

LHAASO 观测对洛伦兹不变性破缺的检验前景

魏俊杰 吴雪峰

(中国科学院紫金山天文台 210034)

爱因斯坦狭义相对论是现代物理的重要基石之一,在天文学乃至基础物理学领域中有着非常广泛的应用,因此检验狭义相对论基本假设(如洛伦兹不变性假设)的正确性具有基本物理意义。当地面实验室受到各种条件制约的时候,一些发生在宇宙学距离上的短时标的高能爆发现象无疑为我们提供了检验洛伦兹不变性假设的最佳实验平台。而高能天文现象的成功捕获,则需要借助高性能望远镜的观测,比如我国正在建设的位于四川省甘孜州稻城县(海拔 4400 米)的高海拔宇宙线观测站项目(Large High Altitude Air Shower Observatory,英文简称 LHAASO)。

1. 空间和时间不是连续的,而是量子化的?

一百多年前,绝大多数人还停留在物质是连续的意识层面上。尽管很早以前一些哲学家和科学家就曾经推测如果把物质分解成足够小的块,会发现它们是由微小的原子组成,但是几乎没有人认为原子的存在能够被证实。而如今我们已经可以得到单个原子的图像,更是详细研究了组成原子的粒子。物质的粒子性已经是过时的新闻了。

同样,空间和时间通常被认为是连续的,但我们不禁要问:时空是否也以离散形式存在?事实上,近几十年来物理学家和数学家们一直在探讨这类问题。空间是连续的,还是像一块布那样由根根纤维编织而成的?如果能探测到足够小的尺度,我

们是否能看到体积不能再被分割成更小形态的空间“原子”?对时间来说,自然界是连续变化的,还是像数字计算机那样以一系列微小的步伐在进化?为了理解最小尺度下的空间结构,科学家们逐步建立起了一些预言时空是由离散块组成的量子引力理论。这些理论认为,时空是不能无限分割的,时空也存在着不可分割的基本结构单元。长度的最小单元被认为是普朗克长度(大约 10^{-35} 米),时间的最小单元被称为普朗克时间(大约 10^{-44} 秒),低于这两个值的时空是无法达到的,也是没有意义的。在这些理论下,时空是不连续的,而是量子化的。时空流逝就像放电影一样,一帧一帧叠加起来,看上去是连续的,实际上是以人类察觉不到的微小单元在前进。如果我们逐级放大空间区域,宏观看似平滑的时空在最微观尺度上失去了意义,没有上下左右前后之分,而是充满随机的呈现“泡沫”状的量子涨落(参见图 1)。

2. 什么是量子引力理论?

首先让我们来了解一下引入量子引力理论的背景。迄今为止,人类已经发现了自然界的四种基本相互作用:引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。创立于 20 世纪初期的量子力学是描述微观物质的理论,它的发展彻底改变了人们对物质结构及其相互作用的认识。除了引力之外,其他三种基本相互作用均可以在量子力学的框架内描述。目前描述物质间引力相互作用的最精

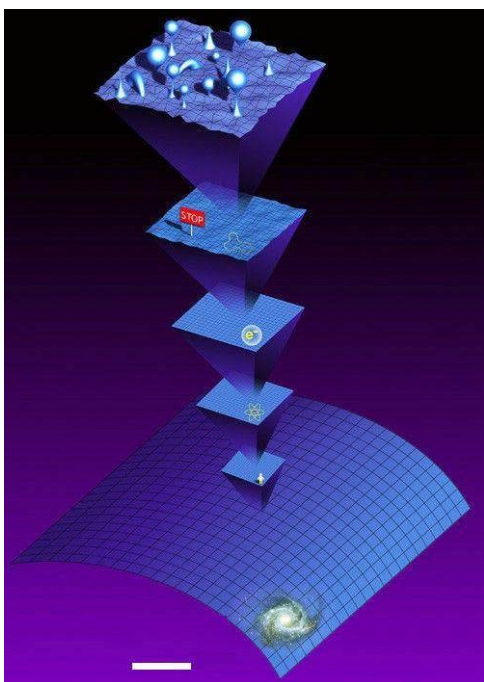


图1 逐级放大空间区域的示意图(图片取自网络)

确理论是爱因斯坦创立的广义相对论,该理论首次把引力场解释成时空的弯曲。量子力学和广义相对论由于它们各自被令人惊叹的实验验证以及理论上的优美,很快得到人们的承认和赞赏,这两个理论更是成为现代物理学的两大支柱。

目前,物理学家试图要做的就是将四种基本相互作用结合在一起,创立一种能够描述一切的大统一模型。量子引力理论就是这样一种理论,它想要把广义相对论量子化,进而统一包括引力在内的四种基本相互作用。然而,如何将量子理论中的概念应用到广义相对论的框架中仍然是一个未能解决的问题。量子理论和广义相对论就像两个国家的国王,各自管理着自己的王国,而且他们把自己的王国都建设的非常好,彼此之间也秋毫无犯。但是有一天,你邀请两个国王过来,商量建立一个统一的联合王国。结果你发现一切太难了,除了语言障碍外,还有很多地方无法融合。虽然广义相对论与量子力学并未完全融合,但人们相信存在一个更基本的量子引力理论,用它可以统一描述引力与量子物理。当前主流量子引力模型有:超弦理论、圈量子引力理论等。对这些模型感兴趣的读者可以自

己去查阅相关的参考文献,这里我们就不赘述了。

3. 洛伦兹不变性假设

洛伦兹不变性是爱因斯坦狭义相对论的基本假定。它的定义是一个非加速物理系统在作洛伦兹变换(旋转和平移)时,其中的相关物理规律不会改变。然而,当理论物理学家试图统一量子力学和广义相对论时,他们发现洛伦兹不变性的假设在普朗克能标($E_{\text{Planck}} \approx 1.22 \times 10^{19}$ GeV)或者普朗克尺度上(约 10^{-35} 米)需要被打破,即所谓的洛伦兹不变性破缺。因此对洛伦兹不变性的精确检验被认为是指向一条通往正确的统一理论模型的道路。近年来,围绕洛伦兹不变性是否存在破缺的问题,在高能天体物理等诸多领域掀起了广泛讨论,已成为研究热点。

正如第一节里所介绍的,量子引力模型预言普朗克尺度下的时空不再光滑,而是呈现离散的量子化“泡沫”结构。泡沫化的量子时空等效于一种色散介质:由于低能光子的波长较长,它们在穿越泡沫化量子时空时,传播速度基本不受影响;而高能光子由于波长较短,它们在其中传播的速度要比低能光子要小一点点(也有模型认为高能光子速度比低能光子高一点点,这种情况下,高能光子是超光速的),参见图2。因此,洛伦兹不变性破缺会导致光子在真空中的群速度 v 不再是常数 c ,而是跟光子的能量 E 有关。能量越高的光子受时空量子化泡沫结构的影响越大,其传播速度也越慢。洛伦兹不变性破缺所引起的光子色散关系可以近似为

$$\left| \frac{v}{c} - 1 \right| \approx \left(\frac{E}{E_{QG,n}} \right)^n (n+1)/2, \text{ 式中的 } E_{QG,n} \text{ 是待限制的量子引力能标。}$$

如果限制得到的量子引力能标大于普朗克能标,那么我们就可以排除洛伦兹不变性破缺的可能性,进而排除预言洛伦兹不变性存在破缺的一些量子引力模型。

光子色散关系的存在,意味着同时发出的不同能量光子到达观测者的时间是不一样的。对于一阶(线性, $n=1$)和二阶($n=2$)洛伦兹不变性破缺来说,

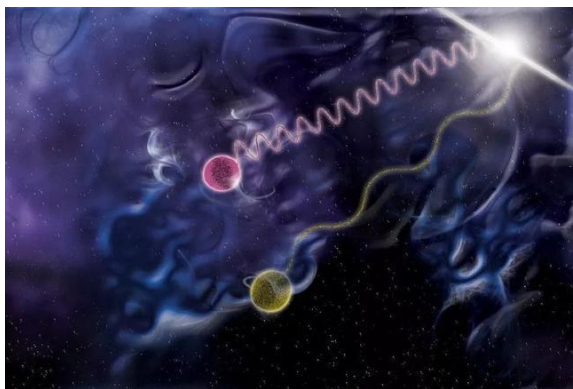


图2 不同能量的光子在呈泡沫状的极小尺度时空下传播速度不同的示意图

(图片来源: NASA/Sonoma State University/Aurore Simonnet)

不同能量光子的到达时间差分别是 $\Delta t = \left(\frac{\Delta E}{E_{QG,1}} \right) d/c$

和 $\Delta t = (\Delta E/E_{QG,2})^2 3d/2c$, 其中 ΔE 是两个光子之间的能量差值, d 是发射源的距离。我们只要将观测到的相关参量代入到这两个式子, 就可以推算出一阶和二阶量子引力能标。从这两个式子还可以明显看出, 为了使限制得到的量子引力能标更加接近或者大于普朗克能标, 我们应该尽可能选择那些持续时标很短、光子能量很高、且发生距离很远的天文现象来检验洛伦兹不变性破缺。

LHAASO 项目为中国发改委“十二五”大科学装置规划项目, 是大型高海拔宇宙线观测站, 它的核心科学目标是探索高能宇宙线起源以及相关的宇宙演化、高能天体演化和新物理前沿的研究。LHAASO 观测站主要有两个子探测器阵列可用于伽马射线天文观测, 探测能量范围在 $10^{11} \sim 10^{15}$ eV 之间。其中水契伦科夫探测器阵列(WCDA)用于探测能量在 0.1~10 TeV 范围内的光子, 平方千米阵列(KM2A)用于探测能量在 10 TeV 以上的光子。对于能量 > 30 TeV 的伽马射线, LHAASO 相较于其他现有望远镜而言是灵敏度最高的伽马射线望远镜。由于具有较高的灵敏度和较大的能量探测范围, LHAASO 将来完全有能力探测到相当数目的高能伽马射线辐射源。借助 LHAASO 将来可能探测到的丰富的高能天文现象, 人们有望对洛伦兹不变性

破缺作出更高精度的检验。

4. 洛伦兹不变性破缺的现有天文学检验

通过比较来自同一天体的不同能段光子之间的到达时间差, 人们可对洛伦兹不变性破缺作出检验。值得强调的是, 该方法的应用前提是假设天体在不同能段上的辐射是同时发出的。在具体的资料处理时, 科学家们往往选取有短时标光变或周期的天体辐射来限制洛伦兹不变性破缺, 因为只有这样才能较为准确地找到天体同一时刻发出的辐射在不同光子能段光变曲线上所对应的观测者时间。目前, 伽马射线暴、耀变体等高能天文现象已被广泛地用来限制洛伦兹不变性破缺。

4.1 伽马射线暴

伽马射线暴(伽马暴, Gamma-Ray Burst, GRB)是在短时标内来自宇宙深处的伽马射线突然增强的一种爆发现象。根据其持续时间的长短, 伽马暴通常可以分为长暴(持续时间大于 2 秒)和短暴(持续时间小于 2 秒)两类。伽马暴作为宇宙中最为明亮的天体, 人们可以观测到发生在很高红移处的伽马暴。

由于伽马暴持续时标很短、光子能量很高、且发生在很远的宇宙学距离上, 因此它们被认为是检验洛伦兹不变性破缺的最理想探针。2008 年, 费米伽马射线空间卫星的大面积望远镜(LAT)探测到了长暴 GRB 080916C 的高能辐射。利用该暴最高能光子(13.2 GeV)相对 MeV 光子 16.5 秒的到达时间差, Abdo 等人^①给出了一阶量子引力能标的新限制 1.3×10^{18} GeV。这一结果比先前使用同类方法的最佳限制值还要高出一个量级, 但比普朗克能标 (1.22×10^{19} GeV) 还是低一个量级。与长暴相比, 持续时标更短的短暴更适用于限制洛伦兹不变性。利用短暴 GRB 090510 最高能光子(31 GeV)相对触发时刻低能光子的到达时间差(远小于 1 秒),

Abdo 等人^②第一次给出了一阶破缺下量子引力能标超越普朗克能标的限制,达到了 $E_{QG,1} > (1\sim 10) E_{\text{Planck}}$ 。由于洛伦兹不变性破缺是发生在普朗克尺度上的,这一结果基本上排除了一阶破缺的可能性。即使洛伦兹不变性破缺确实存在,那它也只可能是高效效应,不会很显著。随后又有工作^③使用3种不同的技术分析了4个伽马暴的光子色散,将限制精度提高了若干倍,不过迄今为止最好的限制结果仍旧来自短暴 GRB 090510。

虽然洛伦兹不变性破缺的限制已经达到很高的精度,但是这些限制通常是依赖于单个最高能光子(Fermi/LAT 探测到的 GeV 光子)的时间延迟,限制比较粗糙,而且需要假设不同能量光子是同时发出的。然而,伽马暴观测上的时间延迟除了有来自洛伦兹不变性破缺效应的贡献之外,还有内禀时间延迟的贡献。这里的内禀时间延迟指的是伽马暴不同频率的信号不是同时发出的,有可能伽马暴先辐射出高能光子后辐射出低能光子,也有可能是低能光子比高能光子先被辐射出来。内禀时间延迟问题会影响人们对洛伦兹不变性破缺检验结果的可靠性。Ellis 等人^④首次提出了缓解内禀时间延迟问题的方法,他们通过分析大样本的伽马暴能谱时延数据,对内禀时间延迟的统计平均值和一阶量子引力能标作出同时限制。2017年,魏俊杰等人^⑤发现 GRB 160625B 是迄今为止唯一一个能谱时延数据丰富、存在从正延迟转变到负延迟特征的伽马暴,他们提出 GRB 160625B 的能谱时延转折特征可对洛伦兹不变性破缺作出全新的限制。基于 GRB 160625B 不同能段的光变曲线,他们分析得到了其他高能段和最低能段光变之间的达到时间差。他们认为观测时间延迟既来自内禀时间延迟的贡献,又来自洛伦兹不变性破缺效应所造成的时间延迟的贡献,并且假设内禀时间延迟和光子能量呈现正相关。通过对 GRB 160625B 能谱时延数据的拟合(参见图3),他们对一阶、二阶洛伦兹不变性破缺作出了强有力的保守限制。与此同时,他们还首次给出了内禀时间延迟关于光子能量的合理表达式。

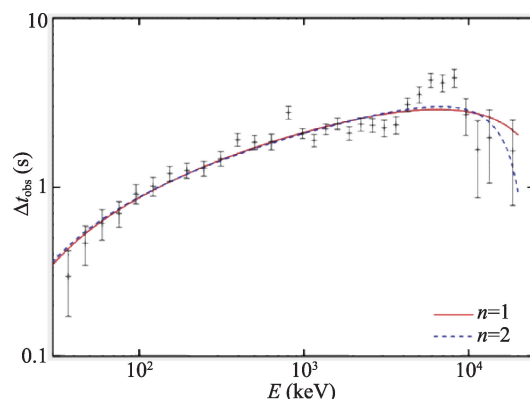


图3 相对最低能段的能谱延迟随能量的演化以及一阶、二阶洛伦兹不变性破缺理论模型的最佳拟合曲线(图片来源^⑤)

该工作提出了新颖的分析方法,对目前的量子引力研究领域有一定的参考意义,并且相比通常采用的条件性限制,该方法对该领域的发展更有价值。

4.2 TeV 耀变体

目前人类所发现的河外甚高能($E > 100$ GeV)伽马射线源,或称为 TeV 源,绝大部分是耀变体(Blazar)。耀变体是活动星系核的一个极端子类,它又可进一步细分为两个子类:平谱射电类星体和蝎虎天体,前者具有强的宽发射线辐射,后者只有弱的、甚至没有宽发射线辐射。耀变体主要以非热辐射为主,从射电波段到高能和甚高能伽马射线波段都有辐射,几乎贯穿整个电磁波段。通常认为这些辐射产生于黑洞附近的相对论性喷流,喷流方向又近乎指向地球,表现出高光度、视超光速运动及快速光变等观测特征。

由于流量变化迅速且起源于宇宙学距离,来自 TeV 耀变体的极高能光子也被认为是检验洛伦兹不变性破缺的有效探针。值得指出的是,不管是用伽马暴还是用 TeV 耀变体限制洛伦兹不变性破缺都是非常有意义的。伽马暴可在更远的宇宙学距离上被探测到(最高红移 z 可达 8 以上),但是它的高能($E > \text{GeV}$)光子数目比较有限。而 TeV 耀变体则可观测到非常多的且能量大于几十 TeV 的高能光子,但是由于极高能光子会被河外背景光经双光子湮灭反应所吸收,所以 TeV 观测仅限于来自低红移辐射源。因此,伽马暴和 TeV 耀变体在限制洛伦兹

不变性破缺方面可以说是相辅相成的,它们可以用来检验不同的能量和红移范围。

迄今为止,TeV耀变体对洛伦兹不变性破缺的最高精度检验是来自PKS 2155-304的观测。2006年7月28日,HESS实验项目探测到了PKS 2155-304的一个极高能耀发。Aharonian等人^⑥详细分析了该耀发200~800 GeV和>800 GeV两个能段光变曲线之间的到达时间差(参见图4),结合红移 $z = 0.116$,他们给出了一阶破缺和二阶破缺下量子引力能标的限制结果分别为 $E_{QG,1} > 7.2 \times 10^{17}$ GeV和 $E_{QG,2} > 1.4 \times 10^9$ GeV。随后又有工作^⑦提出了分析时间延迟的改进方法,进一步将一阶破缺和二阶破缺下量子引力能标的限制精度提高到了 $E_{QG,1} > 2.1 \times 10^{18}$ GeV和 $E_{QG,2} > 6.4 \times 10^{10}$ GeV。

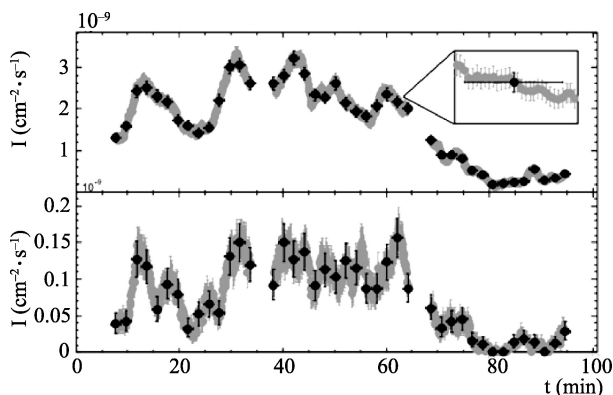


图4 HESS观测到的PKS 2155-304在2006年7月28日的极高能耀发。上方和下方分别对应200~800 GeV和>800 GeV两个能段的光变曲线(图片来源^⑥)

5. LHAASO观测检验洛伦兹不变性破缺的前景

在本章节里,我们将估算LHAASO对伽马暴和TeV耀变体的探测前景,并且预测它们对洛伦兹不变性破缺的可能限制精度。

最近,MAGIC实验项目探测到了第一例来自伽马暴GRB 1909114C的TeV辐射,在Swift卫星触发该暴50秒之后,他们探测到了能量大于300 GeV以上的辐射^⑧。MAGIC的成功探测,使得我们更加

期待未来LHAASO对伽马暴TeV辐射的探测。LHAASO-WCDA的可探测能量范围为0.1~10 TeV,非常适合用于探测能量在100 GeV以上的伽马暴光子。建成之后的WCDA面积可达78000平方米,但是由于WCDA的有效探测面积取决于光子能量以及入射光子的天顶角,而且在低能端有效面积大为下降,因此它对100 GeV以上光子的有效探测面积大概只有3000平方米,不过仍然比Fermi/LAT望远镜的探测面积大3000倍。也就是说,LHAASO-WCDA在>100 GeV能段的探测灵敏度要远大于Fermi/LAT。当前Fermi/LAT已经探测到了来自伽马暴的~100 GeV光子,灵敏度更高的LHAASO-WCDA也完全有能力探测到这样的光子。假设伽马暴的能谱为幂律形式,可以描述为 $dN(E)/dN \propto E^{-\beta}$,其中高能段的光子谱指数为 $\beta \approx 2.0$,那么单位探测面积可以探测到的能量大于E的光子数目就是 $N(>E) = \int_E^\infty dN(E)/dE \times dE$ 。由此,我们可以求出>100 GeV与>1 GeV能段的光子数比值为 $\frac{N(>100 \text{ GeV})}{N(>1 \text{ GeV})} = 100^{1-\beta} = 0.01$ 。假设对每个高能伽马暴,Fermi/LAT可以探测到约10个能量大于1 GeV的光子,那么LAT应该探测到0.1个能量大于100 GeV的光子。因此,LHAASO-WCDA探测到能量大于100 GeV的光子数目应该是300个。由于LHAASO-WCDA可以探测到数目众多的>100 GeV高能光子,我们有望构造出时间分辨率较高的伽马暴高能(>100 GeV)光变曲线。

前面提到,现在Fermi/LAT观测到的高能光子已经可以高精度限制洛伦兹不变性破缺,来自短暴GRB 090510的最高能光子更是基本排除了一阶破缺的可能性。但必须指出的是,短暴GRB 090510的限制结果并没有得到其他长暴的支持。长暴和短暴所得结果不一致,主要是因为Fermi/LAT接收到的长、短暴高能光子数目非常有限,我们没法构造高分辨率的高能光变曲线,只能依赖于单个最高能光子,并且只能保守地取最高能光子相对于低能触发的时间延迟作为到达时间差;此外由于长暴持

续时间比较长,长暴的最高能光子相对于低能触发的时间延迟也就比较长(大约10秒左右;短暴的时间延迟大约1秒左右),较长的时间差会削弱长暴限制洛伦兹不变性破缺的能力。Fermi/LAT探测到的长暴最高能光子一般是50 GeV左右,长暴的典型红移是 $z = 1$,由此对一阶破缺和二阶破缺下量子引力能标的限制结果分别是 2.5×10^{18} GeV和 1.7×10^{10} GeV。考虑到LHAASO-WCDA拥有更好的灵敏度,它完全有能力探测到更多的>100 GeV高能光子,进而可以绘制出高时间分辨率的高能光变曲线。通过比较几乎处在同一时刻的伽马暴高、低能光变曲线,我们可以得到更小且更为准确的时间延迟,不再需要依赖于单个最高能光子的粗糙时间延迟,进而可对洛伦兹不变性破缺作出更加精确的限制。假设一个发生在红移 $z = 1$ 处的高能伽马暴,最高能量的光子达到了500 GeV,且其高、低能光变曲线之间的到达时间差为1秒。可以预见这样的事件完全处在LHAASO-WCDA的探测能力之内,它对一阶和二阶破缺下量子引力能标的限制结果可达 2.5×10^{20} GeV和 5.4×10^{11} GeV,显然比现有结果提高了1~2个量级。

LHAASO观测站作为高能区(30 TeV ~ 1 PeV)灵敏度最好的伽马天文探测器,未来可以实现对甚高能伽马射线源及其耀变事件的全天区、全时段搜寻,有望探测到更多的TeV耀变体,并且对它们开展时变方面的观测。与伽马暴类似,LHAASO有能力刻画出更加精细的TeV耀变体的高能光变曲线,从而得到更为精确的不同能段光变曲线之间的到达时间差。我们可以从LHAASO丰富的观测数据中挑选能量更高、时间延迟更短、距离更远的TeV耀变体来进一步提高洛伦兹不变性破缺的限制精度。

6. 总结

伽马暴、TeV耀变体等高能天文现象已被广泛

地用来限制洛伦兹不变性破缺。目前伽马暴的高能观测数据主要来自Fermi卫星的LAT望远镜的观测,而LAT望远镜受限于空间环境下局限的有效探测面积,能够接收到的伽马暴高能光子数量有限。我国的LHAASO探测器阵列具有远大于星载望远镜的接收面积,因此理论上完全有能力在几百GeV到几个TeV能段之上探测到更多的高能光子,有望给出时间分辨率较高的伽马暴高能光变曲线。由此通过比较几乎处在同一时刻的伽马暴最高能段和低能段光变曲线,可以大大地缩短不同能段光子到达时间差的上限,从而提高洛伦兹不变性破缺的限制精度。此外,LHAASO在未来的甚高能巡天和监测中,可以探测到更多的TeV耀变体,并且给出精确完整的耀变体高能光变曲线。如果未来LHAASO可以探测到能量更高、时间延迟更短、距离更远的TeV耀变体,洛伦兹不变性破缺的限制精度有望再上一个台阶。

总之,利用LHAASO观测到的伽马暴、TeV耀变体等高能天文现象,人们可以更好地检验洛伦兹不变性是否存在破缺这一基本物理问题。

参考文献

- ① Abdo, A. A., Ackermann, M., Arimoto, M., et al. 2009, *Science*, 323, 1688
- ② Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2009, *Nature*, 462, 331
- ③ Vasileiou, V., Jacholkowska, A., Piron, F., et al. 2013, *Physical Review D*, 87, 122001
- ④ Ellis, J., Mavromatos, N. E., Nanopoulos, D. V., Sakharov, A. S., & Sarkisyan, E. K. G. 2006, *Astroparticle Physics*, 25, 402
- ⑤ Wei, J.-J., Zhang, B.-B., Shao, L., Wu, X.-F., & Meszaros, P. 2017, *The Astrophysical Journal*, 834, L13
- ⑥ Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Barres de Almeida, U., et al. 2008, *Physical Review Letters*, 101, 170402
- ⑦ H.E.S.S. Collaboration, Abramowski, A., Acero, F., et al. 2011, *Astroparticle Physics*, 34, 738
- ⑧ Mirzoyan, R. et al. 2019, *GRB Coordinates Network* 23701, 1