

超高能伽马射线的天体物理起源

柳若愚[†] 李朝明

(南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

2024-02-05 收到

[†] email: ryliu@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240404

Astrophysical origins of ultra-high energy gamma-ray emissions

LIU Ruo-Yu[†] LI Chao-Ming

(School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

摘要 中国大科学装置之一的高海拔宇宙线观测站开创了超高能伽马射线天文学的新时代, 至今已作出多项重要的科学发现, 为人们破解银河系宇宙线起源之谜带来了关键线索, 并为研究极端天体中的极端物理过程提供了独特的探针。文章主要介绍其探测到的超高能伽马射线源, 以及相关天体的物理图像。

关键词 高海拔宇宙线观测站, 超高能伽马射线, 宇宙线起源, 极端物理过程

Abstract The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO), one of the key national scientific facilities of China, has ushered in the new era of ultra-high energy gamma-ray astronomy. As of now, it has discovered many important phenomena, providing us with critical clues to unravel the puzzle of the origin of Galactic cosmic rays and a unique tool to probe extreme physical processes in extreme astrophysical objects. This paper will describe the ultra-high energy gamma-ray sources detected by LHAASO, as well as the physical pictures of relevant astrophysical objects.

Keywords Large High Altitude Air Shower Observatory, ultra-high energy gamma-ray, origin of cosmic rays, extreme physical processes

1 LHAASO与超高能伽马射线天文学

坐落在稻城县海子山上的高海拔宇宙线观测站(简称LHAASO)是目前世界上最灵敏的超高能伽马射线探测器^[1]。伽马射线一般是指能量大于100 keV(即10万电子伏)的光子或频率高于 2.4×10^{19} Hz的电磁波, 而本文关注的超高能伽马射线则是指能量高于100 TeV(即100万亿电子伏, 即 10^{14} eV)的光子。在LHAASO运行之前, 宇宙中已知的超高能伽马射线源只有蟹状星云, 是中日合作的探测器AS γ 于2019年探测到的^[2]。2019

年底, 当时已完成一半建设的LHAASO探测阵列开始运行, 11个月后便探测到了连同蟹状星云在内的12个超高能伽马射线源^[3]。2021年7月, LHAASO完成了全部阵列的建设, 在随后的一年内凭借一己之力将超高能伽马射线源的数量提升到了43个^[4]。可以说, LHAASO开启了在超高能伽马射线能段对宇宙观测的新窗口, 同时也对学术界提出了新的问题: 这些超高能伽马射线如何产生? 是什么样的天体通过怎样的过程产生了它们?

在天体物理环境下, 这些光子的产生机制其实并不复杂。一种常见的机制是高能电子的逆康

普顿散射过程^[5], 是一种轻子辐射。高能电子在低能的辐射场中与光子碰撞, 将一部分能量转移给光子。超高能伽马光子另一种主要的产生机制是高能质子(或原子核)的质子—质子碰撞(或核子—核子碰撞)^[6]。碰撞中, 会产生 π 介子, 其中的 π^0 介子会迅速衰变为两个光子, 每个光子的能量大约为质子能量的10%。在少数的天体环境中, 辐射场的平均光子能量较高, 高能质子也会与光子发生光介子过程^[7], 该过程同样会产生 π 介子并进而衰变为光子。因为高能光子能量来源于质子, 这种产生机制也常被称为强子辐射。寻找强子辐射起源的超高能伽马射线源是近些年来国际上一个非常热门的研究方向。因为这些源表明了它们对应的天体能够加速能量在PeV之上的质子, 而该能量对应着宇宙线能谱在1 PeV左右出现的拐折结构(也被称为宇宙线能谱的“膝”)。找到PeV宇宙线的起源对于理解银河系宇宙线的起源至关重要, 这也是LHAASO最重要的科学目标之一。

此外, 能够将粒子加速到几百TeV乃至几个PeV的天体内部必定发生着极端剧烈的物理过程, 因此在超高能伽马射线能段对天体进行探测可以帮助我们研究极端条件下的物理过程。另一方面, 超高能伽马光子的产生还需要靶粒子。对于轻子辐射, 无处不在的宇宙微波背景辐射(CMB)可以充当靶粒子, 但对于强子辐射, 则需要较致密的气体团块才能使得辐射比较有效, 因此超高能伽马射线的观测也可以帮助我们了解天体内部和周边的环境。

2 天体物理中的高能粒子加速机制简介

某类天体成为超高能伽马射线源的必要条件是将电子或质子的能量加速到至少100 TeV。要达到这个能量并不容易, 毕竟目前世界上最大的人造加速器即欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机, 也只能将质子加速到10 TeV左右, 因此能成为超高能伽马射线源的天体内部往往都有高效的粒子加速过程。著名的物理学家费米曾提出在天体物理环境中, 很多运动的磁云通过与宇宙线粒子的碰撞, 将动能传递给它们, 从而实现

粒子的加速^[8]。这种机制后来被称为费米加速机制。根据碰撞中心的结构不同, 费米加速机制也被分为一阶费米加速与二阶费米加速, 粒子在这两种机制下单位时间内的速度增量分别正比于碰撞中心速度 v 与光速 c 之比的一次方和二次方。除了费米加速机制, 天体物理环境中也可能产生大尺度的电场从而加速带电粒子。比如在磁重联现象中, 磁场的能量耗散, 在重联点(也被称为 X 点)附近可能产生宏观尺度的电场从而加速粒子^[9]。但磁重联现象也会引起湍流和流体的宏观运动, 所以磁重联中的粒子加速也可能是通过费米加速机制完成的^[10]。另一种可能产生大尺度电场的环境是中子星的磁层。中子星一般具有快速的自转, 旋转的磁场在磁层中产生了一个宏观尺度的电场, 可将磁层中的带电粒子加速^[11, 12]。中子星的表面磁场越强、自转速度越快, 能达到的最大粒子能量就越高。

3 超高能伽马射线源

LHAASO探测到的超高能伽马射线源大体上对应四类天体, 分别是: (1)超新星遗迹; (2)脉冲星风云/脉冲星晕; (3)年轻大质量星团; (4)微类星体/星风碰撞双星。

3.1 超新星遗迹

大质量恒星死亡时产生的超新星爆发将恒星的残骸以每秒上万公里的速度炸向四周。当这些抛射物与周边的星际介质碰撞时, 将会产生一道强烈的正向激波向外传播, 以及一道反向激波向内扫过抛射物(图1)。激波扫过的粒子会被卷入其中并被激波加速。但随着扫过物质的增多, 激波的速度会越来越慢, 当速度低于当地声速后, 激波消失。最终, 超新星遗迹慢慢溶解在星际介质中。超新星抛射物的初始动能可达到 10^{51} erg。每个世纪银河系平均会产生2、3个超新星爆发。从能量的角度来看, 超新星遗迹可以为银河系的宇宙线供能。早在1934年, 宇宙线发现的22年后, 著名的天文学家W. Baade和F. Zwicky就提出了宇

宇宙线来源于超新星爆发的想法^[13]。1978年T. Bell 两篇关于扩散激波加速机制的论文奠定了超新星遗迹加速宇宙线的理论基础。在很长一段时间内,超新星遗迹都被认为是银河系宇宙线主要的起源,可产生能量处于宇宙线能谱“膝区”之下(即PeV左右)的宇宙线^[14]。

然而,近十年对一些超新星遗迹的观测发现,很多超新星遗迹的伽马射线能谱在1—10 TeV之前就开始截断或拐折,暗示了这些超新星遗迹最多把质子加速到10—100 TeV^[15]。因此很多学者认为可能只有年龄在几百年之下的年轻超新星遗迹才能够把质子加速到PeV能量^[16]。超新星Cassiopeia A (Cas A, 仙后座A)就是一个热门的PeV宇宙线源的候选体。该超新星遗迹的年龄大约仅350年,目前其激波速度仍有5000—6000 km/s^[17, 18]。LHAASO近期报导了对Cas A的测量结果,出人意料的是,LHAASO在Cas A相当一片延展的区域内并没有发现显著的超高能伽马射线信号,这对其加速宇宙线的能力给出了非常严格的限制^[19]。根据LHAASO对Cas A测量的结果推算,超新星遗迹在100 TeV之上的宇宙线注入率仅在解释宇宙线流量所需的1%量级。另一方面,LHAASO在很多年龄上万年的超新星遗迹周围,如W51, γ Cygni, SNR G106.3+2.7等,发现了超高能伽马射线辐射,暗示了这些原本不被认为是有效粒子加速器的中年超新星遗迹反而有可能是PeV宇宙线的起源。其中,SNR G106.3+2.7似乎处于一个低密度的空腔中^[20]。这种环境或许是PeV粒子加速的关键,因为其使得该超新星遗迹的激波速度在较长时间内保持一个较高的水平^[21]。但具体的物理机制还需要进一步的理论研究。总之,LHAASO的这一系列测量结果对超新星遗迹作为银河系宇宙线起源天体的标准范式提出了严峻的挑战。

3.2 脉冲星风云/脉冲星晕

超新星爆发有几种不同的类型,其中II型超新星爆发的同时会在中心产生一颗中子星。新生的中子星一般具有高速的自转,使得其辐射的

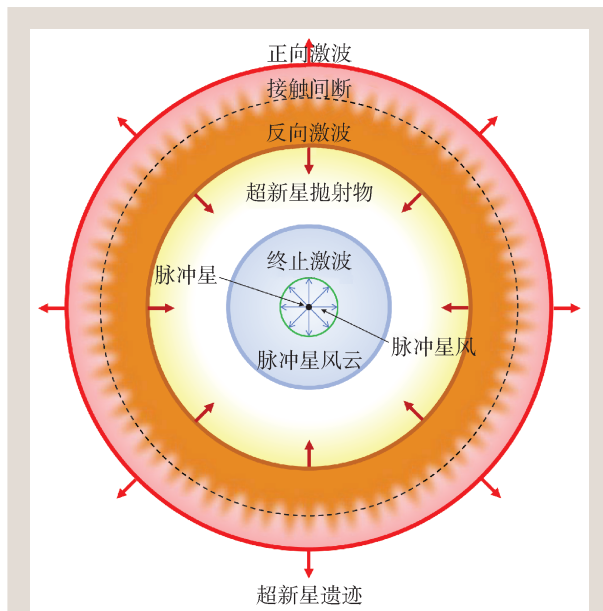


图1 超新星遗迹与其内部脉冲星风云结构简图。外层为超新星遗迹的正向激波(红色圈)、接触间断(黑色虚线)与反向激波(棕色圈),箭头表示激波运动方向。由于一些不稳定性的存在,接触间断处会产生一些不规则结构如图中橙色区域所示。中心由内到外为脉冲星(黑色点)、脉冲星风(浅蓝色箭头)、终止激波(绿色圈)和脉冲星风云(浅蓝色区域),中间黄白色区域为超新星抛射物

光束类似于灯塔一般,周期性地扫过地球从而产生脉冲信号。因此,这类中子星也被称为脉冲星。脉冲星的高速自转驱动其磁层中的正负电子对向外流动,并将它们整体加速到极端相对论性,形成强大的脉冲星风。当脉冲星风与周围的物质(如超新星抛射物、星际介质)发生碰撞,在压力平衡处产生了终止激波,正负电子对在终止激波附近可进一步得到加速。这些高能粒子被磁场束缚在激波下游,随着数量的积累,它们的压强会高于周围的物质,并推动周围的物质向外膨胀,在脉冲星周围形成一个充满高能正负电子对的低密度空腔,其中的高能正负电子对在磁场和辐射场中产生了从射电到伽马射线的多波段辐射,形成了我们观测到的脉冲星风云(图1)^[22]。从能量的角度看,脉冲星的转动能降低转化为正负电子对的能量,随后又产生辐射。因此可以预期脉冲星风云的总辐射光度(或功率)大体上正比于且一般不会超过脉冲星的自转减慢功率。

LHAASO观测到的第一个脉冲星风云是著名

的蟹状星云。该星云产生于1054年的一次被中国宋朝天文学家称为“天关客星”的超新星爆发。该次爆发产生了一颗强大的脉冲星，目前自转周期为33.4 ms，自转减慢功率高达 4.5×10^{38} erg/s，是目前在银河系中发现的功率最高的脉冲星。LHAASO在300 GeV—1 PeV的能量范围内精确测量了蟹状星云的能谱，能量最高的光子达到了1.1 PeV^[23]。结合其他仪器在较低能段的测量，整个蟹状星云的能谱可以用一个拐折幂率分布的电子谱所产生的同步辐射和逆康普顿散射来描述。电子谱的截断能量为2 PeV，所需的磁场大小在100 μ G的量级。我们推算出蟹状星云中的粒子加速效率达到了理论极限^[24]的16%，这比超新星遗迹中的激波加速效率高出100—1000倍。在此前的一些数值模拟工作中，脉冲星风云只能够把电子加速到100 TeV左右^[10]。目前对如此之高的加速效率如何实现还没有一个很好的解释。另一种可能性则是能量最高的光子有另外的起源。如果仔细观察能谱拟合的结果，可以发现在400 TeV之上，单成分模型与观测符合得并不完美。在最高能处，观测到的能谱形状有变平的趋势。这暗示了在蟹状星云最高能的能谱中可能存在一个额外的成分。该成分可能由另一种粒子加速机制或在另一个加速区所产生的电子贡献。另外，如果高能质子或者原子核存在于脉冲星风云内，它们与超新星抛射物产生强子反应，辐射出超高能光子^[25]。实际上，脉冲星的表面含有超新星爆发时形成的铁峰元素(元素周期表上在铁元素附近的一些元素)，能够被脉冲星磁场转动而产生的电场从表面剥离出来，在这个过程中原子核可能获得加速。又或者，这些重子物质进入脉冲星风中，随电子一起在终止激波处被加速。计算表明，脉冲星损失的动能中只需一小部分转化为高能质子，它们的强子辐射便可以解释LHAASO在蟹状星云400 TeV之上的能谱数据^[26, 27]。如果银河系所有的脉冲星风云都能以这个比例加速质子，脉冲星风云可能贡献了相当一部分目前测量到的10 PeV之上的宇宙线质子^[26]。

随着年龄的增加，脉冲星的自转功率逐渐降低。在诞生几万年之后，脉冲星因诞生时受到的

踢出速度可能会离开超新星遗迹进入星际介质。星际介质中的声速较低，因此脉冲星的超声速运动会在运动方向上产生一个弓形激波，使得脉冲星风云呈现一个彗星状的结构。在这个阶段被加速的正负电子对比较容易逃出脉冲星风云，进而在周边星际介质中扩散，并通过逆康普顿散射产生被称为TeV伽马射线脉冲星晕的延展源^[28]。脉冲星晕首先由位于墨西哥的高海拔切伦科夫望远镜(HAWC)在Geminga与Monogem两颗中年脉冲星周围观测到^[29]。以Geminga为例，该脉冲星的年龄约为30万年，距离太阳系约为250 pc (parsec秒差距，1 pc= 3.086×10^{18} cm)左右。根据这个距离换算，HAWC在Geminga周围测到的延展源的物理尺度至少有20—30 pc，而其中心的脉冲星风云尺度仅有0.2—0.3 pc。尺度上100倍的差距使得该延展源被认证为一种有别于脉冲星风云的新类型TeV伽马射线源。该源的TeV伽马射线面亮度分布随着到源中心的距离迅速下降，拟合结果表明，需要在该脉冲星周边星际介质中引入一个极低的扩散系数，比此前根据次级宇宙线的测量推测出的典型值低2—3个数量级。LHAASO于2021年报导了在脉冲星PSR J0622+3749周围发现的一个类似的伽马射线源LHAASO J0621+3755^[30]。该脉冲星的年龄与功率都与Geminga相仿。LHAASO测量到的能谱更加精确，并且发现该源的能谱也延伸到了100 TeV之上。根据得到的面亮度分布推测出的周边星际介质扩散系数与Geminga脉冲星晕的结果也在同一个数量级。如何解释这么低的扩散系数仍是一个有争议的问题，但无论是哪一种情况，对伽马射线脉冲星晕的精确测量可以帮助我们推断当地星际磁场的性质并理解高能宇宙线在星际介质中的传播。

3.3 年轻大质量星团

恒星按照光谱类型或者表面温度可以分成不同类型，温度最高的两类叫做O型星和B型星。这两类恒星的表面温度超过1万度，质量达到10倍太阳质量之上。这些大质量恒星的辐射光度可高达太阳的数万倍甚至更高。强大的辐射压将恒

星的表面物质向外吹出，形成了强劲的星风，速度可达每秒上千公里。在年轻的大质量星团中，上百颗这样的大质量恒星拥挤在一个相对狭小的空间中(直径1—10 pc)。恒星星风之间激烈的碰撞^[31]或者与周边星际介质的碰撞^[32]产生了强激波与强湍流环境，为粒子的加速创造了非常有利的条件(图2)。与超新星遗迹的激波相比，虽然星风的速度要小于抛射物的初始速度，但这些大质量恒星可以在其几百万年或上千万年的寿命内持续吹出高速的星风，使得粒子能够在更长时间内获得有效地加速。这也是要强调“年轻”星团的原因。包含了大量O型星与B型星的星团往往也被称为OB星团或OB星协，其中后者的质量比前者要小一些。

在20世纪80年代初，一些学者^[33, 34]就已提出大质量恒星的高速星风可能作为PeV宇宙线的加速源，但由于没有观测上的支持，在当时并未获得学界广泛的重视。近十年，由于对超新星遗迹的研究开始逐渐不支持它们作为PeV宇宙线的起源，年轻大质量星团又开始获得人们的关注。Aharonian等人^[15]通过分析Fermi-LAT卫星的数据发现，一些年轻大质量星团的GeV—TeV伽马射线的空间形态与银河系的一些气体团块分布有相关性，暗示了这些伽马射线辐射可能起源于高能质子与气体的碰撞。此外，这些伽马射线辐射的能谱较硬，也符合强子辐射的预期特征。HESS望远镜等甚高能伽马射线望远镜在一些年轻大质量星团的方向也测到一些1—10 TeV有类似的特征的延展源^[35]，但GeV—TeV能量的观测并无法确证年轻大质量星团中有PeV质子的加速。LHAASO的观测则有望回答这个问题。事实上，LHAASO目前已经观测到多个超高能伽马射线源与一些年轻大质量星团的方向一致。其中，在天鹅座(Cygnus)恒星形成区，LHAASO更是发现了一个被称为Cygnus Bubble的巨大超高能伽马射线泡的存在^[36]。

天鹅座恒星形成区包含了剧烈的恒星形成活动，在其他波段也有广泛的研究。2011年，Fermi-LAT卫星在其中发现了一个延展尺度约为2度的GeV伽马射线源，被称为Cygnus Cocoon^[37]。

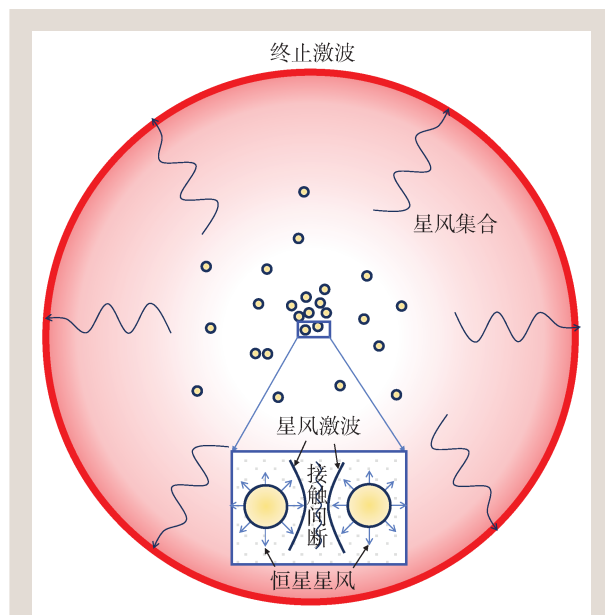


图2 年轻大质量星团结构简图。红色最外圈为所有大质量恒星的星风集合(黑色箭头曲线)与周围星际介质相互作用产生的终止激波。内部黄色小圈表示大质量恒星的分布(中心致密，周围稀疏)。放大图中表示的是两个彼此靠近且星风强度相当的大质量恒星星风相互作用产生的激波与接触间断，该结构在大质量星团中相当普遍，且多个大质量恒星星风相互作用形成的激波结构会更加复杂

Cygnus Cocoon被认为是恒星活动加速的高能质子与周边气体作用所产生的辐射。LHAASO探测到的泡状结构在天球上的延展尺度至少为6度。考虑到天鹅座恒星形成区距离我们约1.5 kpc，可知该泡状结构的物理尺度至少达到150 pc。因此，Cygnus Cocoon可能只是该结构中心明亮的部分。LHAASO测量的光子能量范围涵盖了TeV—PeV，最高光子能量更是达到了史无前例的2.5 PeV，打破了之前同样是LHAASO在该区域探测到的1.4 PeV光子的纪录。该伽马射线泡的空间形态也与周边的气体有较强的关联性，在整个泡状结构的范围内分布着弥漫的原子氢气体，此外LHAASO还在泡状结构上看到两块“热斑”，大小和方向与两团巨分子云一致。在泡状结构的中心，伽马射线亮度的空间分布相对于气体的分布有一个明显的超出，这表明了中心部分有大量宇宙线的注入。这一物理图像强烈地支持了Cygnus Bubble是由位于其中心的天体加速出的宇宙线质子与周边气体作用所产生。此外，泡状结构延展

的尺度也排除了它是由电子逆康普顿辐射所产生的可能性。因为电子的辐射效率即能量损失率很高，离开中心的加速源之后，电子的能量会在它们扩散到如此之大的尺度之前就消耗殆尽。

位于 Cygnus Bubble 中心附近的一个 OB 星协 Cygnus OB2 是目前看来最有可能加速这些高能质子的天体。该星协内星风的总动能达到 10^{39} erg/s，根据 LHAASO 的分析结果，只需把 Cygnus OB2 星风动能的 1% 转化为宇宙线质子的能量就可以解释观测数据。值得一提的是，Cygnus Bubble 的中心区域也存在其他一些有剧烈活动的天体，如

微类星体 Cygnus X-3 和脉冲星 PSR J2032+4127 的双星系统，虽然不能排除它们贡献了一些从该方向上而来的光子，但这些天体不可能产生整个泡状结构的辐射。这一点在 3.4 节中还会进一步说明。

LHAASO 对 Cygnus Bubble 的探测可以说是宇宙线研究的一个里程碑。该测量结果不仅首次定位了银河系 PeV 宇宙线的一个加速源，更是首次探测到了能量在“膝”区之上的宇宙线的加速源，为进一步理解“踝”区宇宙线的起源提供了重要的线索。

3.4 微类星体/星风碰撞双星

微类星体是由一个致密天体与一个恒星组成的双星系统。致密天体一般为中子星或者黑洞，它靠着强大的引力吸积恒星的物质并驱动相对论性的喷流(图 3(a))。与星系级的黑洞—喷流系统相似，微类星体中也有多个可能的粒子加速区。一种可能是在喷流顶端与外部介质碰撞产生的激波处，类似于射电星系喷流顶端的巨大射电瓣；另一种可能是喷流内部致密区域的耗散过程(如内部碰撞或者磁重联)，类似于耀变体中的小团块。

目前已知的具有稳定甚高能伽马射线辐射的微类星体仅有 SS 433。该天体由一个 10—20 倍太阳质量的黑洞与一颗 30 倍太阳质量左右的伴星组成。射电观测发现一对喷流以 0.26 倍的光速沿着相反的方向从黑洞喷出，动能光度高达 10^{39} erg/s^[38, 39]。在喷流传播方向距离中心黑洞 20—30 pc 处，射电与 X 射线波段上都观测到了热斑，望远镜 HAWC 与 HESS 也在该位置探测到了 1—10 TeV 左右的伽马射线^[40, 41]，推测为喷流顶端与外部介质相互作用而产生激波的位置。HESS 的测量发现辐射的形态与能量相关，能量越高辐射的中心位置越接近，这样的形态变化支持轻子辐射起源(即电子的逆康普顿散射过程)。LHAASO 对 SS 433 的测量表明其是一个超高能伽马射线源，能谱延伸至 200 TeV，其辐射机制是否仍然是轻子起源还有待 LHAASO 的进一步分析。

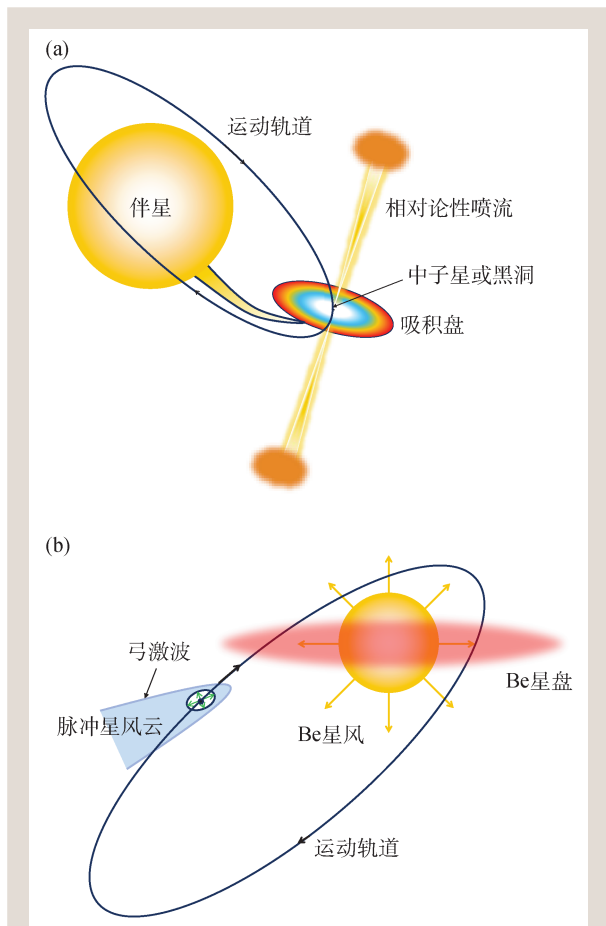


图 3 (a)微类星体结构简图。左侧为伴星及其被吸积产生的物质流，右侧为致密天体(中子星或黑洞)及其吸积伴星物质产生的吸积盘和相对论性喷流结构。喷流的顶端与外部介质相互作用使得喷流减速并产生辐射。黑色椭圆为致密天体的运行轨道(以伴星为参考系)；(b)星风碰撞双星结构简图。伴星(Be 恒星)周围红色晕为其恒星盘，箭头表示其星风。脉冲星吹出的星风(绿色箭头)被伴星星风压缩，在终止激波外形成彗星状的脉冲星风云(浅蓝色区域)

另一个可能具有超高能伽马射线辐射的微类星体是上一小节提到的 Cygnus X-3。Cygnus X-3 的中心致密天体的类型还不确定，但在射电波段会不时观测到其有一些小尺度的喷流产生，且喷流的形态具有非对称性。有时只能观测到致密天体一侧的喷流^[42]，有时能看到双侧的喷流但亮度有明显的差异^[43]。这说明喷流的指向可能很接近观测者的视线方向，从而受到多普勒效应的影响使得远离我们的那一侧喷流的辐射强度大大降低。这样的性质与 SS 433 中稳定、双向、对称的喷流有很大不同。如果说 SS 433 是射电星系的迷你版本，Cygnus X-3 则可能是耀变体的迷你版本。早在 20 世纪 80 年代初，一些地面阵列就报道过从 Cygnus X-3 方向探测到了 PeV 伽马射线辐射，且信号受到双星系统轨道周期的调制^[44]。但对该天体后续测量一直没有确认这样的超高能辐射，因此很多人开始怀疑是由于仪器或是数据处理的问题产生了虚假的信号。LHAASO 目前并没有显著地观测到 Cygnus X-3 的信号，但其正好处于 Cygnus Bubble 的中心附近，且在其方向的 0.1 度范围内有两个能量达 PeV 的光子事件，这究竟是一个巧合还是 Cygnus X-3 真的辐射出 PeV 伽马光子，还有待 LHAASO 进一步的观测与数据分析。值得注意的是，Cygnus X-3 虽然方向在 Cygnus Bubble 的中心附近，但其距离要比天鹅座恒星形成区更远，大约是 9 kpc 左右，因此 Cygnus X-3 最多只能解释从 Cygnus Bubble 中心区域而来的少部分光子。随着观测数据量的不断积累，LHAASO 对微类星体的观测有助于理解黑洞喷流系统中发生的极端物理过程。

还有一类可能作为超高能伽马射线源的双星系统是星风碰撞双星(图 3(b))。这种双星系统也由致密天体与伴星组成，其中致密天体一般是脉冲星。与微类星体不同的是，这类双星系统中没有喷流，但伴星一般具有强大的星风。脉冲星与伴星相互绕转时，脉冲星风与恒星风的激烈碰撞产生了激波从而加速高能粒子。前文提到的脉冲星 PSR J2032+4127 的双星系统就是这样的一个超高能伽马射线源，它是由相互绕转的一颗 1—2 倍太阳质量的脉冲星与一颗约 15 倍太阳质量的 B 型发

射星组成。同样是在 Cygnus Bubble 中心附近，但与 Cygnus X-3 的微弱信号不同，在 100 TeV 以下的能量段，该双星系统的辐射非常明亮，只有在数据处理上对其辐射进行扣除后，我们才能看到 Cygnus Bubble 的存在。但另一方面，该双星系统的辐射流量在超高能段随光子能量的增加衰减得非常迅速，这十分符合受到克莱因—仁科效应抑制的电子逆康普顿辐射的特征。因此，该双星系统虽然与天鹅座恒星形成区距离一致，但 Cygnus Bubble 与其没有太多关联。值得一提的是，该双星系统的轨道周期大约为 50 年^[45]，最近一次近星点在 2017 年，甚高能伽马射线望远镜 VERITAS 与 MAGIC 在当时看到了其 TeV 辐射的显著增强^[46]。目前脉冲星与伴星的距离正在不断增加，这可能使得双星系统的辐射不断减弱。LHAASO 对该系统的长期监测将在超高能段开辟一个新窗口帮助我们更加全面地理解碰撞星风双星系统的演化。

4 银河系弥散伽马射线辐射

除了各类天体产生的超高能伽马射线辐射，弥漫在银河系内的强子宇宙线与星际介质的质子—质子碰撞也能够产生超高能伽马射线，这使我们在地球上观测到的整个银道面呈现出一片弥散的伽马射线辐射(galactic diffuse gamma-ray emission, DGE)。DGE 在 GeV 伽马射线波段已经由 Fermi 卫星给出了精确的测量^[47]。在 TeV—PeV 能量段，多个探测器也已经对 DGE 进行过一些测量^[48—50]。而 LHAASO 的高灵敏度以及大接收面积使其对 DGE 的测量达到了更高的精度^[51]。一方面，这是由于 LHAASO 能够解析出更多的天体源，这样在测量 DGE 时可以将这些天体的辐射扣除；另一方面，在将已知天体源所在的天区扣除掉之后，LHAASO 仍然能够收集到足够多的事例以进行对 DGE 能谱与空间形态的分析。LHAASO 于 2023 年报道了在 10 TeV—1 PeV 能量段对银经 15°—235°、银纬±5°度范围内 DGE 的测量结果。与宇宙线—星际介质相互作用模型预期的结果不同，LHAASO 探测到的 DGE 整体流量比理论值超

出1—2倍,且空间亮度的分布也与理论预期不一致。这说明要么宇宙线的传播理论需要重大的修改,要么银河系中存在一些目前尚未发现的超高能伽马射线源,其贡献了这部分额外的DGE。后者是一种很自然的可能性。前文介绍的各种类别的天体中必然存在距离地球较远或者本身光度较低的个体。这些较为暗弱的天体无法被LHAASO以及其他探测器识别为源,因而它们本身的辐射便会被归入DGE之中。在这些暗弱的天体中,究竟是哪一类天体对DGE的贡献占主导目前还没有结论。一些研究提出,如果每个中年脉冲星周围都能产生脉冲星晕,那么这类天体可能会对DGE在100 TeV之下有较强的贡献^[52]。因为脉冲星晕的辐射来自于电子/正电子的逆康普顿散射,在这种情况下DGE中有很大一部分辐射来源于轻子辐射过程而不是传统认为的强子辐射过程。此外,类似于Cygnus Bubble这种巨大的泡状结构也可能贡献了DGE的超出部分。根据LHAASO对Cygnus Bubble的面亮度分布可以推测出,从中心加速源注入的宇宙线使得周边星际空间中的宇宙线密度超出了银河系的平均宇宙线密度,理论模型预期的密度超出范围要比观测到的泡状结构的尺度更大。而LHAASO团队在分析DGE时仅把Cygnus Bubble区域的辐射进行了扣除,在其之外区域的

辐射则会会计入到DGE中。如果银河系中的其他恒星形成区也存在类似的巨型泡状结构,便有可能解释测量到的DGE超出。

5 总结与展望

LHAASO开辟了在高能伽马射线能段对宇宙的新观测窗口。该能量段对天体的观测是我们了解宇宙中极端条件下极端物理过程的重要探针。LHAASO探测到的超高能伽马射线源无论是种类还是数量都比预想的更多,揭示了一些天体此前不为人知的另一面,也表明银河系比我们原先认为的要更加活跃。在这些探测到的超高能伽马射线源中,必然包含着一些PeV宇宙线的起源天体。尽管目前能够确认的加速源仅有天鹅座恒星形成区,但随着LHAASO观测时间的增加,我们对目前已知源的性质将会有更加清晰的理解。此外,轻子起源和强子起源的超高能伽马射线源在X射线波段的辐射性质也会有较大的区别。我国近期发射的爱因斯坦探针卫星可以对LHAASO源进行协同观测,帮助证认PeV宇宙线的起源天体。我们可以期待在可见的未来,中国的天文仪器能够对银河系宇宙线这一重要科学问题作出解答。

参考文献

- [1] Cao Z *et al.* Chin. phys. C, 2022, 46: 035001
- [2] Amenomori M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123: 051101
- [3] Cao Z *et al.* Nature, 2021, 594: 33
- [4] Cao Z *et al.* ApJS, 2024, 271: 25
- [5] Blumenthal G, Gould R. RvMP, 1970, 42: 237
- [6] Kelner S *et al.* Phys. Rev. D, 2006, 74: 034018
- [7] Mucke A *et al.* CoPhC, 2000, 124: 290
- [8] Fermi E. Phys. Rev., 1949, 75, 1169
- [9] Sironi L, Spitkovsky A. ApJ, 2011, 741: 39
- [10] Lu Y *et al.* ApJ, 2021, 908: 147
- [11] Blasi P *et al.* ApJ, 2000, 533: 123
- [12] Arons J. ApJ, 2003, 589: 871
- [13] Baade W, Zwicky F. Phys. Rev., 1934, 46: 76
- [14] Hillas A M. J. Phys. G, 2005, 31: 95
- [15] Aharonian F A *et al.* Nature Astronomy, 2019, 3: 561
- [16] Schure K M, Bell A R. MNRAS, 2013, 435: 1174
- [17] Patnaude D, Fesen R. ApJ, 2009, 697: 535
- [18] Helder E, Vink J. ApJ, 2008, 686: 1094
- [19] Cao Z *et al.* ApJL, 2023, 961: 43
- [20] Kothes *et al.* ApJ, 2001, 560: 236
- [21] Ge C *et al.* The Innovation, 2021, 2: 100118
- [22] Gaensler B, Slane P. ARA&A, 2006, 44: 17
- [23] Cao Z *et al.* Science, 2021, 373: 425
- [24] Aharonian F A. Phys. Rev. D, 2022, 66: 023005
- [25] Atoyan A M, Aharonian F A. MNRAS, 1996, 278: 525
- [26] Liu R Y, Wang X Y. ApJ, 2021, 922: 221
- [27] Nie L *et al.* ApJ, 2022, 924: 42
- [28] Giacinti G *et al.* A&A, 2020, 636: 113
- [29] Abeysekara A U *et al.* Science, 2021, 358: 911
- [30] Aharonian F A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 241103
- [31] Bykov A M *et al.* MNRAS, 2013, 429: 2755
- [32] Morlino G. MNRAS, 2021, 504: 6096
- [33] Casse M, Paul J. ApJ, 1980, 237: 236
- [34] Cesarsky C J, Montmerle T. SSRv, 1983, 36: 173
- [35] Abramowski A *et al.* A&A, 2012, 537: 114
- [36] Cao Z *et al.* Science Bulletin, 2024, 69: 449

[37] Ackermann M *et al.* Science, 2011, 334: 1103
[38] Margon B *et al.* ApJ, 1980, 241: 306
[39] Marshall H L *et al.* ApJ, 2002, 564: 941
[40] Abeysekara A U *et al.* Nature, 2018, 562: 82
[41] HESS Collaboration *et al.* Science, 2024, 383: 402
[42] Mioduszewski A J *et al.* ApJ, 2001, 553: 766
[43] Marti J *et al.* A&A, 2001, 375: 476
[44] Sarmorski M, Stamm W. ApJ, 1983, 268: 17

[45] Ho W *et al.* MNRAS, 2017, 464: 1211
[46] Abeysekara A U *et al.* ApJ, 2018, 867: 19
[47] Ackermann M *et al.* ApJ, 2012, 750: 3
[48] Atkins R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 251103
[49] Bartoli B *et al.* ApJ, 2015, 806: 20
[50] Amenomori M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 141101
[51] Cao Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 131: 151001
[51] Linden T, Buckman B. Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 121101

悟理小言

低温物理学家看摩尔定律

笔者虽非电机电子领域出身，也不在半导体产业工作，但作为一位低温物理实验学家，我一直对这项横跨科学与人文的人类文明史上的最高成就之一：“摩尔定律” (Moore's Law)，倍感好奇与充满敬意。

1947年物理学家发明了晶体管，1961年第一个商用集成电路在美国硅谷上市。短短4年之后(1965年)，摩尔(Gordon E. Moore)应邀展望电子组件的未来时，他预测一个集成电路中的晶体管数目，将呈指数形式增长。当年一个集成电路中的晶体管数目约有60颗，2003年时已有一亿颗，如今更高达一十亿颗。最令人惊讶而赞叹的是，摩尔当年预测这一增长“定律”时，他手中只有1962到1965年4年间的4个数据点。他这一胆大又心细的技术与产业的发展预测，既是天才的神来之笔，又展现出了智者和哲人般的高瞻远瞩。

2015年，适逢摩尔定律诞生50周年。在接受纽约时报记者的祝贺和应景访谈时，摩尔特别强调说，半世纪以来，整个半导体工业的繁荣兴旺，都是来自于早期对一些材料的量子力学性质的理解。访谈中，摩尔用心良苦地反复强调基础研究的重要性；他同时深深感慨，认为美国政府(在2010年代)已经不如1960年代那样脚踏实地投资基础设施，制定宏大目标，支持基础科学研究了。他也提醒：“‘摩尔定律’是靠一批杰出的工程师和科学家来实现的。”

2022年11月18日，国际著名期刊《科学》上有一篇探讨摩尔定律前景的特邀文章，作者是美国普渡大学电气和计算机工程学院Mark S. Lundstrom教授及其合作者。文中他们指出，晶体管尺度的微小化已经到了极限，如再缩小，量子隧穿效应就会造成漏电流，危害芯片功能。他们进一步指出，采用立体多层方式把晶体管往上(三维)堆积在硅晶圆上，

虽可增加单位面积的晶体管数，却将造成芯片无法散热。第三点，作者指出当晶体管数目如天文数字般增加时，集成电路中的(分工/功能性)构成区块数目也将持续增加，从而形成一个“复杂系统”，其性质将难以理解和难以模拟预测。最后这点，作者更引用美国已故理论凝聚态物理学家Philip W. Anderson(1977年诺贝尔物理奖得主)的“多则生异”科学哲学观点来佐证他们的论述，令人敬佩其专业功力之深厚与知识之广博。

从以上讨论摩尔定律的精辟文章中，我们获得三点启示：

(1) 2015年接受访谈时，摩尔已86岁高龄，但他宝刀未老，回顾往事，展望未来，仍反复强调必须加强基础科学研究才能带来瓜熟蒂落的技术应用。

(2) Lundstrom点出摩尔定律即将面临的三个严峻问题——电子隧穿、散热和复杂系统——都牵涉基础物理定律如何规范与界定物质世界及其行为的知识和应用，这些问题没有简易的答案，唯有深入探讨，才可能厘清并妥善面对。

(3) 只有电子学，开创不了半导体世纪。例如，发明晶体管的William B. Shockley, John Bardeen和Walter H. Brattain三位，都拥有美国一流大学的物理博士学位。集成电路的共同发明者是Jack S. Kilby和Robert N. Noyce两位，前者有美国一流大学的电机学士和硕士学位，后者拥有物理博士学位。摩尔本人拥有美国一流大学的化学博士学位，并辅修物理。另外，使晶体管和集成电路得以进入大规模工业化生产的平面制程技术的发明人Jean A. Hoerni的学术养成经历也深具启发性，他拥有数学学士学位，两个物理博士学位，之后进入化学系当博士后研究员。

(台湾阳明交通大学 林志忠 供稿)