

# 活动星系核与高能宇宙线

戴本忠 杨深邦

(云南大学物理与天文学院 650091)

宇宙线发现100年来,人们对其成分、产生和加速机制、及其传播效应进行了广泛的研究,并获得了丰富的天体物理信息,但其起源至今仍然不清楚。一般认为相对低能的宇宙线起源于银河系内,极高能宇宙线起源于河外,而作为宇宙中最明亮的河外天体,活动星系核很可能是河外宇宙线源。随着多信使观测时代的到来,我们拥有了前所未有的从整体上去理解高能伽马射线和河外极高能宇宙线最好机遇。本文将简要地回顾和讨论活动星系核与高能宇宙线起源之间的关系,并对我国即将建成的高海拔宇宙线观测站(LHAASO)研究预期进行展望。

## 一、引言

我们对宇宙的认识和了解都来自于观测天体获得的各种辐射信息,目前人们获得天体信息的渠道主要有四种,包括电磁辐射、中微子、引力波和来自地球以外的从电子、原子核到陨石等宇宙物质。

电磁辐射是来自天体的各种能量的电磁波,人们利用射电、红外、光学、紫外以及X射线和伽马射线望远镜可以获得从低能射电波段到高能伽马射线波段的全波段信号。天体电磁辐射信号的获取及其物理分析是科学家研究天体的主要手段和方法。地球的大气对射电和光学波段辐射是透明的,所以建在地面上各种射电、光学望远镜对恒星、星系、星际介质等天体的物理、化学过程进行了大量的研究。地球大气对其他波段的电磁波都是不透明的,所以一般情况下都需要空间望远镜进行观测。红外波段的研究目前主要是针对低温天体,宇宙中的高能X射线、伽马射线主要来自于一些致密

天体,如脉冲星、球状星团、活动星系核等。自20世纪70年代以来,利用空间X射线和伽马射线望远镜发现了很多X射线和伽马射线源,特别是大气切伦科夫望远镜技术的应用,我们可以在甚高能波段(30 GeV~30 TeV)观测到不同类型天体的高能辐射。

甚高能伽马射线被认为几乎完全来自于高相对论粒子与环境物质或光子场的相互作用。产生于天体极端环境条件下相对论性高能带电粒子的辐射、宇宙早期产生的重粒子以及暗物质粒子的衰变和湮灭等非热辐射过程,是研究高能宇宙线起源及加速机制、天体的相对论性非热辐射过程的主要探针,也是研究伽马射线暴(GRB)、洛伦兹破坏及间接测量暗物质粒子等的重要手段,还可用来测量河外背景光子场、星系际磁场及哈勃常数等重要宇宙学参数。

引力波是1915年爱因斯坦广义相对论预言的宇宙时空扰动产生的引力辐射。在理论预言100年以后,北京时间2015年9月14日美国激光干涉引力波天文台(LIGO)第一次观测到了遥远星系中两个分别为36和29倍太阳质量的黑洞并合为62倍太阳质量黑洞所产生的引力波辐射,该事件获得2017年度诺贝尔物理学奖。随后在2017年8月17日,LIGO和欧洲激光干涉引力波天文台(Virgo)共同探测到1.3亿光年外的双中子星合并产生的引力波辐射,伴随着引力波辐射同时观测到了电磁辐射,这也是人类首次直接探测到引力波电磁对应体。探测到电磁对应体是天文学家期待已久的重大发现,在天文学以及物理学发展史上具有划时代的意义,正式开启了多信使天文学时代,有助于我们对宇宙的认识。

高能宇宙线在加速和传播过程中都可能产生高能中微子,中微子不带电,在宇宙磁场中不受磁

场的偏转,可以直接反推源的方向,因而可以作为寻找宇宙线源的理想“信使”。2017年9月22日,南极冰立方 IceCube 探测到了一个能量为 300 TeV 的高能宇宙中微子,这个中微子可能来自于已知的距离地球大约 40 亿光年的耀变体。

从电磁辐射到引力波再到高能中微子的探测,我们获得了更多来自宇宙的信息,让我们可以更全面的了解天体和宇宙,也让我们对天空中最强大的天体和事件有了更重要的新见解。随着多信使观测时代的到来,我们也迎来了研究一些困扰已久的难题的最好时机,如宇宙线及其起源问题。极高能宇宙线起源的最可能候选者之一的活动星系核的研究,在这个时代中很有可能会取得突破性的进展,从而让我们重新认识这一类河外极端天体。

## 二、宇宙线及其基本性质

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子流的总称,

包括以质子为主的各类元素的原子核、电子、中微子、高能光子(X、 $\gamma$ 射线)、其他可能的未知粒子。其中 90% 是质子,9% 氦核,1% 其他重核。

自 1912 年发现宇宙线以来,人们对宇宙射线的成分、产生和加速机制及其传播效应等进行了广泛的研究,获得了丰富的天体物理信息,同时通过宇宙线实验相继发现了正电子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子等基本粒子,为科学家提供了天然高能粒子,在加速器出现以前推动了粒子物理的飞速发展。但宇宙线起源问题依然困扰着我们,因此宇宙线起源问题被列为 21 世纪的 11 大科学难题之一<sup>①-③</sup>。

一百多年来,利用各种直接和间接探测手段,我们已经获得了从低能  $10^9$ eV 到最高可达  $10^{20}$ eV 的宇宙线。能量大于  $10^{13}$ eV 宇宙线能谱如图 1 所示。

宇宙线能谱总体上可以用一个幂律谱( $\propto E^{-\gamma}$ )来描述,但由于幂律谱指数  $\gamma$  的变化形成了一些特殊的能谱结构,分别是在  $10^{15}$ ~ $10^{16}$  eV 的“膝区”和

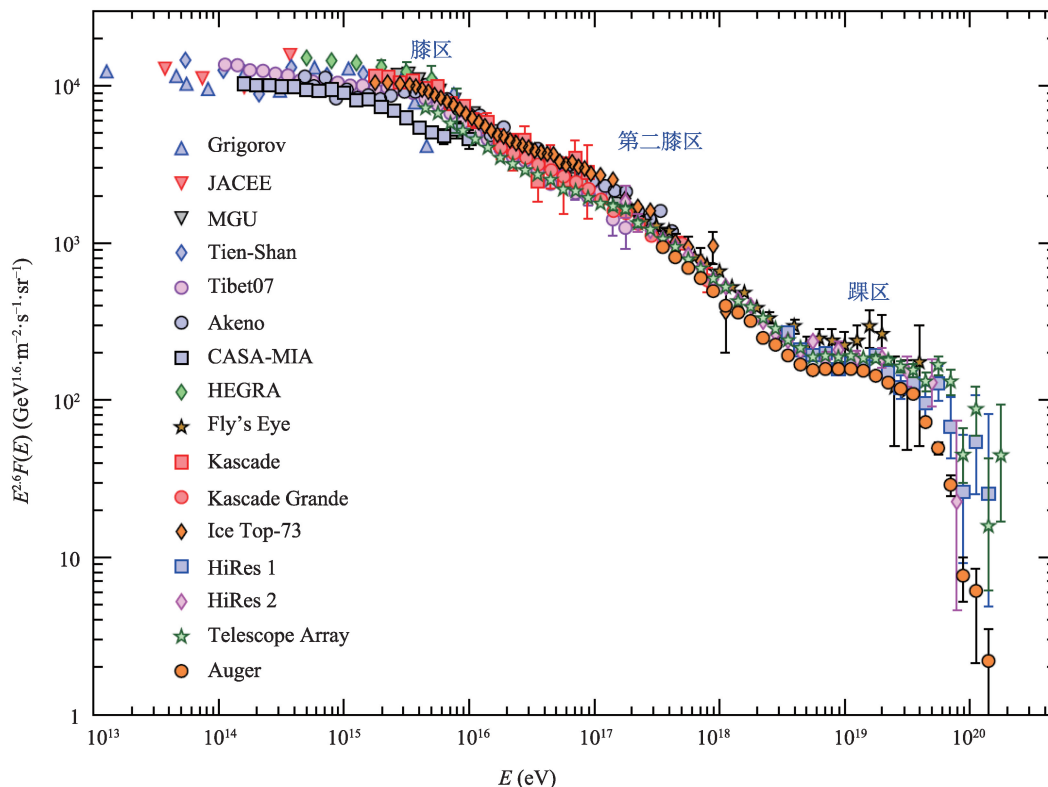


图1 能量大于  $10^{13}$ eV 宇宙线能谱。不同符号不同颜色的数据点分别代表着不同的探测器,如图标所示(图源自文献④)

$10^{18}\sim 10^{19}$  eV的“踝”区,另外 $10^{17}$  eV左右的一个结构称为第二“膝”区。一般认为,“踝”区以下的宇宙线可能起源于银河系,通常称为银河系宇宙线,而“踝”区以上能量大于 $10^{18}$  eV的宇宙线由银河系外天体产生,通常称为极高能宇宙线。对于银河系宇宙线,“膝”区以下的低能宇宙线为质子占主导;第二“膝”区到“踝”区,质子的丰度明显受到抑制,重核慢慢占主导,这很有可能是由于银河系源的加速极限或者粒子逃逸导致的。

### 三、宇宙线是如何产生的?

由于宇宙空间存在着各种磁场,宇宙线又以带电粒子为主,所以遥远天体产生的宇宙线将在传播过程中受到磁场的偏转,无法准确地判断宇宙线的最初起源。同时由于地球大气的存在,宇宙线进入大气后,将会与大气中的原子核发生各种相互作用,产生各种次级粒子,形成大大小小的“广延大气簇射”,因此无法在地球上直接探测原初宇宙线。

也正是因为存在这些困难,直到现在我们还是无法确定宇宙线是如何产生的、在什么地方产生以及宇宙线的传播机制等等最基本的问题。

尽管如此,上百年的观测和研究,理论上还是提出了一些可能的关于宇宙线起源、加速和传播等基本模型。

普遍认为银河系宇宙线的来源是超新星遗迹,最近观测到的超新星遗迹的强子过程可能是这个观点的一个强有力的证据<sup>⑤</sup>。然而,一些新的观测证据也表明银河系中心黑洞也可能是银河系宇宙线的来源<sup>⑥</sup>。但肯定的事实和结论,如同对极高能宇宙线的认识一样,还需要更多的观测和研究。

根据Hillas条件,粒子被加速到最大能量主要与加速天体加速区的尺度和磁场强度有关。从图2的Hillas图可以看到,宇宙中一类特殊天体活动星系核(Active Galactic Nuclei, AGN)很有可能具备将宇宙线粒子加速到 $10^{20}$ eV的能力,这也是目前普遍认为最有可能成为河外宇宙线源的一类天体。

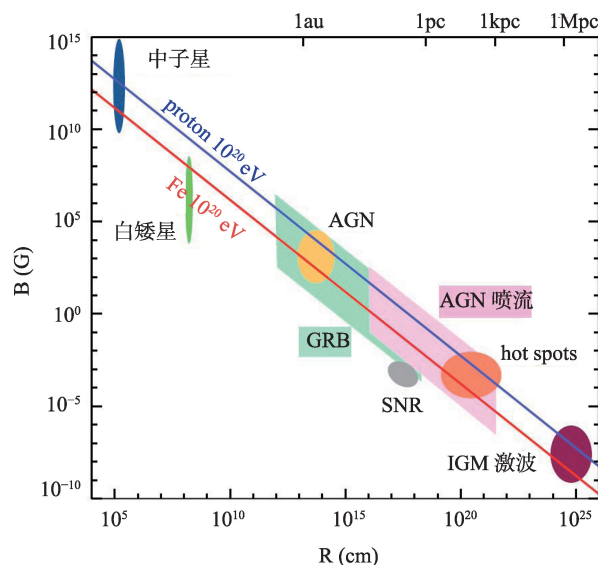


图2 各种可能加速宇宙线的天体在Hillas图的位置。在红线以上的天体可以加速铁核到 $10^{20}$  eV,蓝线以上的天体可以加速质子到 $10^{20}$  eV。可以看到AGN可能具备加速宇宙线粒子到极高能的能力(图源自文献<sup>⑦</sup>)

### 四、为什么活动星系核是可能的河外宇宙线源?

活动星系核是一类中央核区具有激烈活动的河外星系,是宇宙中已知的最亮的天体,其数量略小于河外星系总数的10%。一般认为,AGN中心存在一个质量在 $10^6\sim 10^{10}$ 太阳质量的超大质量黑洞,通过吸积周围的物质从而释放出大量的能量,总光度可大于 $10^{48}$  ergs  $s^{-1}$ ,并存在吸积盘和尘埃环等物

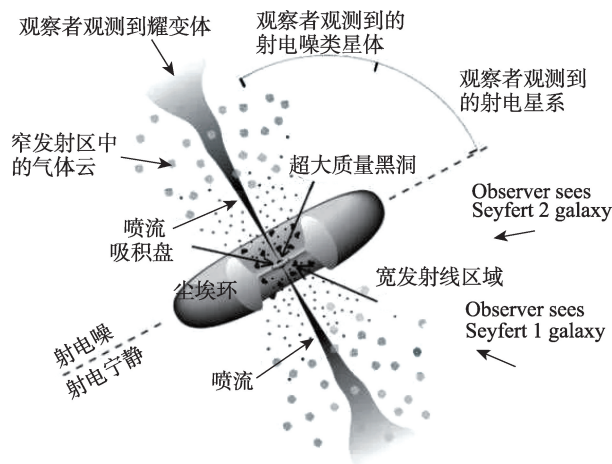


图3 AGN的几何结构示意图

(图片来源: <https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/etec/agn/>)

质成分,部分 AGN 还会在吸积盘的垂直方向形成准直的相对论性喷流。图 3 给出了 AGN 的几何结构示意图。

因此按照有没有喷流来对 AGN 进行分类,这样我们就可以把 AGN 分成喷流 AGN 和非喷流 AGN 两大类。喷流 AGN 中的相对性喷流的动能带走了大部分的吸积的释放能量,而非喷流 AGN 则通过辐射的形式来耗散吸积能,又称为“辐射型”AGN。

在 高能天体物理研究领域,AGN 已经是研究高能物理过程的最为常见的目标源,成为在 GeV 和 TeV 伽马射线能区最多的目标源。Fermi 空间伽马射线望远镜在 GeV 能段观测到了 1757 个 AGN,其中已知分类的源中几乎都是喷流 AGN,98%是喷流方向接近视线方向的 AGN,我们称为耀变体。而在甚高能 TeV 能段,观测到的河外伽马射线源,几乎也都是耀变体。由此可知,耀变体是产生河外伽马射线辐射最可能的天体,因此,以耀变体的高能伽马射线辐射作为探针来研究相对论性喷流里面的高能物理过程是目前研究喷流、吸积盘以及黑洞物理最为常用的手段,当然同时耀变体也就成了最为关注的河外宇宙线源。

活动星系核高能辐射的产生主要可以用轻子过程和强子过程来解释。粒子在喷流中被加速到一定的能量后就可能与喷流中的光子、磁场和物质相互作用,通过轻子或者强子过程辐射冷却。

轻子模型主要考虑的就是高能电子与喷流中的软光子产生的逆康普顿散射,从而辐射高能伽马射线。轻子模型是解释喷流 AGN 或者耀变体辐射最成功的模型。根据软光子场的来源,又可以把轻子模型分成同步自康普顿散射和外康普顿散射两种模型。

轻子模型中高能光子主要是电子(正电子)的同步辐射和逆康普顿散射产生,并不会涉及宇宙线的加速和逃逸过程,同时也不会产生中微子等与宇宙线相关的信号,因此轻子模型不能解释 AGN 作为可能的宇宙线源。

强子模型主要考虑的就是高能质子的同步辐射过程,以及质子与光子的相互作用产生的次级粒

子的衰变和同步辐射。在强子模型中,质子主导高能辐射,在 AGN 喷流中存在大于 10 G 的磁场,质子被加速到了远大于  $10^{16}$  eV 的能量阈值,质子在磁场中会通过同步辐射产生 KeV 到 GeV 能段的高能辐射,然后,当质子被加速达到相应的能量阈值后,高能质子就会和喷流中的光子发生相互作用。

在质子静止坐标系下,光子能量为  $\sim 1$  MeV 的时候,就会通过 Bethe-Heitler 过程发生光致电子对产生反应:  $p + \gamma \rightarrow p + e^- + e^+$ 。

当光子能量更高时,就会发生光介子过程。这个过程主要有两个主要反应通道:  $p + \gamma \rightarrow p + a\pi^0 + b(\pi^+ + \pi^-)$  和  $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+ + a\pi^0 + b(\pi^+ + \pi^-)$ ,其中  $n$  为中子, $\pi$  为  $\pi$  介子, $a$  和  $b$  为  $\pi$  介子的重数(multiplicities)。两个通道都有几乎相同的反应截面。带电的  $\pi$  介子随后就会衰变产生轻子和中微子:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ,  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ;  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ ,  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ 。中性的  $\pi$  介子会衰变成双光子:  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ 。这些过程产生的带电介子也可能通过同步辐射过程产生高能光子。当这些过程辐射出来的光子能量  $\gg 1$  TeV,还可能发生双光子湮灭过程:  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 。上面的过程提供了正负电子和光子,双光子湮灭后就会诱发电磁级联过程,辐射出最终我们观测到的伽马射线谱。图 4 给出了强子模型过程的示意图。

强子模型和轻子模型最大的区别在于强子过程会伴随高能光子的辐射,产生高能中微子,如果我们观测到来自 AGN 的高能中微子,就能初步确定强子过程的存在。

2017 年 9 月 22 日,位于南极的冰立方 IceCube 探测到了能量为 300 TeV 的高能中微子,与此同时开展的多波段联测表明这个中微子来自耀变体 TXS 0506+056,这就说明强子过程非常有可能发生在该耀变体喷流中<sup>⑧</sup>。

最近的研究表明,当加速高能宇宙线的喷流 AGN 位于星系团中心,可以同时解释极高能宇宙线、高能中微子以及河外高能伽马射线的观测数据,如图 5 所示。

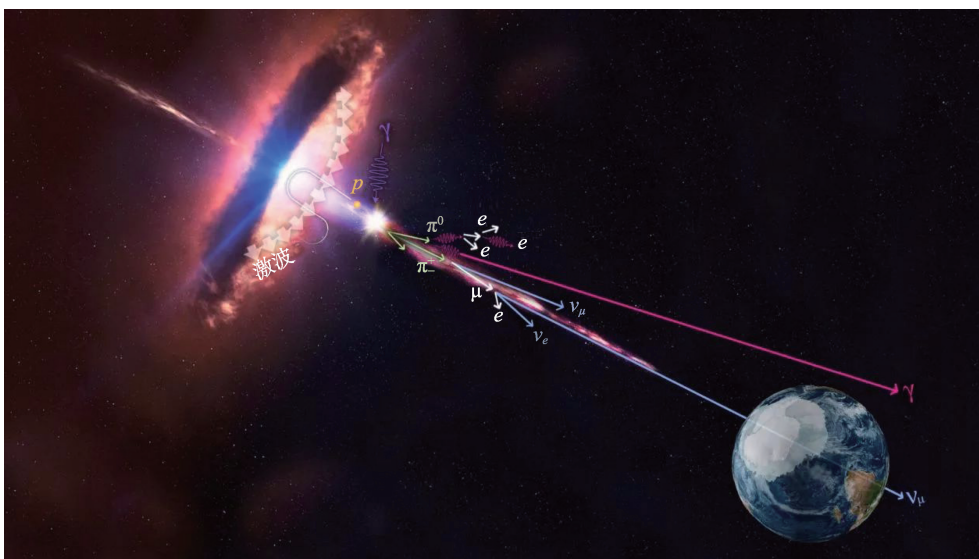


图4 喷流活动星系核强子模型示意图  
(图片来源: <https://icecube.wisc.edu/>)

当喷流 AGN 加速宇宙线粒子到相当高的能量时,极高能宇宙线从喷流中泄漏出来,进入星系团的介质空间。星系团的介质空间可能有较高的磁场和物质密度,当宇宙线的能量较低时,就会在星系团的维力半径内进行扩散运动,与里面的物质发生相互作用,产生中微子和伽马射线,直到耗尽能量也不能逃逸出星系团;当宇宙线的能量达到一定的阈值,宇宙线就会在介质空间里面进行半扩散运动,同样可能与物质碰撞产生中微子和伽马光子,但会逃逸出星系团,进行星系际空间的传播;而最高能量的宇宙线会不受任何作用,直接沿着原来的传播方向逃逸出星系团,进入星系际空间传播<sup>⑩</sup>。

## 五、多信使时代

随着技术的发展和空间科学的进步,我们己能够在更广的能量范围获取来自宇宙空间、来自各种天体不同类型的信息,天文学、宇宙学己进入多信使研究时代。瞄准高能宇宙线起源这一重大科学问题,宇宙线的观测和研究也逐渐形成了甚高能伽马天文、高能中微子天文学以及极高能宇宙线物理等前沿研究领域。AGN作为高能伽马射线、高能中微子以及高能宇宙线的主要起源,越来越受到观测和理论研究的厚爱。

极高能宇宙线从AGN加速逃逸出来,经过星系际空间的传播,由于地球大气的存在,宇宙线将会在地球大气中发生广延大气簇射,地面实验主要是通过测量大气簇射间接测量原初宇宙线。目前主要的极高能宇宙线观测站为位于阿根廷的PAO和美国的TA。这两个几乎覆盖了整个天区的探测阵列,观测到了很多极高能宇宙线事例和极高能宇宙线各向异性的分布。2017年PAO实验组发布新的观测数据,展现了一个 $8\text{EeV}(10^{18}\text{eV})$ 以上的极高能宇宙线在天空中的呈现的偶极分布的各向异性,同时主张这些宇宙线起源于河外<sup>⑩</sup>。但是由于分辨率的问题,观测到的事例数还不足以确定极高能宇

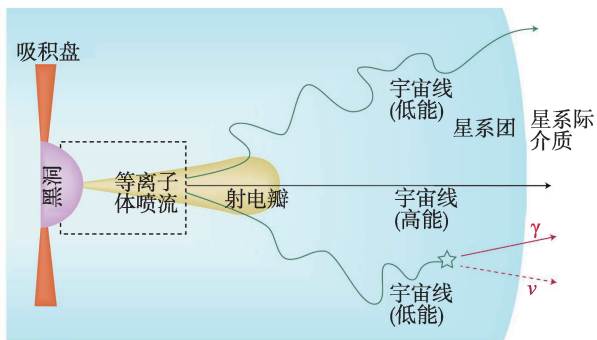


图5 星系团中心喷流 AGN 产生的宇宙线传播示意图  
(图取自文献<sup>⑩</sup>)

宙线的起源。

由于中微子相互作用截面太小,探测不易。然而位于南极的冰立方探测到能量为300 TeV的高能中微子,并且确定了这个高能中微子来自于一类特殊类型的AGN-耀变体,伴随高能中微子还观测到高能伽马射线,更进一步从实验上证实了宇宙中微子与宇宙射线至少有时候具有共同的起源,AGN极可能是宇宙线源,在源区存在着强子过程。对于极高能宇宙线,TeV-PeV能段的中微子不太可能是宇宙线的传播过程中反应产生的中微子,因为这样产生的中微子会携带大约5%极高能质子的能量,远超TeV-PeV能段,所以,TeV-PeV能段的中微子有可能是极高能宇宙线加速时的强子过程产生的,这样,IceCube的观测数据可以用来追寻极高能宇宙线的起源地。

近十年来,由于大气切伦科夫成像望远镜技术的不断成熟,甚高能伽马射线的探测取得非常大的突破。在GeV-TeV能段,无论是空间伽马射线望远镜Fermi-LAT,还是地面切伦科夫望远镜H.E.S.S.,MAGIC,VERITAS阵列,都极大地拓展了甚高能伽马天空,获得了上千颗伽马射线源。这些已运行的探测设备和一些正在建设中的大型设备将在未来5~10年获得更精确的观测数据,帮助我们了解宇宙线的起源。

图6给出目前正在运行和正在建设的伽马射线探测设备灵敏度曲线。随着LHAASO,CTA和HiScore三个甚高能伽马射线探测器的运行,未来我们将在1%Crab灵敏度下获取伽马天文观测数据。我们的观测也将覆盖整个TeV能段。

我国科学家经过半个多世纪的努力,通过在海拔4300米的西藏羊八井宇宙线国际观测站建设运行的中日合作AS $\gamma$ 实验和中意合作ARGO实验,开始了伽马天文的观测研究,取得了一系列具有较高国际显示度的研究成果。为探寻宇宙线的起源,冲击世纪难题,我国科学家进一步提出并在四川稻城建设以测量簇射及其 $\mu$ 子含量为核心的大型复合式探测器阵列——高海拔宇宙线观测站(LHAASO计划)<sup>①,③</sup>。

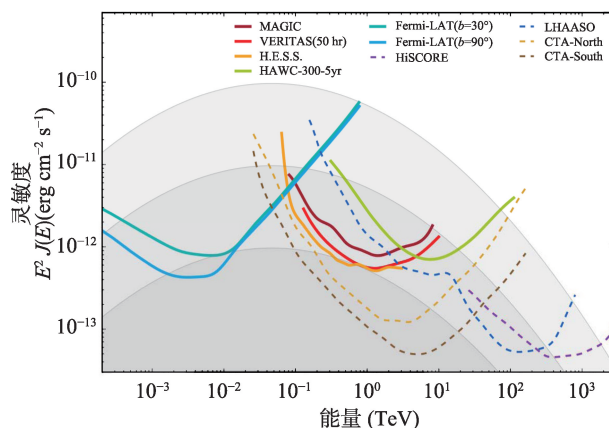


图6 现有的和将来的高能伽马射线探测器的灵敏度。实线代表已经存在运行的探测器,虚线表示将来要建设的探测器。

灰色阴影部分从上到下代表着100%,10%,1%水平的Crab的能谱(图取自文献<sup>②</sup>)

该计划利用中国特有的高海拔观测基地在扫描观测中的有利条件,强调与Cherenkov探测技术的互补性,由4种探测器集成为一个覆盖1 km<sup>2</sup>的复合探测器阵列。通过高水平的国际合作,LHAASO将建成为世界高海拔甚高能伽马天文观测研究中心,并作为国际上最为活跃的宇宙线物理实验研究平台,与PAO,CTA,IceCube等重要观测设备一起,通过多波段多信使观测,为国际伽马射线天文研究领域做出贡献,为解决宇宙线的未解之谜作出贡献。

对于AGN和高能宇宙线,未来LHAASO的观测可能会在研究中起到关键性的作用<sup>③</sup>。从图6可以看到,LHAASO在同代探测器中最大的优势就是对高能伽马射线的观测覆盖了整个TeV能段,把观测能段拓展到了1 PeV(10<sup>15</sup>eV),并且在100TeV~1PeV能段拥有前所未有的观测灵敏度。通过LHAASO的观测,我们就可以直接观测到AGN能谱的尾部,从而限制AGN的辐射模型、粒子加速机制等,会给我们带来AGN甚高能辐射的新认识。TeV能段的高灵敏度可以让我们观测到以前观测不到的AGN在TeV能区的耀发。与此同时,LHAASO不仅仅是TeV伽马射线探测器,它还是一个宽波段的宇宙线观测器,覆盖能量范围10<sup>12</sup>~10<sup>17</sup> eV,我们可以利用LHAASO的观测以前所未有的统计性和分辨率重构该能段的宇宙线能谱,并且可以分别研究宇宙线

中的轻的和重的组分的各项异性的问题。同时,我们还可以通过 LHAASO 的观测来直接研究广延大气簇射的模型。

多信使时代的到来,给我们带来各种粒子光子的观测数据的同时,也给我们的研究带来了不同的思路。宇宙线、中微子、高能伽马射线可能存在极大的关联,联合所有的数据,就能对不同的理论模型进行限制。因此,多信使观测时代给极高能宇宙线起源和传播过程的研究提供了良好的机遇。同时,AGN 依然是极高能宇宙线起源的重要候选者,我们需要对其高能粒子的加速、辐射冷却、粒子逃逸等过程进行更深入的研究。

## 六、总结

AGN 是目前探测到河外高能伽马射线数量最多的天体,它也是极具竞争力的河外极高能宇宙线起源的候选者。所以,对 AGN 的研究是对理解河外极高能宇宙线的加速、传播等过程的重要手段。多信使观测时代的到来意味着我们迎来了研究 AGN 和高能宇宙线的最佳时机。我国科学家提出并在建设的高海拔宇宙线观测站 LHAASO 既是高能伽马射线探测器,也是高能宇宙线的探测器,由多个性能先进的探测系统组成,形成多参数宇宙线复合观测站,在国际上具备领先的优势,为彻底解释宇宙线河内到河外起源的过渡提供连续一致的实验结果。

LHAASO 的建设必将对我国的高能天体物理、高能宇宙线物理的研究作出积极的推动,作为国际上最为活跃的宇宙线物理实验研究平台,为整个国际伽马射线天文研究领域做出贡献,并极有可能对宇宙线起源这一世纪难题给出明确的答案。

### 参考文献

- ① 何会海, 马玲玲, 李晓晓. 探寻“世纪之谜”——高能宇宙线起源[J]. 科学(上海), 2010, 62(4): 8-12.
- ② 何会海. 宇宙线研究进展评述与展望[J]. 物理, 2013, 42(01): 33-39.
- ③ 曹臻, 刘加丽, 白云翔. 物理学中的世纪难题: 高能宇宙线的起源

之“谜”[J]. 自然杂志, 2009, 31(06): 342-347, 363.

- ④ Patrignani C, Particle Data Group. Review of particle physics[J]. Chinese physics C, 2016, 40(10): 100001.
- ⑤ Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants[J]. Science, 2013, 339(6121): 807-811.
- ⑥ Abramowski A, Aharonian F, Benkhali F A, et al. Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre[J]. Nature, 2016, 531(7595): 476.
- ⑦ Kotera K, Olinto A V. The astrophysics of ultrahigh-energy cosmic rays[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2011, 49: 119-153.
- ⑧ IceCube Collaboration. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+ 056 prior to the IceCube-170922A alert[J]. Science, 2018, 361(6398): 147-151.
- ⑨ Fang K, Murase K. Linking high-energy cosmic particles by black-hole jets embedded in large-scale structures[J]. Nature Physics, 2018, 14(4): 396.
- ⑩ Tjus J B. Cosmic-ray tracing[J]. Nature Physics, 2018, 14(4): 333.
- ⑪ Aab A, Abreu P, Aglietta M, et al. Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above  $8 \times 10^{18}$  eV [J]. Science, 2017, 357(6357): 1266-1270.
- ⑫ Santander M. The dawn of multi-messenger astronomy[M]//neutrino astronomy: current status, future prospects. 2017: 125-140.
- ⑬ Di Sciascio G, LHAASO Collaboration. The LHAASO experiment: from Gamma-Ray Astronomy to Cosmic Rays[J]. Nuclear and particle physics proceedings, 2016, 279: 166-173.

