



高能天体物理学的几项重要新成果

卢方军

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

高能天体物理以观测天体的 X 射线和伽马射线辐射为主要研究手段, 由于天体高能物理过程的辐射多集中在 X 射线和伽马射线能段, 同时 X 射线和伽马射线具有大大高于可见光的穿透能力, 它们携带的是天体中心最活跃区域的物理信息, 因此, 高能天体物理研究对于探索宇宙天体的本质具有关键性的作用. 1997 年, 高能天体物理研究取得了多项重大的成果, 引起了学术界和公众的广泛兴趣. 这些成果主要有: (1) 发现伽马射线暴来自宇宙深处的直接证据; (2) 银河系中心反物质喷泉的发现; (3) 探测到银河系的巨大伽马射线晕; (4) 发现黑洞自转的观测证据; (5) 旋转的致密天体拖曳周围时空的观测研究.

一、发现伽马射线暴来自宇宙深处的直接证据

1973 年, 美国为监测核爆炸而发射的间谍卫星 Vela 发现了来自太空的伽马射线暴发. 这种持续时间极短(一般从几百毫秒到数百秒)而能量极高的伽马射线暴发现象一经发现就引起了人们的极大兴趣, 成为宇宙中最大的奥秘之一, 天体物理学家提出了数百个模型来解释这种奇异的暴发现象.

在 90 年代之前, 探测到的伽马射线暴在天球上随机分布, 但由于数目有限, 人们还无法据此得出有较强统计意义的结论. 1988 年日本的银河 X 射线天文卫星 Ginga 探测到一个伽马射线暴, 对它的能谱分析发现它存在分别位 19.3keV 和 38.6keV 的两条回旋吸收线, 而由此推算出的磁场强度为 1.7×10^8 特斯拉, 相当于中子星上的磁场强度. 于是大多数的天体物理学家就认为伽马射线暴和中子星相连系, 起源

于银河系, 并且预言: 随着被观测到的伽马射线暴的增多, 其总体位置分布应该和中子星的分布一样——在银道面区域有明显的增强.

美国卫星康普顿伽马射线天文台 CGRO 上的暴发和暂现源实验 BATSE 上天后观测到了超过两千个伽马射线暴, 但它们的位置分布却出乎预料: 高度各向同性. 这一结果几乎排除了伽马射线暴的银河系起源, 即使起源于银河系也应该是在距太阳极远的银河系晕之中. 与 BATSE 结果最吻合的模型是伽马射线暴起源于遥远的宇宙深处, 但是, 天体物理学家并没有找到伽马射线暴和宇宙深处天体相关的确凿证据.

意大利的 X 射线天文卫星 BeppoSAX 于 1996 年 4 月 30 日升空运行, 这个比预期发射时间延迟了好几年的卫星起初并没有引起人们的太大兴趣. 但是, BeppoSAX 却领导了一场国际天文界利用各波段望远镜观测伽马射线暴的浪潮, 被美国《科学》杂志评为 1997 年世界十大科技新闻之一.

1997 年 2 月 28 日, BeppoSAX 上的宽视场照相机 WFC 观测到了伽马射线暴 GRB 970228, 并确定出这个伽马射线暴的位置, 精度为 $3'$. 8 小时之后, BeppoSAX 上的低能和中能 X 射线探测器对准该位置进行观测, 发现了一个弱的 X 射线源, 3 月 3 日用同样的仪器进行观测, 发现这个 X 射线源的强度减弱了约 20 倍, 并由此给出了精度为 $50''$ 的更准确的位置.

BeppoSAX 第一次把伽马射线暴的位置精度提高到角分和角秒量级, 这为光学和射电望远镜的观测提供了条件. 天文学家用光学望远镜在 X 射线源的位置上发现了一个亮度变化很大的光学天体. 美国哈勃太空望远镜 HST 也

先后对 GRB970228 区域进行了三次观测,发现了一个很可能是河外星系的亮度不变的暗弱弥散天体以及一个叠加在弥散源之上,亮度衰减的点源.这样,从观测上,伽马射线暴首次和河外天体联系起来.

1997年5月8日,BeppoSAX观测到了另一个伽马射线暴 GRB970508,后续的光学观测不仅找到了它的光学对应体,更重要的是,全球最大的,直径10米的Keck望远镜拍摄到了它的光谱,光谱的红移约为0.8,表明GRB970508和它的光学对应体来自于宇宙深处.

BeppoSAX的对伽马射线暴的观测和随后的光学研究使得绝大部分天体物理学家相信,伽马射线暴起源于宇宙深处.若真如此,它的能量将达到 10^{44} 焦耳,相当于太阳在 10^{18} 秒(300亿年)内辐射的总能量,如何从秒量级的时间内释放出这么巨大的能量?它其中是否包含了全新的物理过程?许多天体物理学家都在努力解开这个谜团.

二、银河系的伽马射线晕

对整个银河系的高能伽马射线探测是由欧洲伽马射线天文卫星COS-B在80年代初完成的.COS-B发现除了一些高能伽马射线点源和银道面弥散成分以外,银河系还可能存在着高银纬弥散辐射成分.但由于COS-B的探测面积小,对高银纬弥散辐射存在的范围甚至对存在的可靠性还不能给出确定的描述.后来,人们发现408兆赫兹射电辐射和CGRO上的高能伽马射线望远镜EGRET探测到的高银纬伽马射线辐射之间存在可能的相关,于是,人们开始重新研究银河系的弥散辐射.

1997年11月,来自美国加州大学地球物理和行星物理研究所的戴维·迪克逊在美国高能天体物理年会上向新闻媒体宣布,他们找到了银河系存在巨大伽马射线晕的明显证据.

迪克逊与他的合作者利用小波分析方法分析了EGRET几年的观测数据,最后得到的辐射图象表明,除了一些已知的点源和在银心区域的辐射强度增强外,还明显地存在延伸到高银

纬的大尺度弥散辐射.弥散辐射的分布几乎排除了它们起源于太阳系附近的可能性,而应当是笼罩在整个银河系周围的伽马射线晕.

迪克逊等认为,伽马射线晕的产生机制有几种.一种是位于银河系晕中数量巨大且未被分辨开的暗弱伽马射线点源.这些暗弱伽马射线点源很可能是以伽马射线辐射为主的老年的中子星.诞生于银道面的中子星在形成时的超新星爆发中获得每秒数百千米的速度,逃离银道面进入银晕之中.另一种可能的机制是宇宙线中以接近光速运动的相对论性电子对晕中低能光子的逆康普顿散射,使得被散射光子变成高能量的伽马射线.由于伽马射线辐射强度分布和408MHz射电辐射强度分布之间存在可能的相关,而电子的同步辐射可能位于射电波段,因此这一机制具有较大的可能性.但是,低能光子的来源,即是否存在一个低能光子晕圈尚不清楚.第三种可能的产生机制是伽马射线晕与暗物质有关.来自于宇宙线中的高能质子可能与分子云作用产生伽马射线辐射,而一个暗物质粒子遇到它的正物质粒子时,也会相互湮灭产生伽马射线.

三、银河系内反物质喷泉的发现

1997年,在美国举行的第四届康普顿研讨会上,美国西北大学物理天文系科学家普塞尔代表西北大学物理天文系、海军实验室、马里兰大学天文系等几个机构的研究人员向天文界和新闻媒体宣布,他们发现了一个位于银心附近的巨大的反物质喷泉.这一成果立即引起学术界和公众的强烈反响.

正电子是电子的反物质形式,和电子相碰会互相湮灭发出两个能量为511keV的伽马射线光子.1933年,人类在实验室制造出第一个正电子.1970年,天体物理学家观测到银心附近区域511keV正负电子湮灭发射线辐射,第一次从宇宙中发现正电子.此后,一系列的伽马射线望远镜对银心区域进行了观测,但由于望远镜性能的限制和数据积累的不足,对银心区域511keV伽马射线辐射强度分布的了解还很

粗糙,使得天体物理学家难以据此判断 511keV 辐射的准确来源。

CGRO 上的可变向闪烁光谱仪 OSSE 和以往的同类仪器相比在探测灵敏面积和能量分辨率上都有了很大提高,它在 CGRO 上天以后的 5 年内对银心附近区域的 511keV 辐射进行了多次观测,积累了大量的观测数据。根据这些数据,马里兰大学天文系的旅美中国青年科学家程凌翔分别利用我国学者发展的直接解调方法和国际通用的最大熵方法得到了两幅相互吻合的银心附近区域 511keV 伽马射线辐射精细图象,这两个结果先后在 1996 年美国高能天体物理年会和 1997 年第四届康普顿学术讨论会公布。图象表明除了弥散的银道面成分和银河系核球成分以外,在银心的右上方即银经 -3° ,银纬 7° 附近存在一个明显的 511keV 辐射热斑。随程凌翔之后,一直在这一领域工作的美国西北大学物理天文系的普塞尔也得到了相似的结果。美国海军实验室的德尔默和斯基博将这一热斑形成的原因解释为一个巨大的反物质喷泉。

我们离银河系中心的距离是大约 2.5 万光年,若我们认为这一反物质的喷泉离我们的距离也大约是 2.5 万光年,则这一喷泉必须每秒产生 10^{42} 个正电子(约 10 亿吨)才可以达到我们观测到的 511keV 辐射亮度。由于正负电子对湮灭的概率和它们的速度密切相关,处于相对静止状态的正负电子对湮灭的几率最大,因此,亮斑的位置并不是喷泉的起源位置。德尔默和斯基博认为,高速的喷泉物质起源于银河系核心附近沸腾的恒星形成区,经过长达 4 亿亿公里的漫长旅行,速度下降并和周围的电子湮灭形成人们观测到的 511keV 辐射亮斑。

银心区域 511keV 伽马射线辐射精细图象和反物质喷泉的发现不仅使天体物理学家改变了过去认为银河系是盘形的观点,更重要的是,它也提供了研究银河系和其他星系乃至整个宇宙形成和演化等基本过程的新视角。目前,天体物理学家正在积极探索其他反物质对(如质子反质子对)的湮灭特征辐射,同时,一个由诺

贝尔物理奖获得者美籍华裔科学家丁肇中教授主持的,旨在测量反物质能谱的反物质能谱仪将在后一两年内升空运行。今后几年中,对反物质世界的探索,还将大大扩展和加深我们对宇宙的认识。

四、黑洞自转的观测证据

虽然黑洞形成前的物质形态可以有多种,但黑洞形成之后,黑洞视界内的任何物质包括光线在内都无法逃离黑洞,物理学家只用质量、角动量(即自转)和电荷三个量来描述黑洞的性质。在观测上,长期以来,借助于对黑洞系统动力学参数的测定,天体物理学家广泛地研究了黑洞的质量,但还未能对黑洞的其他两个性质进行观测研究。1997 年 6 月,美国《天体物理杂志》上刊登了三位旅美的年轻中国科学家张双南、崔伟、陈莞的研究论文《X 射线双星中黑洞旋转:观测证据》,第一次从观测上研究了黑洞的自转性质。

文章以对日本天文卫星 ASCA 和美国天文卫星 RXTE 观测数据的能谱分析为基础,在一个标准的薄吸积盘模型的框架下,研究 X 射线双星中黑洞自转所带来的观测效应。它们发现,仅有的两个河内视超光速源 GRO 1655-40 和 GRS1915 + 105 极有可能各自包含一个与吸积盘旋转方向一致的快速自转黑洞,其他一些存在超软 X 射线成分的黑洞双星系统则只包括不自转或缓慢自转的黑洞,那些在高亮度状态时不存在可探测超软 X 射线辐射成分的黑洞 X 射线双星则可能是因为这时黑洞和吸积盘的方向是相反的。至于著名黑洞候选体 CYG X-1 高亮度状态和低亮度状态之间的转换,它们认为,很可能起源于吸积盘旋转方向的逆转。

张、崔、陈的工作首次发现了黑洞的自转现象,给出了测定自转速度的方法。他们不仅证实了爱因斯坦所预言的黑洞自转理论,而且开辟了一个全新的黑洞研究领域,极大地推进了对黑洞的研究。此外,他们还成功地把黑洞 X 射线双星系统统一在黑洞自转的框架之下。

近几十年来,天体物理学家提出了黑洞高

速自转产生相对论性喷流并释放能量的理论,但一直没有找到观测证据。张双南、崔伟、陈莞的研究表明:两个具有相对论性喷流的黑洞 X 射线双星 GRO1655-40 和 GRS1915 + 105 都存在快速自转现象。这正好验证了上述理论,对解决类星体、等离子体喷流、伽马射线暴等的能量之谜具有重要意义。

五、致密天体对周围时空的拖曳效应

X 射线光度的准周期振荡(QPO)是许多 X 射线双星系统的重要特征之一,很长时间以来,QPO 的起因一般被归结为环绕 X 射线双星中致密天体转动的吸积盘的不稳定性或吸积盘与中子星磁层的作用。美国卫星 RXTE 上天后在硬 X 射线能区观测到了一些 X 射线双星频率在 0.2—1.2 千赫兹左右的 QPO(简称为千赫兹 QPO)。这些 QPO 的高频率表明它们应当起源于离致密天体很近的一个尺度很小的区域。同时,对一些 X 射线双星如 4U1728-34 的研究发现,这些源的千赫兹 QPO 与几十赫兹 QPO 之间有很强的相关性。

意大利罗马天文台的路易吉·斯特拉和罗马大学的马利奥·维特里的研究使得几十赫兹的 QPO 的产生机制最终得以揭示。他们在 1997 年 11 月美国高能天体物理年会上宣布并发表于 1998 年 1 月美国《天体物理杂志》上的研究论文《冷斯——塞林进动和低质量 X 射线双星系统中的 QPO》指出:这些几十赫兹 QPO 起源于 X 射线双星系统中旋转中子星对周围惯性坐标系的相对论性拖曳,而这一理论是奥地利物理学家约瑟夫·冷斯和汉斯·塞林在 1918 年根据爱因斯坦广义相对论而作出的一个著名预言。在斯特拉和维特里的模型中,高速旋转的中子星会拖曳周围时空坐标系而引起吸积盘的进动,进动的频率就是几十赫兹 QPO 的观测频率,根据这些几十赫兹的 QPO 和千赫兹 QPO,可以直接测定中子星的自转频率。他们根据上述理论对一系列中子星双星系统数十赫兹 QPO 现象的推论和观测极为吻合。

受斯特拉和维特里研究的启发,旅美中国

科学家崔伟、张双南和陈莞将冷斯——塞林进动应用于黑洞 X 射线双星系统 QPO 的研究中。他们的研究论文《X 射线双星系统中旋转黑洞拖曳周围时空的证据》亦在 1997 年美国高能天体物理年会上向媒体公布,并同样发表于 1998 年 1 月美国《天体物理杂志》。通过将计算出的吸积盘进动频率和观测频率比较,他们发现,河内视超光速源 GRO1655-44 和 GRS1915 + 105 中的黑洞在以接近理论极限的频率高速旋转,而其他一些黑洞 X 射线双星中黑洞的旋转速度则要慢得多。这一结果强烈支持了他们从 X 射线光谱资料中得到的黑洞旋转结果。

从近年取得的一项项重大成果不难看出,经过几十年的努力,高能天体物理已经发展到可以对一些物理学的基本问题作出判定的阶段。从以上结果还可以看出,除了对银河系大尺度伽马射线晕的研究以外,其余几项研究成果都集中在几十 keV 到几百 keV 的硬 X 射线能段,这表明硬 X 射线已成为对天体进行观测研究的关键能段,这主要是因为硬 X 射线具有很强的穿透能力,携带的是天体中心区域非热高能过程的信息,同时和伽马射线相比,它又具备取得重要物理成果所必须的足够的统计量。但由于硬 X 射线成象观测的困难,还未能实现对全天的硬 X 射线高灵敏度成象观测。可喜的是,通过长时间的理论研究和实验观测,中国科学家找到了一个克服硬 X 射线成象观测困难的有效办法,开始实施一个利用我们自身的优势,适合中国国情,旨在填补硬 X 射线高灵敏度全天观测空白的空间硬 X 射线卫星观测计划。预期我们能以低廉的投入在这一重要领域获得一系列开创性的成果。

