

多波段天文学的发展与应用回顾

徐逸飞, 李旭

山东省新泰市第一中学, 山东 泰安

收稿日期: 2024年12月24日; 录用日期: 2025年1月17日; 发布日期: 2025年1月26日

摘要

多波段天文学是通过不同电磁波波段的联合观测来研究宇宙的复杂现象, 极大扩展了天文学家对天体物理现象的理解。从可见光到红外、射电、X射线和 γ 射线, 各波段揭示了天体的不同物理特性, 使得我们能够观测到恒星的生命周期、星系形成、黑洞吸积和高能事件等。本文回顾了多波段天文学的发展历程及其在天文学中的应用, 重点讨论了无线电天文学和X射线、 γ 射线观测的突破性进展。未来, 随着新一代观测工具如詹姆斯·韦伯空间望远镜、平方公里阵列望远镜(SKA)和天眼FAST的投入使用, 多波段联合观测将继续推动对黑洞、脉冲星及宇宙早期的研究, 为理解暗物质和暗能量提供新的视角。

关键词

多波段天文学, 电磁波谱, 无线电天文学, X射线天文学, γ 射线天文学

A Review of the Development and Applications of Multiband Astronomy

Yifei Xu, Xu Li

Xintai No. 1 High School, Tai'an Shandong

Received: Dec. 24th, 2024; accepted: Jan. 17th, 2025; published: Jan. 26th, 2025

Abstract

Multiband astronomy leverages the combined observations across different electromagnetic wavebands to study complex cosmic phenomena, significantly expanding astronomers' understanding of astrophysical processes. From visible light to infrared, radio, X-rays, and gamma rays, each waveband reveals distinct physical characteristics of celestial objects, allowing for the observation of stellar life cycles, galaxy formation, black hole accretion, and high-energy events. This paper reviews the historical development of multiband astronomy and its applications, with a particular focus on breakthroughs in radio astronomy and X-ray/gamma-ray observations. Looking ahead,

文章引用: 徐逸飞, 李旭. 多波段天文学的发展与应用回顾[J]. 天文与天体物理, 2025, 13(1): 11-19.

DOI: 10.12677/aas.2025.131002

with the advent of next-generation observational tools such as the James Webb Space Telescope (JWST), the Square Kilometre Array (SKA), and the Chinese FAST telescope, multiband joint observations will continue to drive research into black holes, pulsars, and the early universe, offering new insights into dark matter and dark energy.

Keywords

Multiband Astronomy, Electromagnetic Spectrum, Radio Astronomy, X-Ray Astronomy, Gamma-Ray Astronomy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多波段天文学是现代天文学的一项核心技术,它通过使用不同波长的电磁波观测宇宙,为研究者们提供了丰富的观测信息。早期的天文学主要依赖可见光,但随着技术的发展,天文学家发现不同波长的电磁波可以揭示天体的不同物理特性。1940年代起的几十年中相继诞生并发展了射电天文学、红外天文学、紫外天文学、X射线天文学和 γ 射线天文学,从而实现了对天体辐射观测的全波段覆盖[1],使得研究者们能够观测到星际尘埃背后隐藏的星系、超新星爆发时发出的高能射线,以及黑洞吞噬物质时释放的X射线辐射。通过多波段联合观测,天文学家能够更深入地了解宇宙的结构、演化和能量过程。本文将从可见光、红外、无线电、X射线和 γ 射线的不同波段出发,回顾多波段天文学的历史发展及其在天文学中的应用,并展望未来观测技术的潜力。

2. 电磁波谱在天文学中的应用

2.1. 可见光天文学的早期发展

可见光天文学作为天文学的起源,奠定了研究宇宙的基础。1609年,伽利略首次使用望远镜观测月球表面和木星的卫星,标志着现代天文学的开端。这些早期的观测推动了后续对天体运动、行星轨道等领域的深入研究,奠定了天体物理学的基础。

2.2. 红外线和紫外线的引入

20世纪中叶,红外线和紫外线天文学的发展为天文学家提供了观测不可见波段的能力。红外线天文学的兴起主要得益于红外探测技术的进步,尤其是红外望远镜的发射,如斯皮策空间望远镜等。1983年1月末,由荷兰、英国和美国三国联合研制的红外天文卫星IRAS成功发射上天,同年2月IRAS已向地面发回了大量高质量数据资料。IRAS的望远镜直径为60cm,用液体氦低温冷却,其主要目的是利用光导检出仪的高灵敏红外观测进行全天搜索[2]。IRAS在10个月的有效运作期间,记录到245,839个红外源,使已知的红外天体总数增加了100倍,发现了大批新型天体,大大丰富了天文学家对宇宙的认识。IRAS最瞩目的成就是使地外行星系的探索有了突破性进展它不仅年轻天体,例如金牛HL、麒麟R周围发现了星周尘晕或星周尘盘,还发现了一些著名亮星的固态星周物质[3]。

1995年11月17日,由欧空局主导,在日本宇宙航空研究开发机构和美国宇航局的合作下,红外空间天文台成功发射。与IRAS相比,ISO的性能指标有了进一步的提升,它重2.5吨,主镜直径为0.6米,

运行于近地点 1000 千米、远地点 70,600 千米高的大椭圆轨道上。在这一轨道其环绕周期为 24 小时, 与地球自转速度一致, 也与地面科研人员作息一致, 有利于提高天文台的使用效率。斯皮策空间望远镜是继 IRAS 和 ISO 之后的第三台专注于红外天文学的空间望远镜, 以美国天文学家莱曼·斯皮策命名。早在 1946 年, 斯皮策就提出了将望远镜部署到外太空的设想。2009 年 5 月 14 日, 欧空局成功发射了赫歇尔空间天文台, 这部望远镜是唯一一台可以观测从 55 微米的中红外波段到 672 微米的亚毫米波段的空间望远镜。美国宇航局则在 2009 年 12 月 14 日发射了宽视场红外测量探测器, 这是一个小型红外空间望远镜。美国宇航局和欧空局合作的詹姆斯·韦伯空间望远镜(见图 1)于 2021 年 12 月 25 日发射, 其 6.5 米直径的巨大主镜可以接收从 0.6 到 28.5 微米的近红外光, 取代了赫歇尔空间天文台, 并成为世界上最大的空间望远镜, 其技术达到了目前人类所能达到的顶峰[4]。

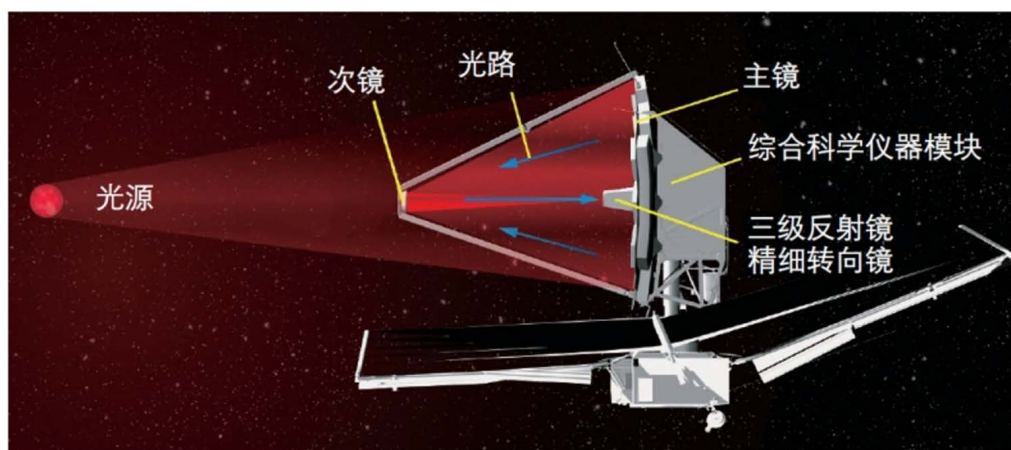


Figure 1. Optical path diagram of the James Webb Space Telescope [5]

图 1. 韦伯望远镜光路示意图[5]

紫外线天文学则专注于观测高温天体, 如年轻的恒星白矮星和活动星系核。这些天体在紫外波段释放出强烈的辐射, 帮助研究者们研究恒星的演化及其外层物质的动态变化。1968 年, 美国成功发射 OAO-2 卫星, 随后欧洲发射了 TD-1A 卫星, 这些卫星均搭载紫外天文望远镜, 主要用于对宇宙紫外辐射的全面普查。1972 年发射的 OAO-3 卫星“哥白尼”号, 配备了口径 0.8 米的紫外望远镜, 在其 9 年的运行周期内, 获取了 950 至 3500 埃的紫外波段光谱数据。1990 年 12 月 2 日至 11 日, “哥伦比亚”号航天飞机搭载 Astro-1 天文台, 对紫外光谱进行了首次空间实验室观测[6]; 1995 年 3 月 2 日, Astro-2 天文台进行了为期 16 天的紫外天文观测。FUSE (远紫外光谱探测器) 卫星作为 NASA “起源计划” 的组成部分, 于 1999 年 6 月 24 日成功发射, 旨在探索宇宙演化的基本问题。紫外天文学作为全波段天文学的关键领域, 自“哥白尼”号成功发射以来, EUV (极端紫外)、FUV (远紫外) 及 UV (紫外) 观测卫星已实现对紫外波段的全覆盖观测。

紫外波段揭示了年轻恒星和白矮星的高能活动, 而红外波段则为星系内部较冷的物质提供了观测窗口, 极大丰富了人类对恒星演化和星系结构的认识。

3. 无线电天文学的突破

3.1. 无线电天文学的起源

无线电天文学的起源可以追溯到 1930 年代, 卡尔·詹斯基搭建了一架由木质框架支撑的细铜管可控天线网(见图 2)首次发现了来自银河系中心的无线电信号, 这一发现揭开了无线电天文学的序幕[7]。无线

电波段的观测使得研究者们能够探测到肉眼不可见的天体, 如脉冲星、类星体和星际分子云。



Figure 2. Replica of the antenna used by Karl G. Jansky [7]
图 2. 卡尔·詹斯基使用的天线复制品[7]

3.2. 大型射电望远镜的应用

随着技术的发展, 平方公里阵列望远镜(SKA)和天眼 FAST 推动了无线电天文学的进一步发展。通过这些望远镜, 天文学家能够捕捉到遥远星系发出的微弱无线电信号, 并对类星体、星际磁场和宇宙微波背景辐射进行深入研究。这些研究揭示了宇宙中极其遥远的天体及其能量来源, 帮助研究者们构建更完整的宇宙模型。1931 年, 美国无线电工程师兼天文学家卡尔·央斯基首次利用射电天线发现了来自银河系中心的射电辐射, 这是最早的射电望远镜之一。射电天文学的发展受益于二战后雷达技术的民用化, 与雷达不同, 射电望远镜被动接收天体的无线电波。

20 世纪 50 至 60 年代, 射电技术的进步推动了射电干涉仪、甚长基线干涉仪(VLBI)和综合孔径望远镜等新型射电设备的发展。天马望远镜(上海 65 米射电望远镜)是亚洲最大的全可动射电望远镜, 建成于 2012 年, 具备探测百亿光年外天体的能力。洛弗尔射电望远镜(直径 76 米)于 1957 年在英国建成, 曾是世界上最大的全动射电望远镜。埃菲尔伯格望远镜(德国, 直径 100 米)具备从 90 厘米到 3 毫米的宽波段观测能力, 首次在毫米波段观测到脉冲星。



Figure 3. Green bank telescope [8]
图 3. 绿岸望远镜[8]

罗伯特·伯德绿岸望远镜(见图 3)位于美国西弗吉尼亚州, 直径 110 米, 是世界上最大的全可动射电

望远镜, 位于无线电静默区, 具备极高灵敏度。自 2011 年起, 绿岸望远镜观测“开普勒”发现的潜在类地行星, 以探索地外文明。阿雷西博望远镜采用球面主镜, 通过不同区域扫描天体, 自 1963 年起取得多项重大发现, 包括 1974 年脉冲双星的发现。甚大阵(VLA)位于美国新墨西哥州, 由 27 台射电望远镜组成, 构成 Y 字形阵列, 可通过移动望远镜调整阵型, 目前称为央斯基甚大阵。平方千米阵列(SKA)计划在南非和澳大利亚建设, 全部建成后将成为人类有史以来最大的射电望远镜系统[9]。

中国的 500 米口径球面射电望远镜(FAST), 建设始于 2011 年, 被誉为“天眼”, 是目前世界上最大的单口径射电望远镜, 位于贵州省平塘县的喀斯特洼地中。FAST 的主反射面直径达 500 米, 有效口径为 300 米, 能够接收极其微弱的宇宙射电信号, 其灵敏度是之前最大的射电望远镜的两倍以上。FAST 的主要科学目标包括搜索脉冲星、研究中性氢分布、探测快速射电暴(FRB)、以及开展 SETI 等。自投入使用以来, FAST 已经发现了上百颗新的脉冲星, 为天文学和宇宙学的研究提供了重要数据。中国科学院国家天文台研究员徐聪领导的国际团队, 利用 FAST 对致密星系群“斯蒂芬五重星系”及周围天区的氢原子气体进行了成像观测, 发现了一个尺度大约为 200 万光年的巨大原子气体结构, 比银河系大 20 倍, 这是迄今为止在宇宙中探测到的最大的原子气体结构(见图 4)。FAST 也成为唯一一个能探测到如此稀薄气体的望远镜[10]。



Figure 4. “Stephan’s Quintet” infrared image [11]

图 4. “斯蒂芬五重星系”红外波段彩图[11]

4. X 射线与 γ 射线天文学

4.1. X 射线天文学的发展

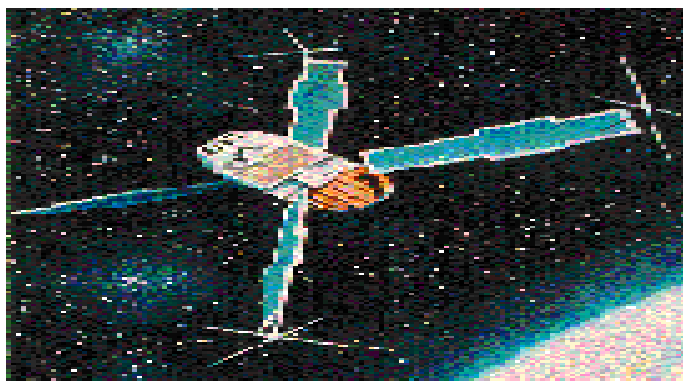


Figure 5. Uhuru satellite [12]

图 5. Uhuru 卫星[12]

X 射线天文学的重大突破始于 20 世纪 60 年代, 当时第一颗 X 射线探测卫星 Uhuru 在 1970 年发射升空(见图 5)。Uhuru X-ray Explorer Satellite 它是第一颗专门为 X 射线天文学发射的卫星。它于 1970 年 12 月 12 日由 NASA 发射, 其任务是探测和研究天体 X 射线源。“Uhuru”是斯瓦希里语中“自由”的意思, 象征着卫星的发射日期, 恰逢肯尼亚独立日[12]。

Uhuru 任务在 X 射线天文学领域取得了开创性的成果, 首次发现了数百个 X 射线源, 包括黑洞、中子星和 X 射线双星的明确证据。这些发现为高能天体物理学提供了关键性的基础, 显著促进了我们对宇宙中高能现象的理解。Uhuru 的观测不仅帮助分类了不同类型的 X 射线源, 也为后续 X 射线天文研究奠定了坚实的基础。

在 Uhuru 之后, HEAO 系列卫星进一步推动了这一领域的发展, 特别是 HEAO-2(爱因斯坦天文台), 其高分辨率成像仪器为科学家提供了对 X 射线源精细结构的观测能力, 拓展了对宇宙中高能现象的理解。

进入 20 世纪 90 年代, ROSAT 卫星的发射实现了全天空的 X 射线巡天, 发现了大量的新 X 射线源, 丰富了 X 射线天文学的观测数据。这一时期, X 射线天文学取得的进展使得对星系团、超新星遗迹等复杂天体结构的研究成为可能。同样在这一阶段, 日本与 NASA 合作的 ASCA 卫星开创性地配备了 X 射线成像光谱仪, 提供了同时进行成像和光谱观测的能力, 使得科学家能够更加深入地分析 X 射线的辐射机制, 揭示了许多宇宙中高能天体的物理特性。

进入 21 世纪, X 射线天文学迎来了更加精密的观测工具, 例如 NASA 的 Chandra X 射线天文台和欧洲航天局的 XMM-Newton。Chandra 以其极高的空间分辨率著称, 能够详细观测到 X 射线源的微小结构, 而 XMM-Newton 则因其较大的收集面积和高度灵敏度, 适用于长时间观测, 进一步深化了对宇宙中高能现象的理解。这些观测使科学家能够更好地研究黑洞周围的物质吸积过程、星系团中的热气体分布以及超新星残骸的详细结构等。

近年来, X 射线天文学的观测手段愈加多样化。日本的“瞳”卫星虽然因为事故只工作了短短几个月, 但在此期间它提供了革命性的高能 X 射线光谱数据, 使科学家们首次得以通过如此高精度的光谱研究天体的内部动力学。类似地, eROSITA 卫星开展了新一轮的 X 射线巡天, 极大地提高了对宇宙中 X 射线源的普查精度, 帮助我们揭示了星系演化和大尺度结构的物理机制。这些卫星的持续发展与技术进步, 推动着 X 射线天文学不断突破, 使我们对宇宙中高能天体的认识逐渐清晰, 特别是在研究黑洞的吸积物质、星系团的 X 射线发射以及恒星演化等方面取得了关键性进展[13]。

X 射线天文学的崛起为研究高能天体带来了新的视角。有研究证明在黑洞吸积盘区域, 物质被黑洞引力加速至接近光速, 过程中产生的剧烈摩擦和压缩导致强烈的 X 射线辐射, 这揭示了双星系统中黑洞吸积邻近恒星物质的机制, 为理解黑洞的活跃状态提供了直接证据。科研人员们通过 Chandra X 射线天文台和 XMM-Newton 等 X 射线望远镜, 得以深入研究黑洞周围极端的物理条件。

4.2. γ 射线天文学

γ 射线天文学关注的是宇宙中最极端的高能事件, 例如 γ 射线暴(GRBs)和超大质量黑洞喷流。 γ 射线是宇宙中最短暂、能量最高的辐射形式之一, 其源头通常是黑洞的形成、恒星的爆发或中子星的碰撞。美国宇航局的 γ 射线太空望远镜发现了银河系中心一个前所未见的结构, 该结构横跨 50,000 光年, 可能是银河系中心超大黑洞喷发的残留物(见图 6) [14]。

伽马射线天文学的发展始于 20 世纪初的放射性发现和宇宙射线研究, 为高能天体物理学奠定了基础。随着 20 世纪 60 年代太空探索的兴起, 科学家能够在大气层之外进行伽马射线观测, 从而避免了地球大气的吸收和本地背景的干扰。这些观测使得伽马射线成为探究宇宙射线起源和宇宙中高能过程的主要工具。

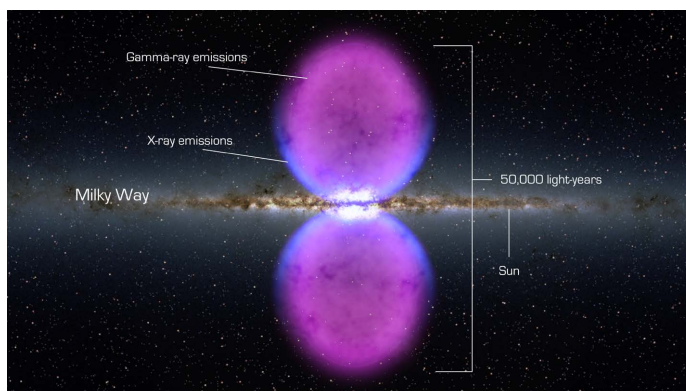


Figure 6 Gamma-Ray bubbles [14]

图 6. γ 射线气泡[14]

在 1960 年之前, 伽马射线天文学的研究主要集中于探索宇宙射线的起源及其在银河系中的分布。到了 20 世纪 60 年代至 80 年代, 通过卫星探测器的支持, 伽马射线的观测取得了突破性进展。例如, NASA 的 SAS-2 卫星和欧洲空间局的 COS-B 任务对伽马射线源的探测提供了重要数据, 揭示了银河盘中的伽马射线发射和多个点源的存在。到 1980 年至 2000 年, 伽马射线天文学进入了第一个“黄金时代”。NASA 的康普顿伽马射线天文台(CGRO)等任务显著提高了高能伽马射线的灵敏度和空间分辨率, 使得对银河系和河外点源的探测达到了前所未有的水平[15]。

γ 射线天文学的一个重要里程碑是 Fermi γ 射线空间望远镜(见图 7)的发射, 该望远镜能够探测到来自宇宙深处的高能 γ 射线。通过对这些 γ 射线暴的观测, 研究者们可以研究早期宇宙的剧烈活动, 探索极端条件下的物质行为。射线望远镜还为研究活动星系核(AGN)提供了大量数据, 尤其是那些位于遥远星系中的超大质量黑洞。费米数据首次帮助研究者们追踪到高能中微子的来源——一个距离我们数十亿光年的黑洞星系。

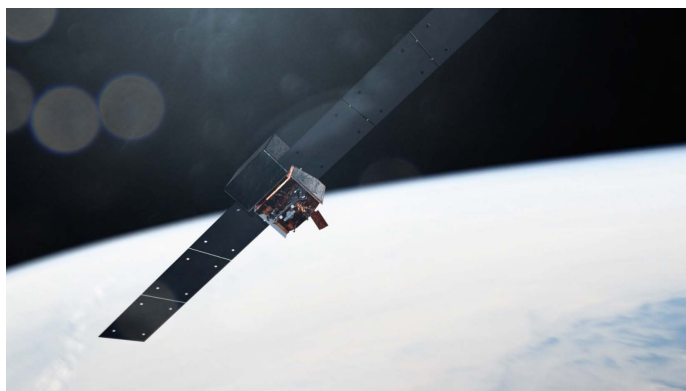


Figure 7. Fermi Gamma-ray space telescope [16]

图 7. Fermi γ 射线太空望远镜[16]

γ 射线天文学为我们提供了研究宇宙中极端高能事件的独特工具, 特别是在探索活动星系核和 γ 射线暴时, γ 射线观测提供了大量关键数据, 使得我们能够揭示宇宙中最暴力的天体物理过程。

5. 多波段观测的综合应用

多波段天文学的核心优势在于能够通过不同波段的联合观测, 揭示天体的多种物理性质。不同波段

的电磁辐射携带着关于天体不同物理过程的信息, 因此多波段观测使天文学家能更全面理解宇宙现象。例如, 射电波段能够探测到脉冲星和类星体的无线电喷流, 而红外波段可以穿透星际尘埃, 揭示恒星形成区的内部结构。X 射线和 γ 射线则用于探测黑洞和中子星合并等高能事件。

5.1. 多波段联合观测的成功案例

多波段联合观测为我们打开了一扇深入了解恒星生命周期各个阶段的窗口。射电、红外和 X 射线观测的结合使得我们能够跨越光学观测的局限, 揭示恒星在不同阶段的演化过程。

引力波探测器 LIGO 和 Virgo 的问世, 为多波段观测增添了一个崭新的维度。这一领域的突破不仅仅局限于电磁波观测。通过联合电磁波和引力波的观测, 研究者们得以首次直接探测到黑洞和中子星合并过程中释放的能量和物质。特别是 2017 年 GW170817 事件中, LIGO 和 Virgo 探测到了双中子星合并 [17]。2019 年, 事件视界望远镜(EHT)联合全球多个射电望远镜, 成功拍摄了 M87 星系中央黑洞的影像。这次观测利用了多个射电望远镜形成的甚长基线干涉测量(VLBI)技术, 结合 X 射线和光学波段的观测, 进一步确认了黑洞喷流的存在 [18]。通过这种跨越多波段的综合观测, 我们得以深入探索宇宙中最极端的事件, 为天体物理学提供了前所未有的丰富数据。

5.2. 对天文学前沿研究的推动

多波段联合观测显著推动了天文学的前沿研究。通过在不同波段同时观测同一现象, 研究者们可以更精确地建立天体的物理模型, 并深入探索宇宙中的极端事件。例如, 针对黑洞、脉冲星等极端天体, 联合观测使得我们能够探测到这些天体在不同波段的辐射特性, 从而更好地理解它们的物理性质和演化机制。此外, 多波段联合观测也为暗物质和暗能量的研究提供了关键线索 [19]。

在对活动星系核(AGN)的研究中, 联合观测提供了更完整的物理图景。射电波段揭示了 AGN 的喷流结构 [20], 红外波段探测了尘埃吸收特性, 而 X 射线和 γ 射线观测揭示了 AGN 中心黑洞周围的高能辐射 [21]。综合多波段数据, 研究者可以分析 AGN 的能量来源、喷流特性及其对宿主星系的影响。这种多波段联合观测的方法, 为我们描绘了一个完整而详细的巨型黑洞物理图景, 深化了对宇宙中这些极端天体的理解。

6. 未来展望

波段天文学前景广阔, 尤其是在 JWST、SKA 和 FAST 等新观测工具的推动下这些尖端设备将显著增强我们对宇宙的探测能力, 使得研究者们能够深入研究黑洞的演化、脉冲星和中子星的合并过程, 以及宇宙早期的形成与演化。通过多波段联合观测, 研究者们将获取从射电到 γ 射线的全面数据, 综合解析天体物理现象, 揭示暗物质和暗能量的本质, 为天文学前沿研究提供新的突破口。

7. 总结

多波段天文学的蓬勃发展显著深化了我们对宇宙中各种复杂天体物理现象的认知。通过整合从可见光、红外、射电到 X 射线和 γ 射线的观测数据, 我们得以全面探索恒星的生命周期、星系的形成与演化、黑洞的吸积过程以及高能天体事件的本质。本文回顾了多波段天文学的历史发展, 强调了无线电天文学、X 射线天文学和 γ 射线天文学所取得的突破性进展。随着 JWST、SKA 和 FAST 等新工具的使用, 天文学家将进一步研究黑洞、脉冲星和早期宇宙。这些先进的设备将通过多波段联合观测, 提供更加精细的宇宙图景, 特别是在探寻暗物质和暗能量的性质方面, 为天文学和宇宙学提供新的研究突破口。多波段天文学将在未来继续引领天体物理学的前沿, 为解锁宇宙最深层的奥秘提供强有力的工具。

参考文献

- [1] 赵君亮. 多波段天文学[J]. 自然杂志, 2007, 29(4): 193-199.
- [2] 小田直树, 蔡仁兴. 红外天文学展望[J]. 世界科学, 1984(7): 36-38.
- [3] 李芝萍. 迅速发展的红外天文学[J]. 现代物理知识, 1994, 6(6): 11-13.
- [4] 杜威. 红外空间望远镜简史[J]. 太空探索, 2022(1): 54-61.
- [5] 杜骏豪. 一文读懂詹姆斯·韦伯空间望远镜[J]. 太空探索, 2022(1): 38-44.
- [6] 李芝萍. 浅谈紫外天文学的发展[J]. 现代物理知识, 1995, 7(1): 9-11.
- [7] National Radio Astronomy Observatory (2019) Jansky at 90: The Origins of a New Window on the Universe. <https://public.nrao.edu/news/jansky-90-the-origins-of-a-new-window-on-the-universe>
- [8] Green Bank Telescope. https://en.wikipedia.org/wiki/Green_Bank_Telescope
- [9] 安利. 世界上八座大型射电望远镜[J]. 百科知识, 2016(16): 8-9.
- [10] 唐琳. “中国天眼”FAST取得系列重要进展[J]. 科学新闻, 2023, 25(1): 10.
- [11] 中国科学院国家天文台. 斯蒂芬五重星系红外波段彩图[EB/OL]. https://nao.cas.cn/news/gd/202210/t20221020_6535855.html, 2022-10-20.
- [12] NASA. Uhuru: The First X-Ray Astronomy Satellite. <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/uhuru/uhuru.html>
- [13] 王春燕, 陈岗, 王福合. X射线在天体物理学的应用[J]. 现代物理知识, 2016, 28(6): 60-64.
- [14] NASA. NASA's Fermi Telescope Finds Giant Structure in Our Galaxy. <https://www.nasa.gov/universe/nasas-fermi-telescope-finds-giant-structure-in-our-galaxy>
- [15] Kanbach, G. (2019) Gamma-Ray Astrophysics: Roots, Growth, and Success. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, **30**, 7-12.
- [16] NASA. Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. <https://science.nasa.gov/mission/fermi>
- [17] NASA. NASA Missions Catch First Light from a Gravitational Wave Event. <https://science.nasa.gov/missions/chandra-x-ray-observatory/nasa-missions-catch-first-light-from-a-gravitational-wave-event/>
- [18] The Event Horizon Telescope Collaboration (2019) First Image of a Black Hole in the M87 Galaxy. *Astrophysical Journal Letters*, **875**, L1-L6.
- [19] Qi, J.-Z., *et al.* (2021) Using a Multi-Messenger and Multi-Wavelength Observational Strategy to Probe the Nature of Dark Energy through Direct Measurements of Cosmic Expansion History. *JCAP*, **12**, 42. <https://arxiv.org/abs/2102.01292>
- [20] Ghasemi-Nodehi, M., Chakraborty, C., Yu, Q., *et al.* (2021) Investigating the Existence of Gravitomagnetic Monopole in M87*. *European Physical Journal C*, **81**, Article No. 939.
- [21] Dokuchaev, V.I. and Nazarova, N.O. (2021) Modeling the Motion of a Bright Spot in Jets from Black Holes M87* and SgrA*. *General Relativity and Gravitation*, **53**, Article No. 83.