

伽马天文观测技术综述*

冯思亮^{1,2} 范 鹏^{1,2} 胡一凡^{3,4} 马天予^{3,4} 夏 彦^{1,2†}

(1 北京卫星环境工程研究所 北京 100094)

(2 可靠性与环境工程技术重点实验室 北京 100094)

(3 清华大学工程物理系 北京 100084)

(4 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室 北京 100084)

摘要 伽马射线作为宇宙中极端事件的独特探针,探测伽马射线是人们了解宇宙构成、星体演化和宇宙线起源等的重要途径.伽马天文涉及了宇宙中的各种前沿科学问题并且观测所需能谱跨度极宽(10^2 keV– 10^2 TeV),针对不同的科学目标和细分谱段,必须利用不同的伽马望远镜探测技术.总结了空间和地面的共5大类伽马射线观测技术,分别是编码孔径望远镜、康普顿望远镜、电子对望远镜、成像大气切伦科夫望远镜和广延大气簇射阵列;回顾了70 yr来在观测设备和技术进步的推动下伽马射线天文学领域的巨大进展,其中包含高能和甚高能谱段取得的大量成就,中低能段由于已有观测任务有限以及灵敏度低,超高能和极高能段由于观测难度大、起步时间晚,数据和成果相对其他谱段产出较少;展望了未来已经规划的伽马望远镜任务、能力及预期科学产出,其中,中低能段空间望远镜增强型ASTROGAM望远镜(e-ASTROGAM)、全天区中能伽马射线观测站(AMEGO)和甚高能段地面望远镜阵列高海拔宇宙线观测站(LHAASO)、切伦科夫望远镜阵列(CTA),由于灵敏度较同谱段已有任务灵敏度有大幅提升,极有可能在20 yr内从不同角度再度扩展人类对伽马宇宙的认知.

关键词 仪器: 探测器, 望远镜, 伽马射线: 普通

中图分类号: P172; 文献标识码: A

1 引言

伽马射线作为电磁波谱中最高能量的波段,携带着丰富的信息,对了解宇宙的构成、星体演化和宇宙线的起源等具有重要意义^[1].物理上来说,伽马射线是核反应的直接证据.观测伽马射线主要观测的是相对论喷流的产生和演化以及物质之间的高速碰撞.现象上来说,伽马射线存在于一切高能和极端宇宙事件中.观测伽马射线可以对超新星爆发、活动星系核、黑洞、伽马脉冲星、暗物质等宇宙事件进行观测和研究,可以说伽马射线是天文学中面向极端宇宙的独特窗口^[2].

2020-06-22收到原稿, 2020-08-02收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11605010、11905012)资助

†xiayan_cast@163.com

伽马天文界对伽马射线观测谱段定义并不统一, 比较广泛接受的范围是100 keV–100 TeV^[3]. 但是在2019年7月, 位于中国西藏的羊八井宇宙线观测站(Tibet-AS γ)探测到了24个100 TeV以上来自蟹状星云方向的伽马射线事例, 其中最高能量达450 TeV (达到此前国际正式发表最高能量75 TeV的6倍), 也标志着目前伽马天文的观测谱段上限被提高到了100 TeV以上^[4].

进一步的能谱分区有两种接受度比较高的方法. 第1种是在伽马天文中按伽马射线能量划分^[5], 分为5个能段, 见表1. 另一种是从伽马射线观测技术手段的擅长探测范围来对能谱进行分区, 分为5个能段, 见表2.

表 1 伽马射线观测谱段按能量划分

Table 1 Gamma-ray observation spectrum classification based on energy

Energy domain	Energy range
Low- and medium-energy	0.1 MeV–20 MeV
High-energy	20 MeV–30 GeV
Very-high-energy	30 GeV–30 TeV
Ultra-high-energy	30 TeV–30 PeV
Extremely-high energy	≥ 30 PeV

表 2 伽马射线观测谱段按采用的观测技术划分

Table 2 Gamma-ray observation spectrum classification based on observing technique

Energy domain	Technique	Typical missions
Low-energy	Coded-aperture Telescopes	INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) ^[6]
Medium-energy	Compton Telescopes	COMPTEL (The Compton Telescope) ^[7]
High-energy	Pair-production Telescopes	Fermi (Fermi Gamma-ray Space Telescope) ^[8] and AGILE (Astrorivelatore Gamma a Immagini LEggero) ^[9]
Very-high-energy	Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes	H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) ^[10] , MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov) ^[11] , VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) ^[12]
	Extensive Air Shower Arrays	Tibet-AS γ ^[13] and HAWC (High-Altitude Water Cherenkov observatory) ^[14]

对宇宙中低能段伽马射线的探测从上世纪50年代末就已经开始了^[15], 中能^[16]和高能^[17]的探测从上世纪60年代末开始, 甚高能的观测从上世纪80年代末开始^[18]. 从发展上来说, 高能段由于Fermi卫星的巨大贡献发展最快, 已经观测到超过3000个稳定的伽

马源^[19], 甚高能段的成果也令人瞩目, 观测到的TeV伽马源中已证认的有227个(截止到2020年1月)¹. 低能段和超高能段的成果略少, 数百keV到MeV的伽马源只发现了数十个^[20], 超能段的伽马源直到2019年才第1次发现^[4].

本文旨在对国内外过去、现在和规划中的空间、地面伽马望远镜技术进行调研, 回顾伽马射线观测技术能力提升推动下的伽马射线天文学进展, 同时通过对未来伽马射线观测技术能力的判读, 展望未来20 yr的伽马射线天文学科学产出.

2 天文观测使用的伽马射线探测技术

原初的宇宙线成分中含量最高的是质子, 其次是从氢核到铁核等各种原子核以及少量的伽马光子、电子和中微子. 当宇宙线中的高能强子或伽马光子进入大气层后, 在大概距离地面10–15 km处会与空气中的原子核发生相互作用产生次级粒子, 次级粒子继续和空气中原子核相互作用产生新的次级粒子, 只要能量够高, 这个过程就会不断继续, 这个反复进行下去的过程就是“广延大气簇射”(Extensive Air Shower, EAS)^[21]. 在这个过程中, 次级粒子个数增加, 原初粒子的能量则分布在次级粒子中, 并且切伦科夫光和大气荧光也将在EAS的发展过程中产生. 根据原初宇宙线粒子种类及其与大气分子之间的作用类型将EAS分为两类: 分别是电磁级联和强子级联. 伽马天文中, 原初的高能伽马光子产生次级粒子(正负电子对和电子韧致辐射产生伽马光子)的过程就属于电磁级联, 如图1所示.

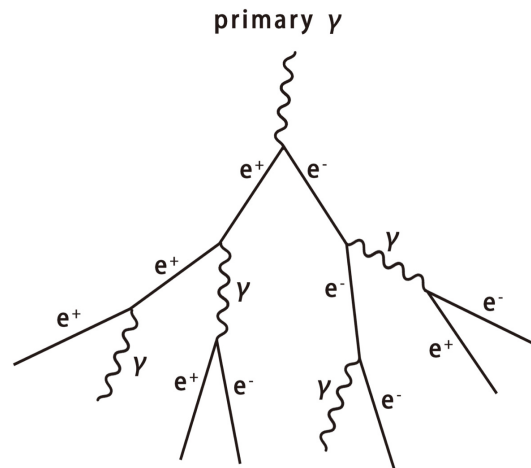


图1 电磁级联示意图

Fig. 1 Schematic of the electromagnetic cascade

对于伽马射线的探测, 目前可以分为空间直接探测和地面间接探测两类. 由于地球大气层对伽马射线的吸收很强烈, 因此需要在大气层外对伽马射线进行直接探测, 例如在探空火箭、高空气球和人造卫星上面搭载探测仪器, 然而空间探测的技术和费用限制了探测器的规模一般不超过1 m², 从而使得这类技术更适合探测中低和高能段的伽马射线. 对于甚高能和超高能伽马射线, 伽马射线的流强随着能量增高快速下降, 从而限制

¹TeV伽马源表, <http://tevcat.uchicago.edu/>.

了可探测的伽马光子数量,此外由于高能以上伽马光子和材料作用截面基本不变,如果想要完全捕获甚高能和超高能的伽马射线就需要增加探测面积,而大型探测器对于空间探测来说几乎是不可能实现的,因此进行地面探测.在地面放置探测器阵列可以使我们能间接地探测EAS中产生的这些次级粒子并反演到原初伽马光子.在粒子统计量方面,地面探测器阵列的接收面积大,从而很好地弥补了粒子数目不足的问题,和空间实验互补,共同促进伽马天文的发展.

2.1 空间伽马射线探测技术

对于卫星搭载的空间探测来说,探测的主要是原初伽马光子,直接探测的能量范围在数百GeV以内.根据技术手段可以把空间探测分为3大类:编码孔径望远镜、康普顿望远镜和电子对望远镜.空间实验的直接探测可以避免地球大气对宇宙射线的吸收,所以在角分辨率和能量分辨率上通常比地面实验要高.此外,宇宙线的背景流强过高(是伽马射线背景流强的 10^3 倍以上)^[22]也是空间探测伽马射线时会碰到的难题,因此有效排除宇宙线背景、提高信噪比也是空间伽马射线探测的重点之一.目前空间实验大多会应用反符合探测器半包裹在内部望远镜探测器上,用以区分或剔除宇宙本底.

2.1.1 编码孔径望远镜

编码孔径成像最早起源于X射线和伽马射线辐射成像设备的研制,是为了提高成像系统的信噪比和角分辨率,在单针孔基础上发展起来的一种多孔成像技术^[23].它可以理解为是一种通过编码孔径来改善成像系统的传递函数,进而实现一定方式的像元组合技术.编码孔径望远镜的探测能段一般为10 keV–10 MeV,它通过编码和解码的过程,重建出入射的伽马射线的方向位置信息,如图2所示^[24].在编码板下方放置闪烁体探测器或者半导体探测器用以对入射伽马射线的能量进行吸收和确定.典型的空间编码孔径望远镜有美国国家航空航天局(NASA)的康普顿伽马射线天文台(CGRO)任务的OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment)^[25]、欧洲空间局(ESA)的INTEGRAL任务的IBIS (the Imager on Board the Integral Satellite)^[26]、NASA的雨燕伽马射线暴探测器(Swift)任务的BAT (Burst Alert Telescope)^[27]和中法合作的太空多波段天文变源监视器(Space-based multiband astronomical Variable Objects Monitor, SVOM)规划任务^[28].

2.1.2 康普顿望远镜

康普顿望远镜是一种利用伽马光子康普顿散射效应成像的装置,适合于能量在0.1 MeV到几十MeV伽马光子的成像.康普顿望远镜一般是由两层伽马射线探测器(散射层和吸收层)组成的,每层探测器又由闪烁体探测器和光电倍增管(PMT)等组成,如图3所示^[24].入射的伽马射线在散射层发生康普顿散射并沉积部分能量,之后散射的伽马射线在吸收层被完全吸收并沉积全部能量.根据康普顿散射的公式可以反演出伽马源一定会处于一个圆锥表面上,但是并不能确定其绝对方向^[29].对同一个源的伽马射线多次反演,这样多个圆锥区域的最大机率交叠部分就可以作为伽马源的位置,从而对伽马源位置精确定位.此外,通过增加层数的多层探测技术目前来看已经成为了成熟的技术,可以有效提高康普顿望远镜的探测效率^[30].典型的康普顿望远镜有NASA的CGRO任务的COMPTEL^[7]和瞬变事件和核天体物理先进探测器(ASTENA)概念任务设计^[31].

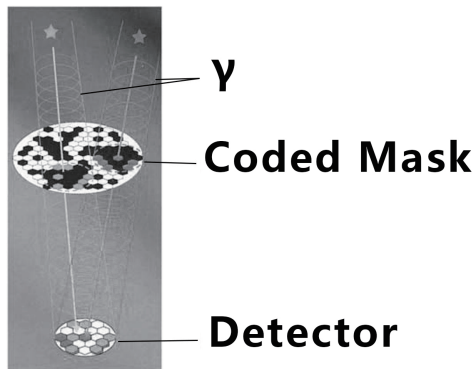


图2 编码孔径望远镜技术示意图, 图片来自文献[24].

Fig. 2 Schematic of the coded-aperture telescopes, this figure is from reference [24].

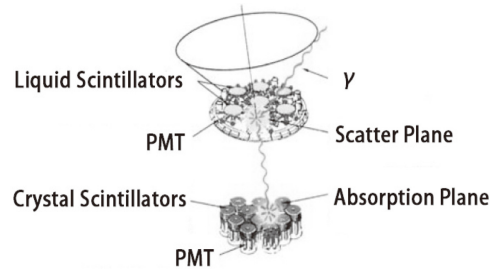


图3 康普顿望远镜技术示意图, 图片来自文献[24].

Fig. 3 Schematic of the Compton telescopes, this figure is from reference [24].

2.1.3 电子对望远镜

该技术探测的能量范围是20 MeV–30 GeV. 很早之前的电子对望远镜是火花室配合量能器, 如CGRO任务的EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope). 而现代电子对望远镜的主体其实是位置分辨率很好的硅微条探测器, 适合于大面积、高分辨率的伽马射线探测. 入射的高能伽马射线会与转换层(一般使用钨板)发生相互作用产生电子对. 从探测平面上采集电荷信息, 就可以获得入射粒子在该2维平面上的一个坐标位置. 多个探测面上上下交错放置就可以构成探测阵列, 在径迹重建算法的帮助下, 根据每个探测面的击中信息就可以精确计算出入射粒子的径迹信息^[32]. 最后, 通过下方放置量能器来对带电粒子进行吸收并测量出沉积的粒子能量, 如图4所示^[8]. 典型的电子对望远镜有NASA的Fermi任务的LAT (Large Area Telescope)^[8]、意大利的AGILE^[9]任务、俄罗斯牵头的最大能量400 GeV的伽马天文多功能模块化仪器(GAMMA-400)规划任务^[33]、NASA的先进高能电子对望远镜(AdEPT)规划任务^[34]、中国的“悟空”暗物质粒子探测卫星(DAMPE)^[35]和中国空间站高能宇宙辐射探测设施(HERD)规划任务^[36].

康普顿-电子对望远镜顾名思义, 它采用的是将康普顿望远镜和电子对望远镜相结合的技术, 探测能段为0.3 MeV–3 GeV. 它的结构原型是电子对望远镜, 不同的是它使用了康普顿望远镜中的双边硅微条探测器(Double-sided Silicon Detectors, DSSD)来探测中低能的伽马射线. 康普顿望远镜和电子对望远镜两种探测技术相比较, 前者比后者更复杂是因为散射光子也携带了入射光子的信息, 所以在探测电子能量和位置的同时还需要考虑散射光子的因素. 对于康普顿事件, 康普顿-电子对望远镜入射伽马光子发生康普顿散射后沉积部分能量 E_1 并被记录位置信息; 同时散射电子e的能量、位置信息也可由硅微条探测器确定; 散射光子 γ' 的能量 E_2 和位置信息由下方量能器来确定, 最后通过计算散射角 θ 获得光子的入射信息. 对于电子对事件, 产生的电子对还是在硅微条探测器中获取位置信息, 在下方的量能器中确定能量, 具体形式如图5所示^[37]. 典型的康普顿-电子对望远镜有ESA的增强型ASTROGAM (e-ASTROGAM)规划任务^[38]、美国提出的康普顿电子对空间望远镜(ComPair)任务设计^[37]和NASA的全天区中能伽马射线观测站(AMEGO)规划任务^[39].

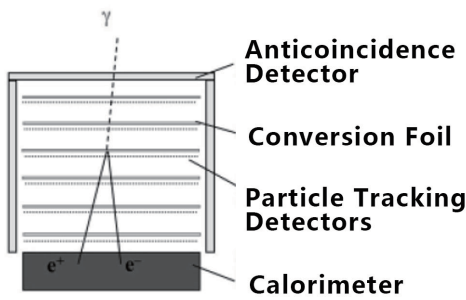


图 4 电子对望远镜示意图, 图片来自文献[8].

Fig. 4 Schematic of the pair-production telescopes, this figure is from reference [8].

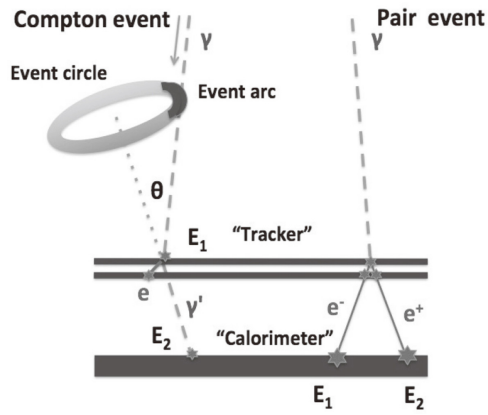


图 5 康普顿-电子对望远镜示意图, 图片来自文献[37].

Fig. 5 Schematic of the Compton-pair production telescopes, this figure is from reference [37].

2.2 地面伽马射线探测技术

目前, 地面实验以两类为主, 分别是成像大气切伦科夫望远镜(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT)和EAS阵列, 探测的能量范围是GeV到TeV能段及以上, 前者对簇射过程的光子进行探测, 后者对簇射过程的粒子进行探测. IACT和EAS阵列各有优缺点, 在一定程度上是可以互补的, 两种探测技术如图6所示.

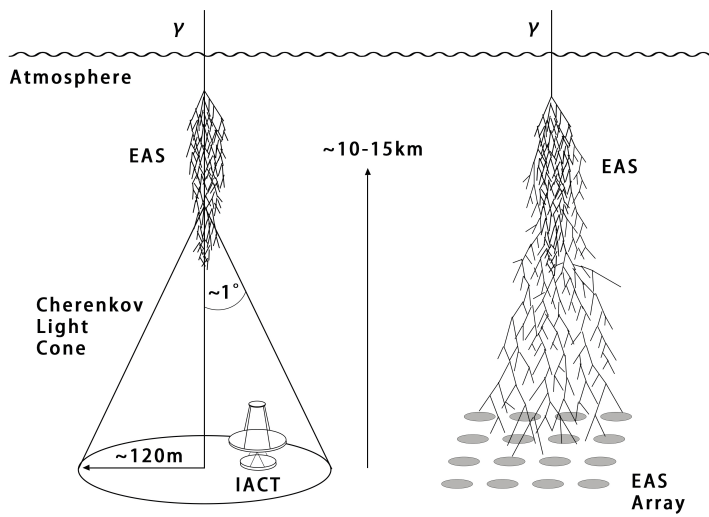


图 6 两种地面探测技术示意图, 左为成像大气切伦科夫望远镜, 右为EAS阵列.

Fig. 6 Schematic of two kinds of ground-based gamma-ray observing techniques. The IACT is shown on the left, and EAS array is shown on the right.

2.2.1 成像大气切伦科夫望远镜IACT

原初伽马射线在簇射径迹上产生大量高速带电粒子, 这部分带电粒子穿过透明介质时, 若其速度大于光子在该介质中的速度, 则会产生切伦科夫光辐射^[40]. IACT会通过多面反射镜将切伦科夫光子反射到望远镜的焦平面上, 之后由PMT放大并记录所得的图像, 可以说是一种纯光学的系统, 对高能粒子径迹进行直接的成像. 从不同方向收集到的光子, 最后将在探测器焦平面上汇聚成一个小的椭圆形径迹, 椭圆长轴的方向指向簇射中心^[41]. 利用多台相距几十米的望远镜组成一个阵列, 就可以比较准确地测量簇射的方向和形状, 并以此反推出簇射发生的地点以及引发簇射的粒子, 如图7所示^[22].

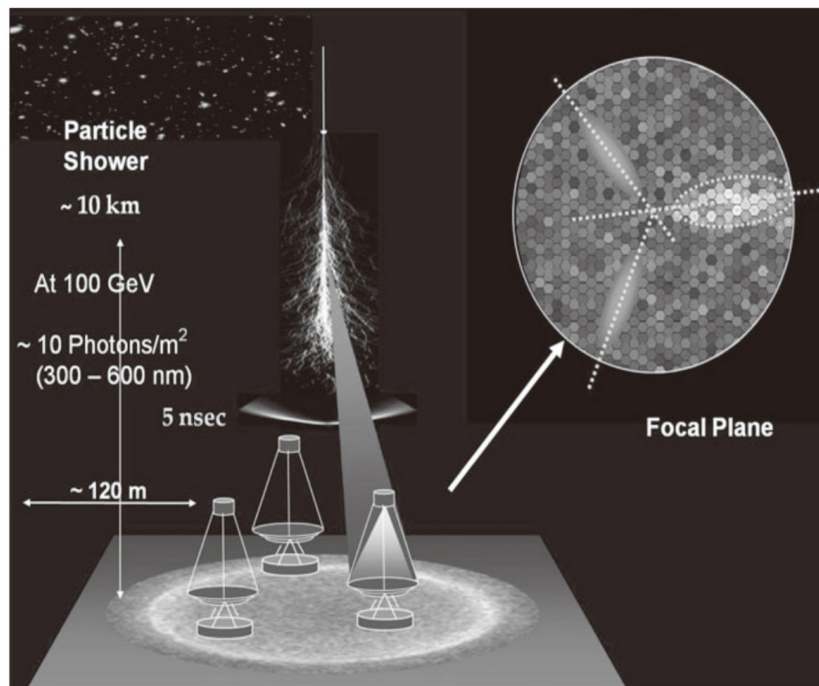


图7 大气切伦科夫望远镜成像技术的示意图, 图片来自文献[22].

Fig. 7 Schematic of the IACT, this figure is from reference [22].

IACT视场比较小, 由于测量的是由次级粒子在大气中产生的切伦科夫光, 所以只能在晴朗无月的夜间运行, 平均观测时间只能达到10%左右. 但是它的角分辨率和能量分辨率都很好, 有较低的能量阈值, 而且对原初宇宙线的伽马射线和质子有较强的区分能力, 已经成为了地面上主流的甚高能伽马望远镜. 众所周知的IACT有H.E.S.S.^[10]、MAGIC^[11]、VERITAS^[12]等.

2.2.2 广延大气簇射(EAS)阵列

在广阔并且平坦的区域建造多种大量的粒子探测器从而组成EAS阵列, EAS阵列的探测模式有两种: 其一是利用探测器对簇射的前锋面进行抽样测量, 记录簇射的次级粒子到达的时间、粒子的密度分布和电荷等信息, 从而分析并重建出原初粒子的方向、能量以及成分; 其二是只记录在固定时间间隔内到达的次级粒子个数, 没有关于次级粒子到达探测器时的位置信息^[42]. 当来自伽马暴(GRB)的高能光子到达大气层产生EAS时,

有些能量不足以在观测面形成大量粒子的簇射, 然而许多次级粒子却有可能在较短的时间内达到观测面, 此时采用第2种模型利用较小的探测面积就可以完成探测任务, 可以明显提高本底事例率.

EAS阵列相比于IACT视场更大, 探测的能段也可以更高, 可以对次级粒子进行充足的采样, 并且可以全天候不间断的探测, 但是此类实验测量的只是簇射的前锋面或者次级粒子到达的时间, 不能测量其发展过程, 因此难以区分原初入射粒子的种类. 此外它能够同时观测多个点源以及监测光变源, 这对寻找未知源来说非常有利. EAS阵列设计之初是用于测量宇宙线的能谱和化学成分, 但是采用对簇射前锋面抽样测量的方法触发阈能很高, 再加上大量的宇宙线本底, 所以很难探测到伽马信号, 角分辨率和能量分辨率相对于IACT较低. 解决办法是通过增加探测器覆盖的密度再结合高海拔的优势就可以有效降低阈能, 从而探测到高能伽马射线. 对于探测面积和所处海拔不同的EAS阵列, 它们的工作能区各不相同, 能区可以从TeV一直延伸到更高能区. 著名的EAS阵列实验有羊八井天体物理地面观测站(ARGO-YBJ)^[43]等.

水切伦科夫探测器(Water Cherenkov Detector, WCD)阵列属于EAS阵列, 它以水作为转化体, 工作原理是探测簇射后的次级粒子在水箱里产生的切伦科夫光的光子, 之后由PMT放大并记录信号, 属于一种粒子采样器(Particle Sampler), 技术原理示意图如图8^[41]. 水切伦科夫探测器目前已经作为一种成熟的伽马望远镜技术, 应用于甚高能伽马天文观测. 比较著名的实验有奇迹伽马射线望远镜(Milagro)^[44]、Tibet-AS γ ^[13]和HAWC^[14]等.

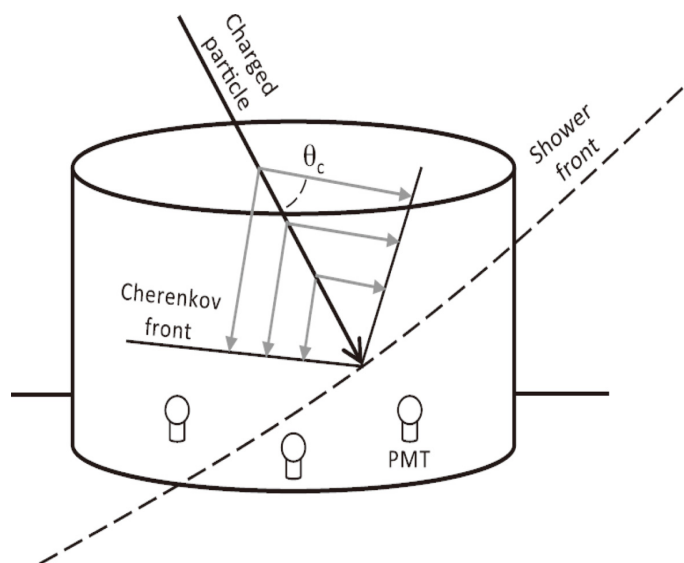


图 8 水切伦科夫探测器示意图, 图片来自文献[41].

Fig. 8 Schematic of the WCD, this figure is from reference [41].

针对不同的细分谱段, 以5种伽马射线探测技术为代表的空间和地面望远镜正不断地刷新我们对于伽马天文的认识. 表3总结了上述5种伽马射线探测技术及其对应探测器的典型参数.

表 3 采用5种伽马射线探测技术探测器的典型参数比较
Table 3 Comparison of the detector typical characteristics using 5 kinds of gamma-ray detecting techniques

Parameter	Coded-aperture telescopes (INTEGRAL-IBIS)	Compton telescopes (CGRO-COMPTEL)	Pair-production telescopes (Fermi-LAT)	IACTs (H.E.S.S.)	EAS arrays (HAWC)
Energy range	15 keV–10 MeV	800 keV–30 MeV	20 MeV–300 GeV	100 GeV–100 TeV	> 10 GeV
Field of view	8°	1 str	2.4 str	< 5°	2 str
Angular resolution	12′	1°	0.15°	< 0.1°	1°
Energy resolution	8%@100 keV, 10%@1 MeV	8.8%@1.27 MeV	6% (> 10 GeV)	20%	100%
Effective area	2600 cm ² (CdTe), 3000 cm ² (CsI)	10–50 cm ²	1 m ²	> 10 ⁴ m ²	> 10 ⁴ m ²
Observing time	100%	100%	100%	10%	90%

3 观测技术推动下的伽马天文进展

3.1 空间探测及科学进展

1967年OSO-3卫星发现了弥散伽马射线背景并证明了银河系是一个明亮的充满伽马源的地方, 如图9左所示^[45], 但是其没有成像能力, 在绘制银河系天图时, 伽马源的坐标由源在银河系的经度和纬度所确定. 1972年的SAS-2卫星首次给出了具有统计意义的伽马射线辐射结果^[46], 之后的COS-B探测到了25个能量大于100 MeV的伽马射线点源并绘制了伽马源天图, 如图9右所示^[47]. 1991年康普顿伽马射线天文台CGRO升空, 它携带的EGRET探测器专门作为早期的电子对望远镜用于探测高能伽马射线, 观测到了271个伽马点源, 绘制了伽马源天图, 并对源进行了简单的分类: 如活动星系核(AGN)、大麦哲伦星系(LMC)、脉冲星、耀斑以及一些待确认的源, 如图10左所示^[48]. 之后Fermi卫星作为EGRET的升级版于2008年升空并运行至今, Fermi-LAT是具有高灵敏度的电子对望远镜, 探测能段20 MeV–30 GeV, 探测灵敏度都相比于EGRET又提升了一个量级^[8]. 同时, Fermi-GBM (Gamma-ray Burst Monitor)作为辅助探测器, 探测能段为8 keV–40 MeV, 主要用于监测伽马暴, 并在探测瞬态源的时候对LAT进行补充^[49]. 值得一提的是, 在2017年美国激光干涉引力波天文台(the Laser

Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO)探测到双中子星并合产生的引力波事件GW 170817之后, GBM观测到了首例引力波事件的伴随短伽马射线暴GRB 170817 A^[50]. Fermi卫星是目前空间上最成功的伽马射线望远镜, 绘制了目前银河系最佳分辨率的伽马源天图并进行分类如活动星系核、脉冲星、超新星遗迹(SNR)、脉冲星风云(PWN)等, 如图10右所示^[19], 还发现了费米气泡, 首次探测到能产生中微子的活动星系TXS 0506+056等². 此外, 意大利的AGILE任务于2007年升空, 除了观测到了河内河外的各种伽马源外, 还观测到了蟹状星云存在着耀发现象等³. Fermi卫星和AGILE卫星采用电子对望远镜丰富了我们对于高能伽马天文的认识. 在过去的40 yr里, 随着探测器能力的不断提升, 越来越多的伽马源被我们发现, 表4总结了不同时期的3个空间任务编制的高能伽马源编目.

2002年发射的INTEGRAL卫星的IBIS以及2004年Swift卫星的BAT作为编码孔径望远镜在低能伽马天文中也做出了重要贡献, 比如INTEGRAL测量了整个银河系²⁶Al的水平, 证明了银河系平均每个世纪会产生两颗超新星; Swift每年会探测到大约100次GRB, 证实了GRB作为高红移宇宙独特探针的前景, 提供了关于黑洞诞生的关键信息等^[51]. 此外, 工作9 yr于2000年退役的CGRO的COMPTEL作为康普顿望远镜, 从Cas A探测到了⁴⁴Ti的放射性衰变线^[52], 根据1.809 MeV线绘制了银河中心²⁶Al天图^[53]等. 但是相比于高能伽马天文, 中低能的成就还是略显不足, 也没有伽马源编目正式发布过.

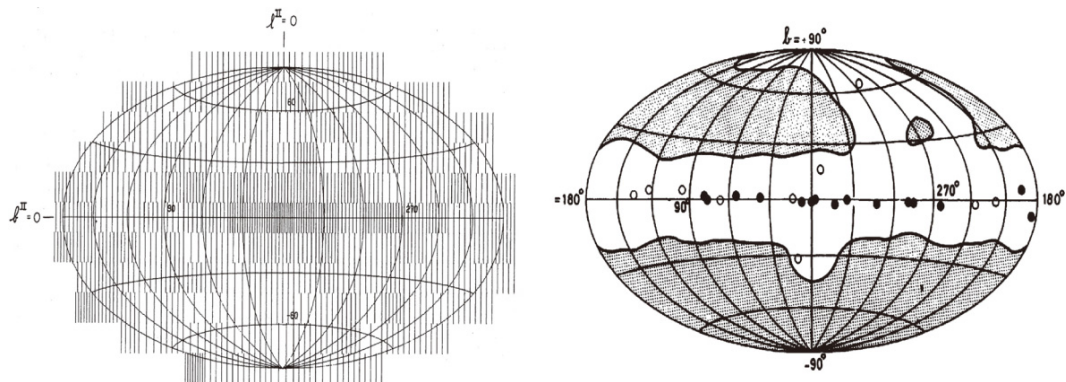


图9 伽马射线探测卫星的观测结果. 左为OSO-3的伽马源天图, 右为COS-B的伽马源天图(编目2CG). 左图来自文献[45], 右图来自文献[47].

Fig. 9 The observation results from gamma-ray satellites. The gamma-ray source sky map from OSO-3 is shown on the left, and from COS-B (catalogue 2CG) is shown on the right. Left panel is from reference [45], and right panel is from reference [47].

²<https://fermi.gsfc.nasa.gov/>.

³<http://agile.iasf-roma.inaf.it/>.

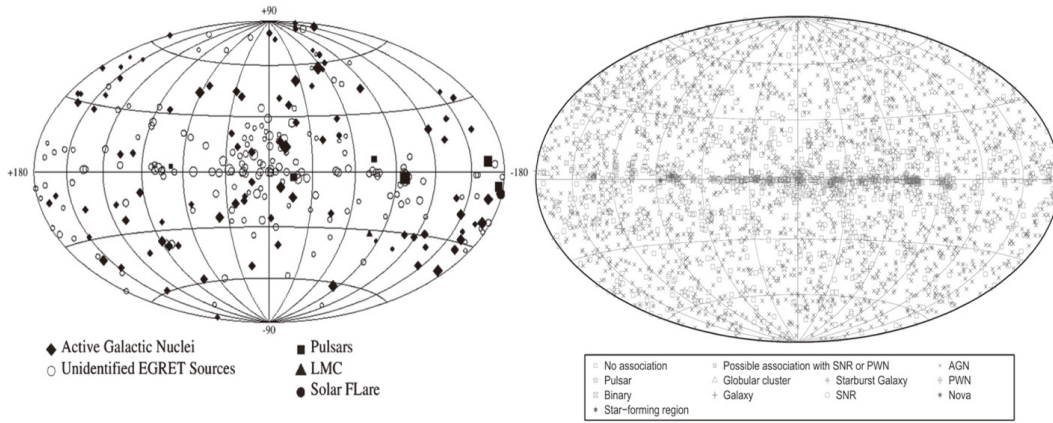


图 10 伽马射线源分布图. 左为根据EGRET绘制的伽马源天图(编目3EG), 右为根据Fermi绘制的伽马源天图(编目3FGL). 左图来自文献[48], 右图来自文献[19].

Fig. 10 Map of gamma-ray source locations in Galaxy. The third EGRET catalogue (catalogue 3EG) is shown on the left, and the third Fermi-LAT catalogue (catalogue 3FGL) is shown on the right. Left panel is from reference [48], and right panel is from reference [19].

表 4 空间任务编制的高能伽马源编目

Table 4 Catalogues from space missions in high-energy gamma-ray sources

Satellite or experiment	Catalogue	Year of the catalogue	Number of sources
COS-B	2CG	1981	25
CGRO-EGRET	3EG	1999	271
Fermi-LAT	3FGL	2015	3033

3.2 地面探测及科学进展

第1代地基伽马望远镜惠普大气切伦科夫望远镜(WHIPPLE)于1989年观测到了第1个甚高能伽马源蟹状星云, 也标志着甚高能伽马天文的开始^[18].

随着IACT技术和EAS阵列技术的发展, 第2代地基伽马望远镜也逐渐成型. 以IACT技术发展的任务有CAT阵列(The Cherenkov Array at Thémis)^[54]、高能伽马射线天文望远镜(HEGRA)阵列^[55]和澳大利亚、日本联合内陆伽马射线天文台(CANGAROO)^[56]等. 与此同时, 为了解决IACT的视场过窄的弊端, 一些小组通过研究波前采样技术而在法国建立了追踪簇射高能 μ 子触发的切伦科夫光(THEMISTOCLE)望远镜, 虽然非成像的切伦科夫望远镜有着更低的阈能, 但是其分辨率和视野等性能指标无法达到第3代地基伽马望远镜的高度, 最终在2005年左右便不再继续研究这种望远镜技术^[57]. 坐落在新墨西哥北部的Milagro实验于1999年开始运行, 作为大型WCD, 对北半球全天空TeV的伽马射线进行监测^[44]. 截至第2代地基伽马望远镜时代的结束(大约在2000年左右), 7个伽马源的数据结构已经被逐步建立起来, 分别是蟹状脉冲星云、河内超新星遗址RX J1713.7-3946^[58]、河外源Mrk 421、Mrk 501、1ES 1959+650、PKS 2155-304^[59]和1ES 1426+428^[60].

目前第3代地基伽马天文望远镜还是以IACT和EAS阵列为主,正在不断地丰富我们对甚高能伽马天文学的认知.第3代的IACT如CANGAROO-III^[61]、H.E.S.S.^[10]、MAGIC^[11]和VERITAS^[12],采用数面大口径(10–15 m)望远镜组成阵列,进一步提高了望远镜的角分辨率和能量分辨率,有效降低了探测阈能.第3代的EAS阵列主要以WCD为主,如Tibet-AS γ ^[13]和HAWC^[14],也在不断产出观测成果.Tibet-AS γ 和HAWC的探测将我们关于蟹状星云中的粒子加速和辐射的标准图像光滑地延伸到了高能,这证明了初始电子的能量在蟹状星云中被加速到接近1 PeV^[62].Tibet-AS γ 在2019年7月首次探测到了100 TeV以上的伽马射线事例,其中最高能量达450 TeV(高达此前国际上正式发表最高能量75 TeV的6倍)^[4].截至2020年1月,甚高能以上已经有227个TeV能段的伽马源被探测并记录到线上更新的TeV伽马源编目中,伽马源的分布如图11所示.

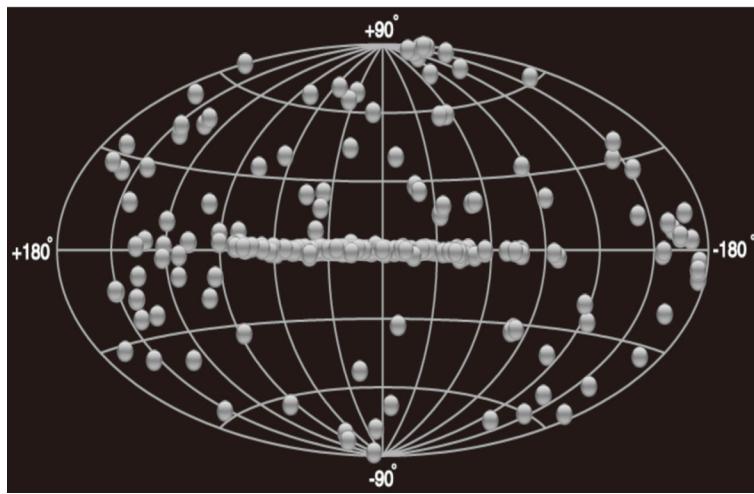


图 11 TeV能段伽马源分布图

Fig. 11 Map of TeV gamma-ray sources in Galaxy

3.3 未来探测及科学进展

至今,空间和地面探测器已经在高能、甚高能能段取得了大量成就,但是在中、低能能段的数据和成就还需要填补.ESA的e-ASTROGAM^[38],作为一个将康普顿望远镜和电子对望远镜结合的卫星,保证宽视野的同时观测能区跨越4个量级(0.3 MeV–3 GeV),在0.3 MeV–100 MeV的灵敏度相比于COMPTEL会提升1到2个数量级.NASA的AMEGO^[39]和e-ASTROGAM类似,观测能区为0.2 MeV–5 GeV,灵敏度是COMPTEL的20倍.e-ASTROGAM和AMEGO将会探索银河系中心和内部的奥秘,星系内外重元素的核合成与传播和来自极端粒子加速机制等.

下一代地基伽马望远镜也早就已经规划并建设了,包括分别建在南北半球(智利和西班牙拉帕尔玛岛)的切伦科夫望远镜阵列(Cherenkov Telescope Array, CTA)^[63]和中国四川稻城的高海拔宇宙线观测站(Large High Air Altitude Shower Observatory, LHAASO)^[64–65].基于IACT技术,CTA是由大中小型以及中型双镜版本组成的望远

镜阵列, 并计划将现有的IACT灵敏度提高10倍, 观测能区同样跨越4个量级(20 GeV–300 TeV). CTA主要面向相对论性宇宙粒子起源、极端环境、新物理现象等重要科学前沿领域开展探索研究. LHAASO分别采用不同的技术手段, 对宇宙线粒子和 γ 射线产生的EAS作多参数的精确测量, 能谱范围从几百GeV到上百TeV. 它与CTA的优势互补, 探测并进行高能的宇宙线起源以及相关的宇宙演化、高能天体演化和暗物质的研究.

图12中根据灵敏度对现有和未来的主流伽马望远镜进行了整理, 并分别用不同颜色代表了不同的观测谱段, 用不同线型代表了过去、现有和未来的伽马望远镜任务. 未来伽马天文的全球规划中, e-ASTROGAM、AMEGO、LHAASO和CTA分别作为空间和地面探测技术的望远镜代表, 不仅对应数据较为缺失的谱段, 并且灵敏度较已有任务有大幅度提高. 天文学的观测历史表明, 探测器能力的代际提升, 必将伴随着重大的科学产出. e-ASTROGAM和AMEGO将加深我们对低能段宇宙射线的理解, 丰富银河系的化学、生命、恒星演化的信息; LHAASO和CTA有望在更高的能量上寻找暗物质并针对高能宇宙射线加速机制进行更详细的观测. 若这4个项目实施, 我们可以预测未来20 yr的 γ 天文仍将处于非常活跃的状态. 但ASTROGAM在ESA的中等M4⁴项目竞争中未被选入, 升级为e-ASTROGAM后参与M5⁵竞争也未脱颖而出, AMEGO是NASA还处在任务规划阶段, 如果被立项实施, 计划于2029年左右发射, 两者的不确定性使得中低能谱段的未来不完全明朗. CTA于2005年开始规划, 计划于2022年先开始初步运行, 到2025年整体建成. LHAASO于2015年底获得批复, 之后一直在稳步建设中. 相信LHAASO和CTA一定会在已知和未知的科学问题上, 继续拓展人类对甚高能伽马宇宙的认知.

4 结论

伽马天文需要100 keV–450 TeV甚至更高的超宽能谱观测, 针对不同的科学目标和细分谱段, 必须利用不同的伽马望远镜探测技术, 从低能到极高能, 本文分别介绍了主流的编码孔径望远镜、康普顿望远镜、电子对望远镜、大气切伦科夫望远镜和广延大气簇射阵列技术. 自上个世纪50年代预言存在伽马宇宙线, 在至今不到70 yr的时间里伽马天文学取得了巨大的突破, 我们认识到伽马背景、各能段伽马源、长短伽马暴的存在, 我们通过银河系伽马、太阳伽马和地球伽马事件从更多的侧面了解星系、恒星和地球发生发展中的物理过程. 当前需要伽马天文参与揭示的前沿热点科学问题包括: 探索暗物质本质、宇宙射线的起源和粒子加速机制等, 这些前沿科学问题会拉动伽马望远镜观测技术向着更高灵敏、更高时空分辨的方向发展. 从目前的探测器历史和能力来看, 未来20 yr最有望产生令人瞩目的科学产出的是空间的e-ASTROGAM和AMEGO (都尚未立项实施)以及地面的LHAASO和CTA (都尚在建设), 它们是填补观测历史较为空白谱段的新一代高灵敏度望远镜, 依据天文观测的历史经验, 极有可能带给我们新的宇宙认知. 其中e-ASTROGAM和AMEGO有望加深我们对宇宙射线中低能段的理解, 探索银河系中心和内部的奥秘、星系内外重元素的核合成与传播和来自极端粒子加速机制等.

⁴第4个中型尺寸探测器任务(the fourth Medium-size mission, M4)属于ESA征集的、计划于2025年发射的宇宙视觉科学计划(Cosmic Vision Science Programme).

⁵第5个中型尺寸探测器任务(the fifth Medium-size mission, M5)属于ESA进行征集的、计划于2029—2030年发射的宇宙视觉科学计划.

LHASSO和CTA有望对高能宇宙线起源以及相关的宇宙演化、高能天体演化和暗物质等重要科学前沿领域提供观测与实验数据. 伽马射线是宇宙高能事件的独特探针, 宏大的宇宙用伽马描述着地球上、太阳系、银河系内甚至我们星系团中无法发生的高能极端事件, 人类了解宇宙、欣赏宇宙的本能是伽马天文观测以及伽马天文科学发展的永恒动力.

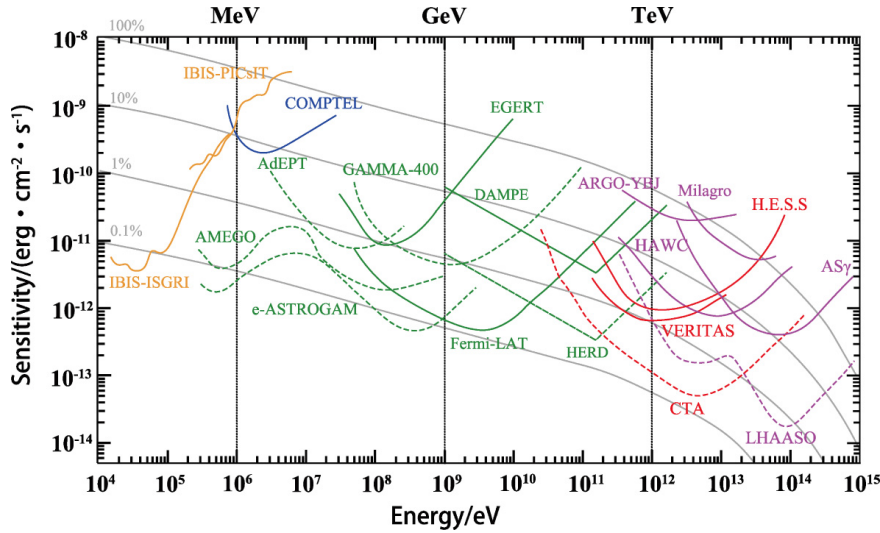


图 12 伽马天文观测任务 5σ 灵敏度曲线图($1 \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 1 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$). 该图为在同一坐标系下对以往6张不同任务灵敏度曲线图^[2-3, 38-39, 66-67]的整合处理(其中不同图对同一任务的曲线有不一致的情况, 处理方法为对不同曲线取平均形成新曲线). 图中按5大类探测技术对曲线颜色进行区分, 黄色为编码孔径望远镜, 蓝色为康普顿望远镜, 绿色为电子对望远镜, 红色为IACT, 紫色为EAS阵列. 对现有和未来规划任务进行区分, 实线表示现有的任务, 虚线表示未来规划的任务. 灰色线条从上到下分别代表了1毫蟹状星云的微分能量通量的100%、10%、1%和0.1%.

Fig. 12 Differential 5σ sensitivity of gamma-ray telescopes ($1 \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 1 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$). Fig.12 composes the previous 6 different sensitivity figures^[2-3, 38-39, 66-67] under the same coordinate system (the new curves are taken the average from different curves when different figures have inconsistencies in one curve of the same mission). Colors distinguish the different detecting techniques, yellow for the Coded-aperture telescopes, blue for Compton telescopes, green for pair-production telescopes, red for IACT, and purple for EAS arrays. Future planned missions are shown as dashed lines, exiting or past missions are shown as solid lines. The grey lines show the 1 mCrab differential energy flux, as well as 10%, 1% and 0.1% of that flux.

参考文献

- [1] De Angelis A, Mallamaci M. EPJP, 2018, 133: 324
- [2] Funk S. ARNPS, 2015, 65: 245
- [3] Knödseder J. CRPhy, 2016, 17: 663
- [4] 李健, 王艳刚, 董瑞丰. 瞭望, 2019, 31: 60
- [5] De Angelis A, Mansutti O, Persic M. NCimR, 2008, 31: 187
- [6] Winkler C, Courvoisier T J L, Di Cocco G, et al. A&A, 2003, 411: L1
- [7] Schoenfelder V, Aarts H, Bennett K, et al. ApJS, 1993, 86: 657
- [8] Atwood W B, Abdo A A, Ackermann M, et al. ApJ, 2009, 697: 1071
- [9] Pittori C, Tavani M, the AGILE Team. NuPhS, 2004, 134: 72

- [10] Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R, et al. *A&A*, 2006, 457: 899
- [11] Aleksić J, Alvarez E A, Antonelli L A, et al. *APh*, 2012, 35: 435
- [12] Weekes T C, Badran H, Biller S D, et al. *APh*, 2002, 17: 221
- [13] 陈天禄, 刘茂元, 单增罗布, 等. *西藏大学学报(自然科学版)*, 2011, 26: 103
- [14] Deyoung T, For the HAWC Collaboration. *NIMPA*, 2012, 692: 72
- [15] Peterson L, Winckler J R. *PhRvL*, 1958, 1: 205
- [16] Arnold J R, Metzger A E, Anderson E C, et al. *JGR*, 1962, 67: 4878
- [17] Kraushaar W L, Clark G W. *PhRvL*, 1962, 8: 106
- [18] Weekes T C, Cawley M F, Fegan D J, et al. *ApJ*, 1989, 342: 379
- [19] Acero F, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJS*, 2015, 218: 23
- [20] Schönfelder V, Bennett K, Blom J J, et al. *A&AS*, 2000, 143: 145
- [21] Kampert K H. *APHHI*, 2001, 14: 203
- [22] Di Sciascio G. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1263: 012003
- [23] Dicke R H. *ApJ*, 1968, 153: L101
- [24] Johnson W N, Kinzer R L, Kurfess J D, et al. *ApJS*, 1993, 86: 693
- [25] Di Cocco G. *MmSAI*, 1997, 68: 217
- [26] Barthelmy S D, Barbier L M, Cummings J R, et al. *SSRv*, 2005, 120: 143
- [27] Götz D, SVOM Collaboration. *MSAIS*, 2012, 21: 162
- [28] Schönfelder V. *NIMPA*, 2004, 525: 98
- [29] 宋张勇, 于得洋, 蔡晓红. *物理学报*, 2019, 68: 118701
- [30] 杨靖, 谭放, 吴玉迟, 等. *核电子学与探测技术*, 2016, 36: 966
- [31] Fuschino F, Campana R, Caroli E, et al. *The Wide Field Monitor and Spectrometer Instrument on Board the ASTENA Satellite Mission Concept. Proceedings of the SPIE 10699, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray*, Austin, September 14, 2018
- [32] 韦家驹. *核技术*, 2018, 41: 43
- [33] Galper A M, Adriani O, Aptekar R L, et al. *AdSpR*, 2013, 51: 297
- [34] Hunter S D, Bloser P F, Depaola G O, et al. *Aph*, 2014, 59: 18
- [35] 常进, 冯磊, 郭建华, 等. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2015, 45: 149
- [36] 张双南, 董永伟, 高晓惠, 等. *载人航天*, 2015, 21: 69
- [37] Moiseev A. *Extending Fermi LAT Discoveries: Compton-pair Production Space Telescope (ComPair) for MeV Gamma-ray Astronomy. Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, July 30-August 6, 2015*
- [38] De Angelis A, Tatischeff V, Tavani M, et al. *ExA*, 2017, 44: 25
- [39] Moiseev A. *All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory (AMEGO). Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, Bexco, July 10-20, 2017*
- [40] 尤峻汉. *天体物理中的辐射机制*. 2版. 北京: 科学出版社, 1998: 335-339
- [41] Hillas A M. *Aph*, 2013, 43: 19
- [42] 刘茂元, 厉海金, 扎西桑珠, 等. *西藏大学学报(自然科学版)*, 2015, 30: 105
- [43] Cao Z. *IJMPD*, 2011, 20: 1713
- [44] Atkins R, Benbow W, Berley D, et al. *ApJ*, 2004, 608: 680
- [45] Kraushaar W L, Clark G W, Garmire G P, et al. *ApJ*, 1972, 186: 401
- [46] Fichtel C E, Hartman R C, Kniffen D A, et al. *ApJ*, 1975, 198: 163
- [47] Swanenburg B N, Bennett K, Bignami G F, et al. *ApJ*, 1981, 243: L69
- [48] Hartman R C, Bertsch D L, Bloom S D, et al. *ApJS*, 1999, 123: 79
- [49] Meegan C, Lichti G, Bhat P N, et al. *ApJ*, 2009, 702: 791
- [50] Dermigny J R, Iliadis C. *ApJ*, 2017, 848: 14
- [51] Nousek J A. *ChJAA*, 2006, 6: 357
- [52] Iyudin A F, Diehl R, Lichti G G, et al. *Natur*, 1994, 284: 156
- [53] Diehl R, Dupraz C, Bennett K, et al. *ApJS*, 1994, 92: 429
- [54] Barrau A, Bazer-Bachi R, Beyer E, et al. *NIMPA*, 1998, 416: 278

- [55] Mirzoyan R, Kankanian R, Krennrich F, et al. NIMPA, 1994, 351: 513
[56] Edwards P G, Gregory A G, Patterson J R, et al. PASA, 1992, 10: 27
[57] Lorenz E, Wagner R. EPJH, 2012, 37: 459
[58] Hewitt J W, Lemoine-Goumard M. CRPhy, 2015, 16: 674
[59] Dudik R P, Weingartner J C, Satyapal S, et al. ApJ, 2007, 664: 71
[60] Smith D A, Brion E, Britto R, et al. A&A, 2006, 459: 453
[61] Kubo H, Asahara A, Bicknell G V, et al. NewAR, 2004, 48: 323
[62] 周书华, Ong R A. 物理, 2019, 48: 602
[63] Hinton J, Sarkar S, Torres D, et al. APh, 2013, 43: 1
[64] 曹臻, 陈明君, 陈松战, 等. 天文学报, 2019, 60: 19
[65] Cao Z, Chen M J, Chen S Z, et al. ChA&A, 2019, 43: 457
[66] De Angelis A, Tatischeff V, Grenier I A, et al. JHEAp, 2018, 19: 1
[67] 曹臻, 何会海. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44: 1095

The Review of γ -ray Astrophysics Observing Techniques

FENG Si-liang^{1,2} FAN Peng^{1,2} HU Yi-fan^{3,4} MA Tian-yu^{3,4} XIA Yan^{1,2}

(1 Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094)

(2 National Key Laboratory of Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering, Beijing 100094)

(3 Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

(4 Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging (Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084)

ABSTRACT γ -rays are a unique probe for extreme events in the universe. Detecting the γ -rays provides an important opportunity to understand the composition of universe, the evolution of stars, the origin of cosmic rays, etc. γ -ray astrophysics involves in various frontier scientific issues, and the observed energy spectrum spans over a wide range from a few hundreds of keV to a few hundreds of TeV. Different γ -ray telescopes are in need for the different scientific goals and spectral bands. In this work, 5 kinds of space- and ground-based γ -ray observing techniques were summarized including the Coded-aperture telescopes, Compton telescopes, pair-production telescopes, Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes, and Extensive Air Shower Arrays. The progress in γ -ray astrophysics in the past 70 years, motivated by the observation capability, was reviewed. Great achievements have been made in the high-energy band and very-high-energy band, while because of the limited missions conducted, as well as a lower sensitivity comparing with other bands, discoveries in low- and medium-energy are few, and due to the high observation difficulty, as well as the late start, relevant scientific yields in ultra- and extremely-high energy are limited. Moreover, the future planned missions and capabilities of the γ -ray telescopes and their possible scientific outputs were discussed. Among these missions, low- and medium-energy space telescopes e-ASTROGAM (enhanced-ASTROGAM), AMEGO (All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory), and very-high-energy ground-based arrays LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory), CTA (Cherenkov Telescope Array) greatly improve sensitivity than their corresponding last generation, thus expect very likely to further expand our knowledge on the γ -universe.

Key words instrumentation: detectors, telescopes, gamma rays: general