态是不同的,如果一个为1态,另一个就是0态。而测量过程只是让这两种可能性中的一种表现了出来,也就是让波函数中的某一项随机显示。

当知道了纠缠态的波函数,在测量前获得的信息让我们消除了一点不确定性;在测量纠缠态的过程中,两个粒子的状态是随机塌缩到波函数中的任意一项,因此我们并没有获得新的对不确定性的消除。我们获得的信息是关于两个粒子的整体,而对于其中某一个粒子的状态是不确定的,也就是说测量过程并不能传递确定性信息。

由于进行了测量,量子纠缠的两个粒子会瞬间塌缩到0态或1态,但这个过程不存在信息传递,所以不存在超光速通讯。当我们获取量子整体的纠缠态信息,这个过程是可以传递信息的,利用量子纠缠实现信息传递涉及到量子纠缠态的制备、操控和测量,但仍然受到光速的限制,因为纠缠态信息的传输必须借助经典信道。