

关于微类星体的部分最新研究结果

陈 永 军

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

对 microquasar (微类星体) 最新的一些研究结果作了比较全面的评述。具有相对论性喷流的 microquasar 在很多现象上类似于极小尺度上的类星体。对 X 波段的观测可以探测到吸积盘内区甚至接近黑洞的区域。结合低波段上的观测和研究, 人们在吸积盘的动力学模型、物质吸积与喷流形成之间的关系以及喷流的超光速运动等方面的认识都有了长足的进步, 并且发现了黑洞存在的新证据。对它们的研究为更好地理解河外天体的相对论性喷流和黑洞吸积方面的问题开辟了一条新的途径。

关键词 天体物理学 — 微类星体 — 综述 — 黑洞 — 吸积盘 — 喷流

分类号 P157.6

1 引 言

随着上世纪 90 年代 microquasar (微类星体) 视超光速运动现象的发现, 以及在 X 射线波段观测手段和技术的提高, microquasar 逐渐走入人们的视野。Microquasar 是银河系中具有恒星级质量的黑洞^[1]。它们的很多现象看起来酷似较小尺度上的类星体 (只有类星体的几百万分之一), 其内部结构和基本物理性质与类星体非常相似, 都包含有一个中央引擎 (普遍认为为是黑洞) 和一个环绕其周围的吸积盘。和类星体一样, 有些 microquasar 可以观测到喷流, 而大多数则无法观测到。由于黑洞本身不能发出任何信息, 它们都是通过吸积物质 (类星体主要通过吸积系统周围物质, 而 microquasar 主要是吸积伴星的物质) 以及通过吸积盘 (和喷流, 如果系统存在喷流的话) 释放出部分引力能并以热辐射和非热辐射的形式向四周辐射, 使人们能够通过望远镜观测到。类星体和 microquasar 的结构及各波段辐射能谱的位置可以用图 1 十分直观地表示出来。尽管类星体的发现已有 30 多年, 但它们仍然是宇宙中最神秘的几类天体之一。人们普遍相信这类天体是由位于遥远星系中心、具有几百万个太阳质量的中央黑洞提供能源。它们的光度比普通星系如银河系大得多, 而这样大的光度却来源于一个比太阳系还小的区域。它们不时会喷发出相对论性喷流, 在观测上表现为以超过光速的速度运动 (即视超

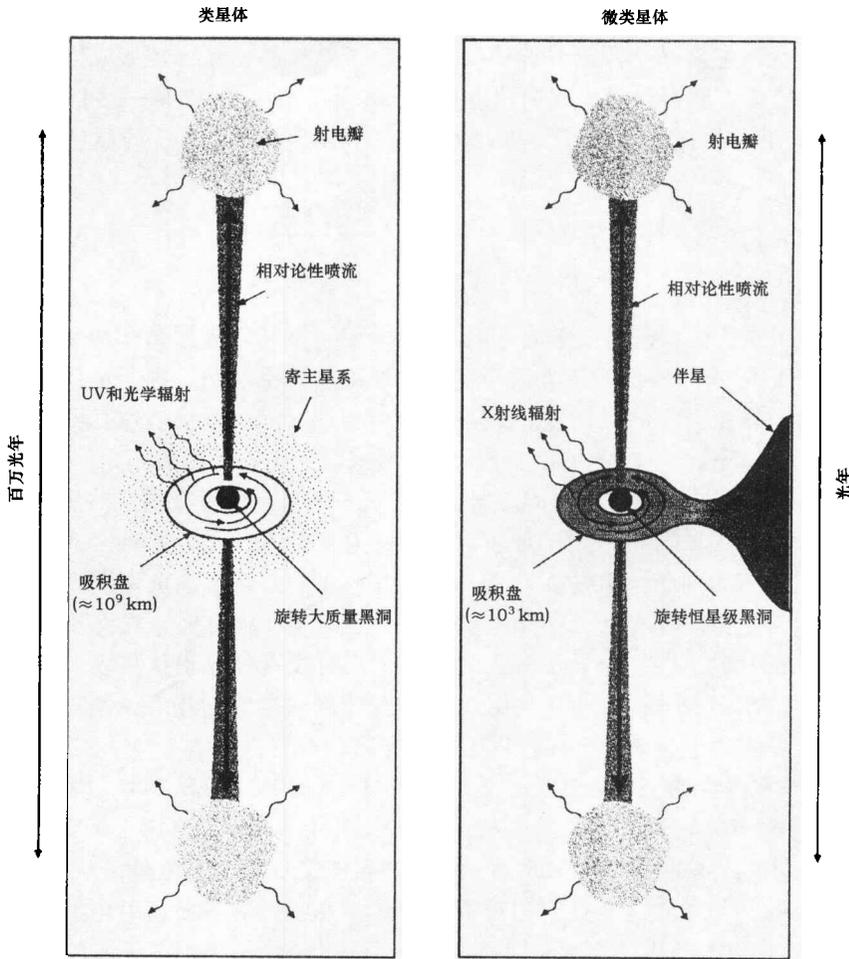


图 1 类星体和 microquasar 的物理结构及能谱辐射示意图 [1]

和类星体一样，microquasar 主要由下列成份构成：(1) 旋转黑洞；
(2) 通过粘滞损耗加热的吸积盘；(3) 相对论性的准直喷流。

光速运动)。由于类星体是河外天体，距离我们极其遥远，在解释其能量来源和相对论性喷流特性方面引入了许多不确定因素。另一方面，microquasar 相对类星体而言离我们很近，尺度也只有类星体的几百万分之一，可以通过最先进的望远镜和观测技术深入到距黑洞最近的可观测区域，更详细地了解其演化过程，这对理解遥远类星体内黑洞吸积物质和相对论性喷流起源之间的关系开辟了一条新的途径 [1,2]。

2 Microquasar 的基本性质

Microquasar 最早是在观测 X 射线双星的过程中发现的。X 射线双星系统由一颗致密星

和一颗伴星组成, 而现在认为这种致密星只能是中子星和黑洞两种候选天体。因为中子星存在质量上限, 普遍认为不能超过 $3 M_{\odot}$, 所以当所测的双星系统中致密星质量大于中子星质量上限时, 即可认定它是一个黑洞候选体^[1~3]。由于双星的相互绕转形成掩食以及多普勒频移, 对于不少系统可以测得伴星的视向速度曲线, 从而得到该系统的一系列重要参数, 如轨道周期 P 、视向速度曲线振幅 K 和轨道偏心率等^[4], 并定出双星系统的质量函数:

$$f(M) = \frac{(M_1 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{PK^3}{2\pi G}, \quad (1)$$

式中 $f(M)$ 代表了系统中致密星质量的下限。如果能够再测得轨道倾角和两个天体的质量比, 就能够定出各子星的具体质量。若质量函数或者致密星的质量超过中子星质量上限, 就可以比较可靠地认为该系统为黑洞候选体, 目前所知的 microquasar 系统质量范围均在 3 个到十几个太阳质量之间。对下面几个源的简单介绍将给大家留下比较深刻的印象。

Cyg X-1 是第一个被发现有很强的证据表明它是一个具有恒星级质量的黑洞候选体^[5,6]。经过大量的观测和详尽的分析, Herrero 等人^[7]在总结前人工作的基础上, 定出其黑洞候选体和伴星的质量分别为 $M_1 = 10.1 M_{\odot}$ 和 $M_2 = 17.8 M_{\odot}$, 轨道倾角为 35° 。由于其质量远远大于中子星质量上限, 基本上可以肯定 Cyg X-1 为黑洞双星系统。Cyg X-1 的辐射几乎覆盖了整个波段, 在射电^[8,9]、光学、UV、紫外、X 射线直到 γ 射线波段上都探测到了较强的辐射^[8,10~12]。Stirling 等人^[9]还利用 VLBA 探测到它准直的相对论性喷流, 其速度超过 $0.6c$ 。对该源的观测为了解该类天体提供了非常丰富的资料。

另外两个非常著名的 microquasar 源是 GRS 1915+105 和 SS 433, 对它们的研究已十分详尽细致。GRS 1915+105 发现于 1992 年^[13], 其主星质量为 $(14 \pm 4) M_{\odot}$ ^[14], 距离为 (12.5 ± 1.5) kpc^[15]。GRS 1915+105 的光谱范围很宽, 从射电到红外, 从软 X 射线到几百 keV 波段均有辐射^[1,2]。双边准直的相对论性喷流, X 射线和红外、射电波段的相关性, 尤其是 X 波段丰富的变化特征以及准周期振荡等特性令其成为一个独一无二的最富成效的研究对象^[1,2,16~18]。X 射线双星 SS 433 则是唯一一个从正反向相对论喷流上探测到经过多普勒移动的红移和蓝移谱线的天体系统^[19], Margon 等人^[20]根据运动学模型得到它的喷流速度为 $0.26c$ 。通过 VLBI 观测, Vermeulen 等人^[21]独立证实了上述结果。另外, SS 433 喷流的振荡模式^[19]、谱线视运动速度的双周期性变化^[22]以及超爱丁顿吸积等特性^[23,24]令其成为人们普遍关注的对象, 当然不少遗留下来的问题, 如主伴星的真实质量、喷流的形成过程以及吸积盘进动起源等也使人们对它兴趣不减。

目前, 已发现了约 250 个 X 射线双星系统, 其中约有 50 个系统探测到了射电辐射, 而这些源中又约有十几个探测到了射电喷流。射电喷流的存在是表明系统是 microquasar 很重要的证据^[25,26], 下面将对 microquasar 源的一些基本性质作简要的介绍。

2.1 分 类

当前通过对电磁波的两个极端频率, 即射电和硬 X 射线波段进行观测来揭示 microquasar 天体的存在^[27]。由于大部分 microquasar 都在双星的 X 射线观测中被发现, 因此 microquasar 的分类主要是根据其 X 射线波段的能谱特点。在理论上对于以爱丁顿极限吸积率吸积的黑洞

来说, 吸积盘内区的温度具有如下的形式^[28]:

$$T \approx 2 \times 10^7 M^{-1/4},$$

其中 M 是以 M_{\odot} 为中心天体质量。类星体的吸积盘在光学和紫外波段上有较强的辐射, 而 microquasar 的吸积盘辐射热谱应集中在 X 波段上。SS 433 是一个比较特殊的源, 有些作者认为其吸积盘的辐射区域主要在光学和紫外波段。根据 X 波段辐射持续性, 通常把 microquasar 分为两类: 一类称为暂现源 (transients), 顾名思义这类源的 X 波段流量变化比较剧烈, 有时候会产生短暂爆发, 变得很亮, 有时候甚至无法观测到。这类源中比较有代表性的是: GRS 1915+105、GRO J1655-40、GS 2023+338、GRO J0422+32^[29]; 另一类称为 X 射线久现源 (persistent black hole X-ray binary systems), 这类源在 X 射线波段上长期可见, 比较典型的有: Cyg X-1、GRS 1758-258、1E 1740.7-2942、GX 339-4、LMC X-1、LMC X-3、LS 5039、SS 433^[29,30]。需要指出的是, 暂现源和久现源并不一定属于 microquasar 系统, 它们也可能是中子星系统, 但这类系统并不在本文的考虑范围之内。

Tanaka 等人^[3]认为当吸积率低于某个临界吸积率时会造成物质吸积流的不稳定, 物质由盘外吸积到盘内区会受到阻塞, 因而 X 射线光度不能长期保持, 当物质在盘内积累到一定程度时就会形成短期爆发。系统的吸积率在临界吸积率附近可能是造成这种光谱特性的原因。Esin 等人^[31]在完善 Narayan 等人^[32,33]提出的径移主导吸积流 (Advection Dominated Accretion Flow, 简称 ADAF) 模型时也得出了类似的结论。一般认为, 具有大质量伴星的系统有丰富的原料提供吸积物质, 因而是久现源的可能性比较大; 而小质量的伴星可供吸积的物质相对较少, 较有可能成为暂现源。具有大质量伴星的系统主要以星风形式吸积物质, 而小质量伴星则要通过洛希瓣来形成吸积流^[30]。

值得一提的是, 暂现源的一个子类——软 X 射线暂现源 (soft X-ray transients, 简称 SXTs) 是这样一类双星系统: 它们中的吸积星往往是黑洞, 而传送物质的伴星则是一个低质量的主序星^[32]。这些源不时会产生爆发, 这时光学和 X 射线光度可增加几个量级以上; 而在静态时, 光学和 X 射线光度比根据吸积率算出的理论光度还低好几个数量级, 很难探测到^[34]。因此 Narayan 等人^[32,33]提出 ADAF 模型就是为了很好地解决这个问题。A0620-00、V404 Cyg 和 Nova Muscae 是该类天体几个比较典型的代表。

2.2 光谱特性

Microquasar 的光谱范围差不多和类星体一样, 几乎覆盖了从射电到 γ 射线所有波段的光谱辐射, 而各波段的变化时标却只有类星体变化时标的几百万分之一。由于物质吸积流到达黑洞的特征时标与黑洞的质量成正比, 在 microquasar 上出现几分钟的时标变化, 在一个质量为 $10^9 M_{\odot}$ 类星体上产生类似现象却需要几千年的时间^[1], 这对于人们了解这类天体的内禀物理特性和演化是非常有利的。

在射电波段, 根据观测得到的高亮温度、快速变化以及线偏振特性表明射电谱起源于同步辐射, 射电辐射的时间演化可以用不断膨胀的锥形喷流来很好地模拟^[2,29,35]。射电波段的变化时标可以短至几分钟。Fender 等人^[36]探测到 GRS 1915+105 的射电线偏振度在 1%~2% 之间, 而 Stirling 等人^[9]在 5 GHz 上观测到 Cyg X-1 低于 10% 的线偏振。红外和光学波段的辐射机制较为复杂。1998 年, Mirabel 等人^[37]以及 Corbel 和 Fender^[38]通过对 GRS

1915+105 和 GX 339-4 的多波段观测结果的分析发现, 其红外波段的辐射与射电波段一样起源于喷流的同步辐射, GX 339-4 所包含的从红外到 X 波段的幂律成份均起源于喷流的同步辐射。Narayan 等人^[33]对软 X 射线源 V404 Cyg 多波段数据进行分析后认为, 红外辐射来源于薄盘的热辐射, 其光学辐射起源于靠近黑洞 ADAF 区的同步辐射。对于 SS 433, 光学波段的辐射机制与上述机制又不尽相同, Gies 等人^[22]和 Fender^[39]都认为其光学和紫外辐射均为源自吸积盘的黑体谱和星风的致密部分。所以只能说对于不同的天体系统, 红外、光学和紫外辐射可能产生于不同的辐射机制。

对 microquasar X 射线波段的观测是最为丰富和细致的, 由于几乎所有 microquasar 吸积盘的辐射区域集中在 X 射线波段, 且距离我们又近, 再加上新的望远镜和新的技术, 近年来对它们的观测研究是比较全面的。根据 X 射线在 1~10 keV 的谱形和流量水平, 黑洞 X 射线双星的 X 波段光谱分为 5 个态^[40]: (1) 低 / 硬态 (low/hard state), 有一个幂律谱, 光子谱指数约为 1.5~1.9, 指数截止在 100 keV 附近, 总 X 射线光度通常低于爱丁顿光度的 10%^[41]; (2) 高 / 软态 (high/soft state), 有一个超软的类黑体谱成份, 其特征温度约 1 keV, 总 X 射线光度超过低态。另外, 除了热谱成份外在谱中还可看到一个硬幂律尾, 尽管该成份远低于低态情况; (3) 中间态 (intermediate state), 是指介于低态和高态之间的谱态, 其谱特征也是介于这两个态之间; (4) 极高态 (very high state), 有很高的光度, 非热尾和黑体成份的流量可相比拟, 幂律成份的光子谱指数约为 2.5, 并且没有证据表明即使延伸到几百 keV 会存在指数截止; (5) 静态 (quiescent/off state), 明显表现为非热谱, 光子谱指数较低态软, 流量比前 4 个态低好几个量级。SXTs 的 X 射线谱就基本上处在该谱态上。在 X 射线上尽管存在这么多的谱态, 但很大一部分源的 X 射线谱基本上处于低态, 在该谱态上由一个延伸到大于 100 keV 的幂律成份所支配, 该成份一般被认为源自黑洞附近的康普顿化冕或 ADAF 区, 由逆康普顿散射所产生, 吸积盘的热成份在略低于 10 keV 的软 X 射线上仅仅贡献略低于 20% 的光度。而高态上情况几乎相反, 主要由薄盘热成份所支配^[29,42~44]。

由于 microquasar 的 γ 源很少, 被真正证认为是高能 γ 源 ($E > 100$ MeV) 的天体只有 LS 5039^[45], 目前在该波段上认识甚少, 有待今后的进一步观测和研究。

3 Microquasar 源的高分辨率射电结构及视超光速运动

由于 microquasar 的内部物理结构以及能源机制与类星体十分相似, 因此人们期望通过对 microquasar 高分辨率或综合孔径的 VLBI 观测, 得到与类星体相类似的射电结构图像, 从而可以根据多历元的观测结果, 判断它们是否存在视超光速运动, 并对喷流的物理特性有更明确深刻的认识。

3.1 高分辨率射电结构图像

Microquasar 的射电结构多表现为双边喷流的形式, 有些也表现为核喷流结构, 这与类星体的射电结构非常一致。由于 microquasar 离地球很近, 比较容易观测到它们的双边喷流结构。图 2 给出了 microquasar 上述两种结构比较典型的代表, (a) 图为源 LS 5039 用 VLBA 和 VLA 两天线阵联合在波长为 6 cm 处观测所得的由中央核喷出的双极喷流结构。分析表明射电谱为同步辐射产生的幂律谱, 其喷流结构总是存在并由核中连续喷出。东南

和西北两个喷流分量的流量比为 2.1 ± 0.4 ，表明其相对论性的多普勒增亮效应，速度应大于 $(0.15 \pm 0.04)c$ 。该源的光谱范围很宽，是唯一一个探测到高能 γ 射线的源。(b) 图为 Cyg X-1 在 1998 年 8.4 GHz VLBA 多历元观测中的一项结果，它是一个典型的核喷流结构，速度大于 $0.63c$ 。该源同时通过星风和洛希瓣吸积物质，且大部分时间处于低态，在该态上的喷流被认为总是存在的 [9,46]。

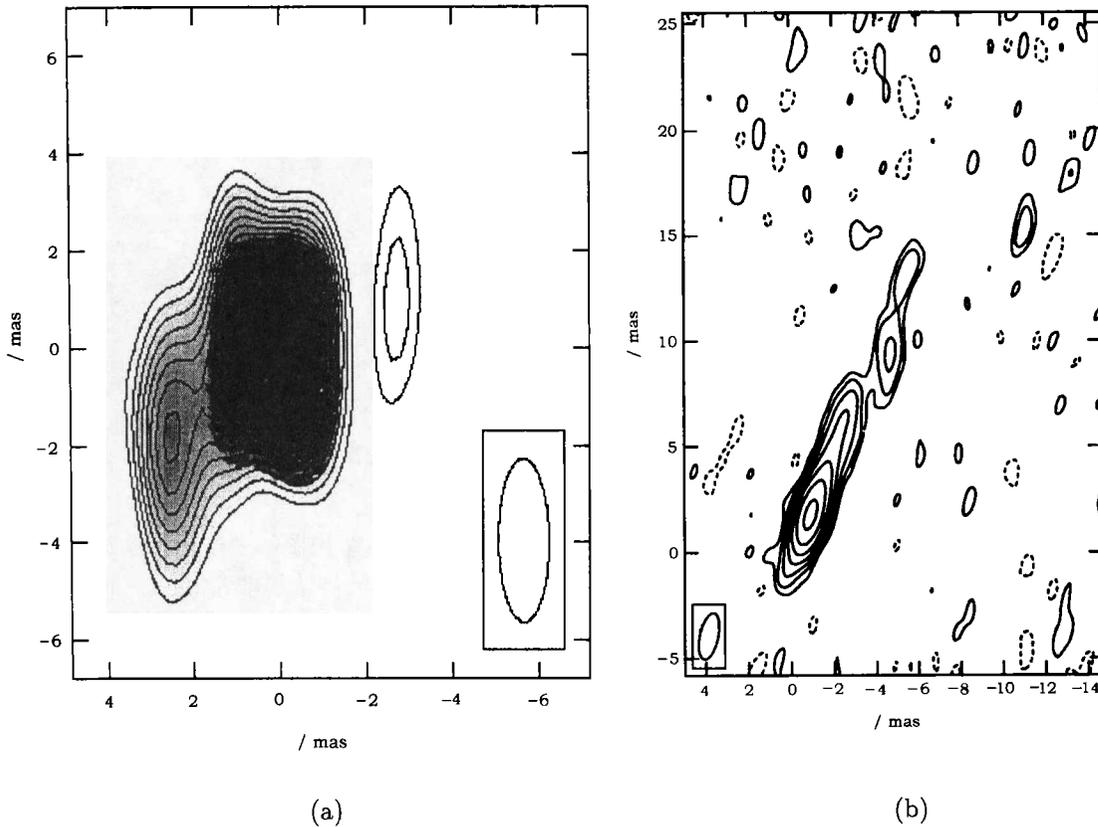


图 2 (a) LS 5039 在波长 6 cm 处 VLBA+VLA 的观测结果: 分辨率 3.4×1.2 mas [45]

(b) Cyg X-1 在 8.4 GHz 上的 VLBA 观测结果: 分辨率 2.25×0.86 mas [9]

图 3 (a) 为视超光速源 GRS 1915+105 在一次大的耀发中，利用 VLBA 观测所获得的 8.4 GHz 高分辨率射电结构图像。其中星号代表中央核位置，流量密度约为 20 mJy。较亮的东南(向我们靠近的)喷流分量距核 (47.5 ± 0.3) mas，分离速度为 (0.90 ± 0.05) mas \cdot h $^{-1}$ ；较暗的西北(退行)分量距核 (17.4 ± 0.3) mas，分离速度为 (0.33 ± 0.02) mas \cdot h $^{-1}$ ，与其是反向喷流相一致。图 3 (b) 为 microquasar 源 1E 1740.7-2942 利用 VLA 所获得的 5 GHz 射电结构图像，其结构由一个致密的核加上双边喷流组成。图中中心圆圈为相应的 ROSAT 源的位置误差范围，与射电结构致密核的位置相吻合。如果 X 射线辐射来自吸积盘，那么这与理论上的盘加垂向喷流的物理图像相一致 [2]，也与类星体的结构相一致。

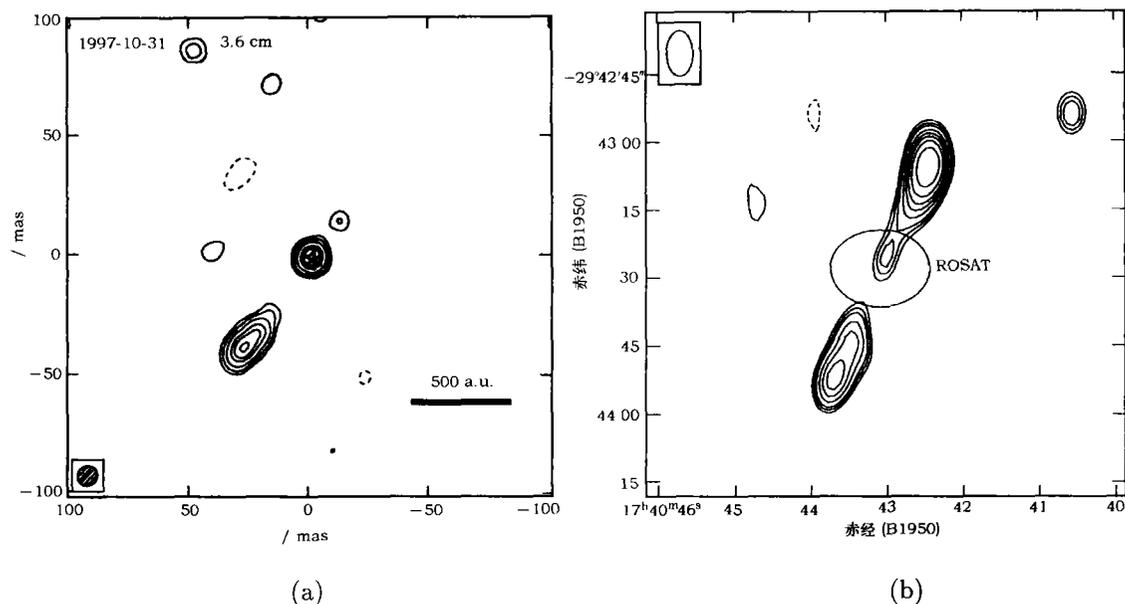


图 3 (a) 视超光速源 GRS 1915+105 在波长为 3.6 cm 处高分辨率射电结构图像: 分辨率 80 a.u. ^[16]
 (b) 1E 1740.7-2942 在波长为 6 cm 处的 VLA 观测结果 ^[29]

中间圆圈代表相应源的 ROSAT 位置误差。

以上是几个比较有代表性的 microquasar 源的高分辨率射电结构图像。对这类源的射电观测和研究已经相当广泛和深入, 研究表明这类天体与河外的类星体结构非常相似, 同时对它们的结构和物理机制及狭义相对论效应也均有更深刻的认识。

3.2 视超光速运动

在类星体中发现以高达十几或更高倍光速运动的现象已有 20 多年, 现在人们普遍确信, 这种视超光速现象是由于相对论性的光行差效应所产生的一种错觉, 而并非真实物质在作超光速运动 ^[47]。在河外天体中通常观测到喷流仅在喷射源的一边作视超光速运动, 而不能知道超光速运动是代表在缓慢运动喷流中的波的传播还是辐射源的真实运动。另外由于 microquasar 的射电结构与类星体非常相似, 因此, 预期在 microquasar 的射电观测中也能观测到视超光速现象。

黑洞候选体 GRS 1915+105 是第一个被观测到有喷流视超光速运动的河内源, 它或许是至今在所有黑洞系统中吸积盘和喷流强烈耦合的最好的例子 ^[48,49]。该天体提供了一个研究黑洞吸积以及喷流的形成、准直等有关现象且距离我们很近的天然实验室。GRS 1915+105 不但在 X 波段表现出非常丰富的变化特性, 而且在与其相耦合的射电波段也表现出耀发、强流量持续、弱流量持续及振荡等极其复杂丰富的变化特性 ^[42]。由于射电辐射源自喷流内的同步辐射 ^[16], 喷流的结构和形态也会发生相应的变化。图 4 (a) 记录了 1994 年 3 月到 4 月期间由核心喷出的一对喷流团块随时间运动变化的情况。该图像是利用美国甚大阵 VLA 在波长为 3.5 cm 处的连续 6 个历元的观测结果。图中所有等轮廓图为直观及记录方便顺时针旋转了 60°, 小叉号代表静止的核心位置。从图中可以看出, 左边各喷流分量 (靠近我们) 明显要比右边相

对应的喷流分量(退行分量)亮, 离核的速度也要快。这种亮度和横向运动的不对称性与以相对论速度运动的孪生喷流云团反平行喷射的假定是一致的, 可以很好地用相对论性的光行差效应来解释。图 4 (b) 记录了各靠近我们的喷流分量(上图)和各退行分量(下图)的位置变动情况。通过拟合可以得到左边分量自行为 (17.6 ± 0.4) mas/d, 右边分量为 (9.0 ± 0.1) mas/d。

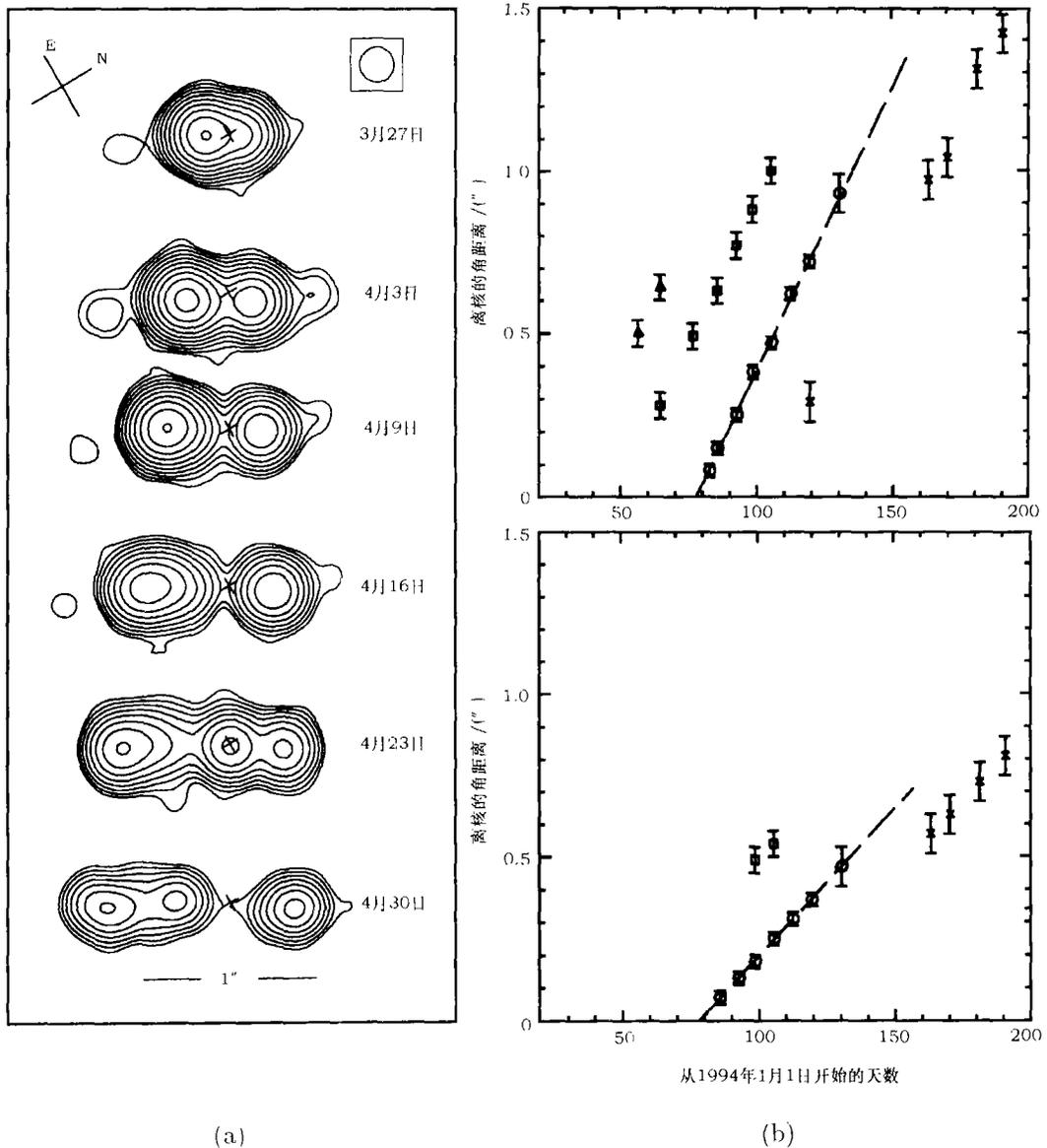


图 4 (a) GRS 1915+105 中的喷流团块随时间运动的变化情况^[2]

叉号代表静止核心位置, 右上圆圈为束大小。

(b) (a) 中各分量位置随时间变化的情况^[2]

上图为靠近观测者的各分量位置变化情况, 下图为各退行分量位置随时间变化的情况。

采用源离观测者的距离为 12.5 kpc，则两分量的速度分别为 $1.25c$ 和 $0.65c$ 。假定喷流结构是对称的，利用第 4 节的相对论方程，就可以得到其真实速度为 $0.92c$ ，喷流视角约为 70° ，这与通过图像观测得到的结论是一致的。由此 Mirabel 等人^[1]认为，在 GRS 1915+105 中观测到超光速运动的双边喷流证实了在宇宙中存在物质的高度相对论性喷射，并支持了河外天体与 microquasar 相类似的结论。

X 射线源 GRO J1655-40 中观测到的相对论性喷发与 GRS 1915+105 的喷发存在十分惊人的相似之处。在射电波段 GRO J1655-40 同样被观测到一个双边喷流结构，以类似 GRS 1915+105 的速度 $0.92c$ 向两边喷射。GRO J1655-40 和 GRS 1915+105 是两个发现较早的河内视超光速源^[2]。所不同的是在 GRO J1655-40 中观测到的两边相对应的喷流团块流量的不对称性并不能归因于相对论放大效应。看来，这种亮度不对称性不仅是内禀的，而且随不同事件变化。值得注意的是，这种流量不对称性同样在 SS 433 中被观测到，并且 SS 433 中退行的喷流节点总是比靠近我们的喷流弱，这种效应不能简单地用束效应来解释，它可能跟自由-自由吸收及双边喷流经过不同的路径有关^[50]。

4 喷射参数及狭义相对论效应

假定一对团块同时从源的两边沿反平行方向以同样的相对论性速度喷射，那么这两个团块的自行就可以表示为

$$\mu_{a,r} = \frac{\beta \sin \theta}{(1 \pm \beta \cos \theta) D}, \quad (2)$$

其中 β 表示以光速为单位的团块真实运动速度， D 为源与观测者之间的距离， θ 为喷流与视线之间的夹角，下标 a 和 r 分别表示接近和远离观测者的团块，符号“+”和“-”分别与 r 和 a 相对应。如果知道两个团块的自行，就可以根据 (2) 式推断出距离的上限 $D \leq c/\sqrt{\mu_a \mu_r}$ 。对于源 GRS 1915+105 1994 年的观测结果可以得到其距离 $D \leq 13.7$ kpc，这与上面给出的结果非常吻合。另外，如果能够观测到两喷流团块内谱线的多普勒频移 z_a 和 z_r ，则可以利用公式 $\gamma = (z_a + z_r)/2 + 1$ ^[19] 以及 (2) 式，得到团块的真实运动速度和源的距离，其中 γ 表示洛伦兹因子。对于源 SS 433，利用上述方法得到的速度与多历源的 VLBI 观测结果符合得很好。

人们普遍认为河外耀变体的射电辐射起源于喷流中的同步辐射，而在河内的 microquasar 源中也得出了类似的结论，最有力的证据来自对 GRS 1915+105 的多波段观测和分析^[16,37]。由于相对论效应，对于靠近和远离观测者喷流所辐射的流量，有

$$\frac{S_a}{S_r} = \left(\frac{1 + \beta \cos \theta}{1 - \beta \cos \zeta} \right)^{\kappa - \alpha}, \quad (3)$$

其中 α 为谱指数； κ 为反映喷流几何位形的参数，当 $\kappa = 2$ 时适用于连续喷流，当 $\kappa = 3$ 时适用于分立的团块运动。该效应在 GRS 1915+105 的多历元观测中得到了非常好的验证。

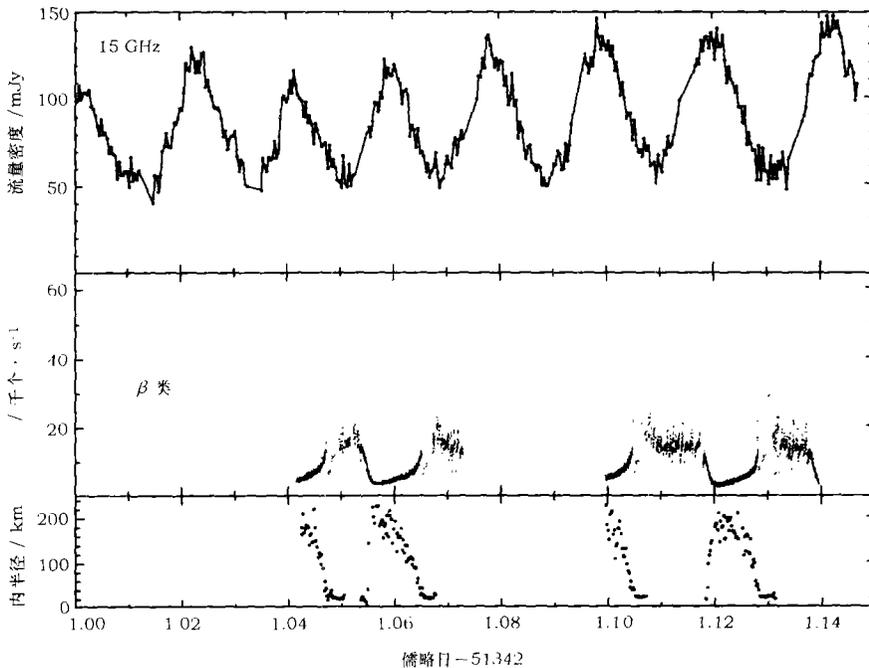
5 X 射线谱态与射电辐射之间的关系

由于 microquasar 离观测者很近且质量又很低（与河外类星体相比），使得这类天体有很

强、变化非常剧烈的 X 射线辐射, 因此能给观测者提供非常丰富的信息。尤其是 X 射线的辐射区域离黑洞很近, 而射电辐射源自喷流, 因此弄清 X 射线谱态和射电辐射之间的关系有利于了解盘和喷流之间的关系以及内禀物理机制。

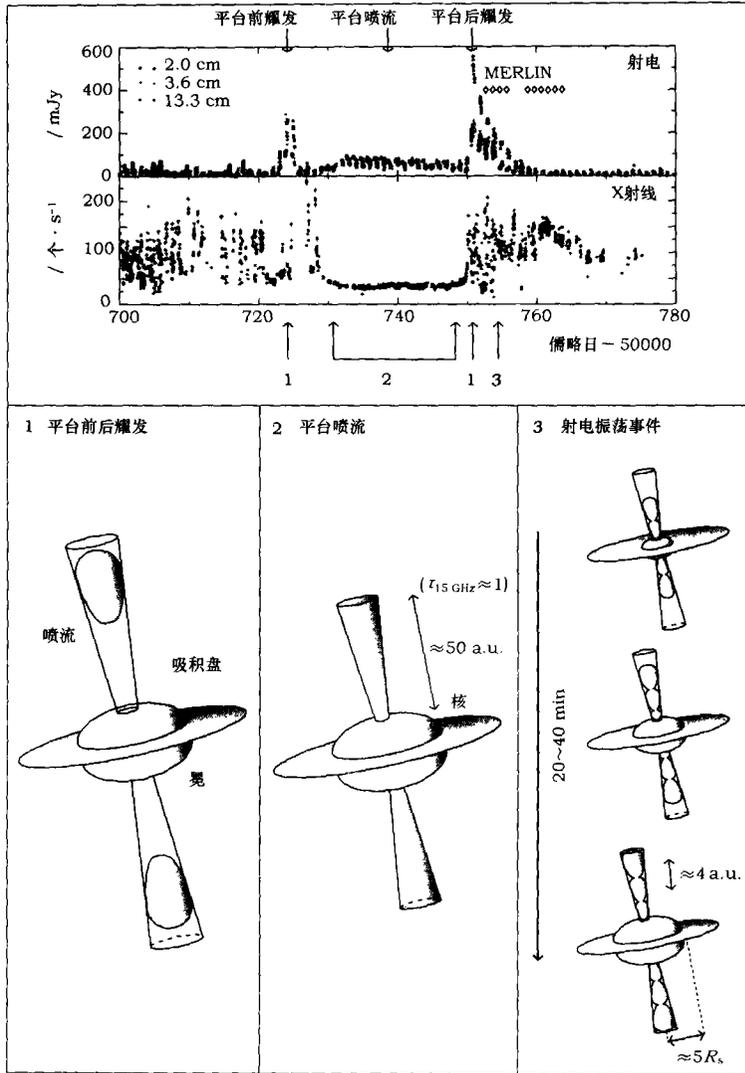
如前所述, X 射线的辐射谱可归纳为 5 种谱态。有些源大部分时间处于静态, 如 A0620-00、Nova Muscae、V404 Cyg 等软 X 射线暂现源; 有些源长期处于低态, 如 Cyg X-1、1E 1740.7-294、GRS 1758-258 和 GX 339-1 等源^[2]; 而有些源大部分时间处于高态。很多迹象表明, 当源处于低态或处于不同谱态的过渡时期时会产生较强的射电辐射或爆发。Fender^[29]通过对 7 个 microquasar 源处于低态时的长期观测分析发现, 这 7 个源在低态时的射电辐射均为平谱或逆谱, 与在 X 射线爆发阶段的光学薄射电辐射显著不同。Muno 等人^[51]确信 GRS 1915+105 的强射电辐射总是伴随着低态出现。Stirling 等人^[9]发现 Cyg X-1 的射电辐射可能在由高态恢复到低态时被首次观测到, 正如 Zhang 等人^[52]发现 1996 年 Cyg X-1 处于高态时射电辐射受到了压制。这种现象还在另一个源 GX 339-4 中被发现^[53]。另外, Fender 等人^[54]发现不同谱态之间的过渡似乎会产生分立的射电喷发, Klein-Wolt 等人^[42]在源 GRS 1915+105 中也发现了类似的行为。

GRS 1915+105 在 X 射线波段表现出最丰富的特性, 观测也最全面, 下面就以它为例对 X 波段辐射行为作一些简单的描述。Belloni 等人^[55]将 X 射线的流量变化特性归纳为 12 类,



(a)

图 5(a) GRS 1915+105 在射电、X 波段上周期性流量变化以及模拟得到的薄盘内半径变化之间的对应关系^[42]



(b)

图 5(b) GRS 1915+105 在 X 波段上不同谱态之间的跃变与相应的射电波段上流量变化之间的关系 [42]

并将流量变化性归结为 3 个基本态 A、B 和 C 之间的变迁，这 3 个态与前面所述的高态、极高态和低态相对应。Klein-Wolt 等人 [42] 通过分析同时观测的射电和 X 波段的数据发现，如果低源处于低态的时间超过 100 s 且相邻的低态之间能够很好地分开的话，则射电波段的振荡与 X 光变曲线上的低态一一对应。下面给出其中的一类典型变化 (见图 5(a))。图 5(a) 中的上、中、下图分别为射电、X 射线的光变曲线，以及利用标准盘模型拟合得到的薄盘内半径大小随时间的变化。尽管 X 射线因掩食有大半时间无法观测到，但还是可以清楚地分辨出射电和 X 射线变化的一一对应关系，并在图 5(a) 中可以发现：随着 X 射线流量的陡然下降到最

低水平, 薄盘的内半径猛然增大到最大值; 当 X 射线流量缓缓上升并跃变到最大时, 薄盘内半径也渐渐降到最低值, 这样循环往复产生周期性的振荡, 导致 3 个基本态从 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 的循环变化。由此表明当源处于低态时, 薄盘可能进入所谓的 ADAF 状态。GRS 1915+105 另一个非常有意思的 X 流量变化是从极高态经过耀发过渡到低态, 然后在低态滞留相当长时间后经耀发变回高态, 参看图 5(b)。图 5(b) 的上面两幅曲线图分别代表射电和 X 波段的流量变化, 下面 3 个结构模型图分别为与 X 光变曲线上 3 个位置 (位置 1 表示前、后耀发, 位置 2 表示平稳态, 位置 3 表示处于振荡阶段) 相对应的模型系统结构示意图。从图中可以看出在前后两个谱态的过渡阶段都产生了很强的射电耀发, 这可能意味着有完全独立的喷流团块从核喷发出来, 而在平稳态则产生持续性的喷流, 在振荡阶段则产生准连续的喷流。

Klein-Wolt 等人^[42]发现在有些平稳态射电流量与软 X 射线流量反相关, 与硬 X 射线流量正相关; 而在有些平稳态情况刚好相反。对于源 SS 433 和 GX 339-4, Marshall 等人^[19]和 Corbel 等人^[38]认为这两个源的射电和软 X 射线都起源于喷流, 因而两者成正相关关系。或许可以同样认为, 在 GRS 1915+105 中那些射电与软 X 流量成正相关的平稳态也可能起源于喷流的同步辐射, 而非吸积盘。

6 黑洞与黑洞吸积

Microquasar 的中央黑洞普遍被认为由大质量恒星经过坍缩而成, 质量在几个到几十个太阳质量之间, 它们通过吸积伴星的物质释放部分引力能而向周围辐射能量。为了方便陈述, 这里根据总辐射光度和爱丁顿光度的比值把 microquasar 天体划分为 3 类: 一类是低光度 microquasar, 其总光度比爱丁顿光度低好几个量级。软 X 射线暂现源就属于这一类天体, 它的光度较爱丁顿光度低约 5~6 个量级^[31,32]; 第二类是中光度 microquasar, 其光度可与爱丁顿光度相比拟, 但略低于爱丁顿光度。这类源相当多, 如 Cyg X-1、GRS 1915+105 等, 在 X 射线上表现出非常丰富的变化特性; 第三类为高光度 microquasar, 其发出的光度超过爱丁顿光度。目前在河内发现的这类天体较少, SS 433 及 V4641 Sgr 很可能属于这一类源^[56]。这样划分的另一个理由是用以解释这 3 类天体的 X 射线辐射特性的吸积盘模型也有所差别。下面分别对这 3 类天体进行比较详细的描述。

对于低光度 microquasar 源, Narayan 等人^[32,33]发现其光度较爱丁顿光度低约 5~6 个量级, 比用吸积率算出的理论光度低得多, 光谱也无法用一个纯粹的薄盘模型来解释, 并且相邻两次爆发的时间间隔也与观测不符, 因此他们提出了径移主导吸积流模型 (ADAF)。该模型将吸积盘分为两个区, 外区以标准薄盘为主, 温度比较低, 随着吸积流往里运动, 越来越多的气体从盘面蒸发, 在薄盘上面形成一个冕区, 当半径小于某一过渡半径时, 整个吸积流被完全转化为一个黑洞周围的冕, 形成盘的另一个区, 即 ADAF 区。冕流会继续往里运动, 直到在视界中消失或者是其中的一部分形成喷流, 一部分进入黑洞。由于很大一部分引力势能在 ADAF 区通过粘滞损耗转化为热能, ADAF 区的温度非常高, 压强很大, 使得 ADAF 区呈准球对称分布, 并且这些热能大部分为 ADAF 区中的离子所获得。由于密度非常稀薄, 离子和电子之间的能量传递只能通过库仑碰撞, 效率非常低下。与离子相比较, 电子的辐射效率非常高, 这样就形成了双温等离子体。由于等离子体的内落时标比能量传递时标快得多, 因

此大部分的热能随着离子进入了黑洞。ADAF 区的辐射机制以康普顿散射、同步辐射和韧致辐射为主,这样就很自然地解释了吸积率和光度之间的矛盾以及所观测到的沉寂期的光谱。软 X 射线暂现源的爆发则可用吸积盘外区薄盘的盘不稳定模型来解释^[57]。当盘内气体温度较低且呈完全中性或者是温度很高并完全电离时,盘是稳定的;而当气体处于准电离状态时盘是不稳定的。这种不稳定性起源于温度对部分电离盘不透明性的严重依赖,当吸积率处于某一临界状态时,盘就会在两个稳定态之间产生热有限循环,形成间歇性爆发。

Esin 等人^[31]认为随着吸积率的增加,ADAF 区慢慢往里缩,当吸积率高于某一值时,ADAF 区的辐射效率会迅速增加,X 射线谱就进入了低态;而当吸积率高于某一临界值时,ADAF 区就会完全消失。由于低态和高态之间的吸积率范围很窄,使得这类源比较容易在不同态之间来回跃迁,形成丰富多彩的 X 射线的光谱特性。虽然致密天体的大质量 ($> 3 M_{\odot}$) 是作为黑洞的有力证据,但黑洞与其它天体的本质区别在于存在视界而没有坚硬的表面。当吸积物质到达视界附近会被直接吸进去消失,而吸积物质到达中子星表面时会发生剧烈的碰撞,形成一个温度很高的区域,在成像时会存在一个亮点,这一点已通过 Chandra 卫星观测得到证实^[58]。上述过程表现在 X 射线的光变曲线上就是黑洞 ADAF 区的离子热能进入视界消失,X 射线流量猛然下降,而在中子星上其离子热能会通过碰撞释放出来,X 射线流量则表现为缓慢下降。这一点也可以从图 5 的 X 射线流量变化得到证实。

至于高光度的 microquasar 天体,它们作超爱丁顿吸积。目前有两种吸积盘模型可以解释超爱丁顿吸积:一种是光学厚几何厚盘模型^[23]。该模型将整个盘分为对流主导的外区和 ADAF 主导的内区,喷流在 ADAF 区受到辐射压加速而形成;另一种还是薄盘模型。整个吸积盘均由薄盘构成,一直延伸到盘的最后稳定轨道。与标准盘不同的是盘内的气体密度分布很不均匀。由于光子气泡不稳定性的非线性发展,磁化并以辐射压为主的大气在一个比辐射压标高尺度小得多的尺度上会变得非常不均匀。在该机制下,引力将辐射挤出比较致密的区域,而磁张量通过阻止气体向两边扩散又增加了这种致密性,从而也增加了密度的对比度。引力和气体压支配了致密区域的压力平衡。而在低密区,如果低密区和高密区能够动态地相耦合,则向上的辐射压力能够和向下的引力取得平衡。如果大部分质量位于致密区,则大部分空间充满了稀薄气体,通过这种系统的总流量就能超过爱丁顿光度很多倍。SS 433 可能是该模型一个很好的例子,另外该模型还能避免因未能发现介于大质量和小质量黑洞之间的黑洞系统而产生的问题^[59]。

另外,不少 microquasar 源在 X 波段上探测到各种各样的准周期性振荡,如 GRS 1915+105、GRO J1655-40、XTE J1550-564,还有一些软 X 射线暂现源^[2,60,61]等。一般来说同一个源也会包含一系列不同的准周期成份,如 GRS 1915+105 的 X 射线包含了 0.001~64 Hz 以及 67 Hz 等准周期成份^[1,62]。其中依赖强度的窄准周期振荡 0.001~10 Hz 是硬支 X 射线的表征,当源进入极高态即软支 X 射线时,这些成份就会消失^[63]。Bandyopadhyay 等人^[61]发现低频准周期振荡的频率在软 X 射线暂现源爆发期间增加了,这可能是盘质量增加的一个迹象。Mirabel 等人^[1,2]认为在 GRS 1915+105 中最大准周期振荡频率是黑洞基本性质(即黑洞的质量和自转)的函数,并与黑洞的最后稳定的圆轨有关,或者是与广义相对论盘地震有关。具体地说,该频率依赖于径向本轮频率(radial epicyclic frequency)以及黑洞的自转。

7 喷流的形成

前面提到 microquasar 的 X 射线谱态与射电辐射之间存在非常密切的关系, 尤其是当源处于低态时似乎总伴随着较强的射电流量的发生。下面仍以 GRS 1915+105 为例对喷流的形成加以讨论。1997 年 9 月, Mirabel 等人^[1,2,37] 同时在射电、红外和 X 射线 3 个波段对 GRS 1915+105 进行观测, 结果如图 6。为了能够在同一图中同时显示 3 个波段的流量变化, 他们分别对 3 个波段的流量变化作归一化处理。图 6 中的下面窗口给出了 X 波段硬度比 $(13\sim 60 \text{ keV})/(2\sim 13 \text{ keV})$ 。由图 6 可以看出, 等离子团块的相对论性喷发总是落在不寻常的 X 活动性后面。具体来说就是喷发事件的发生与硬 X 波段光度的突然下降有关。由图 6 下面的窗口也可发现, 当 X 流量突然下降时, 其 X 硬度比猛然上升, 源暂时进入低态, 在黑洞附近的内盘因高压膨胀形成 ADAF 盘。当硬度比开始恢复原状时, 也就是 ADAF 区回缩吸积盘内区由外到里重新开始形成时, 在 X 光变曲线上产生一个脉冲, 红外波段的流量开始上升, 表明喷流开始形成和喷发。射电和红外波段之间的时延是由于喷流的绝热膨胀以及高能电子因同步辐射 (或许还应加上磁场的减弱) 失去相当一部分的能量, 辐射由红外过渡到射电波段而造成它们之间的延时。

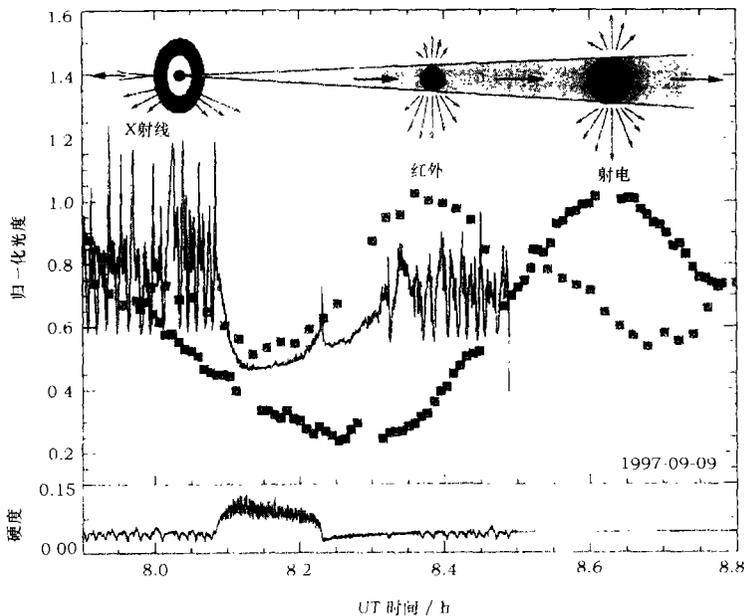


图 6 GRS 1915+105 在射电、红外和 X 射线 3 个波段的流量变化^[2]

上面结构示意图表示喷流的形成和演化, 中间为射电、红外和 X 波段上的流量变化, 下面为 X 射线的硬度比 $(13\sim 60 \text{ keV})/(2\sim 13 \text{ keV})$ 。

不少作者^[2,43] 认为黑洞附近的 ADAF 区或者是冕区的形成储备了形成喷流的等离子气体, 当吸积率增加 ADAF 区向里收缩时, 区内的部分等离子气体向外喷发, 经过加速和准直过程, 最终完全与吸积盘脱离, 形成人们所观测到的喷流。Meier^[64] 于 2000 年提出了一种喷

流形成模型, 认为只有当吸积流是几何厚的内流并且黑洞必须自转时才能产生最强的射电辐射喷流, 因为极向磁场分量才是形成喷流的主要动力, 而强的极向磁场分量只有在厚盘且在黑洞自转的情况下才能产生, 这样也就把黑洞的部分转动能通过磁场提取出来, 并且厚盘的漏斗形状也有利于对外流进行准直。该模型与传统的喷流形成模型^[65]不同的地方在于, 后者磁化吸积盘的角动量是加速外流的原动力, 而前者喷流的能量很大一部分来自黑洞的自转。Meier 的模型能很好地解释中光度 microquasar 源中低态与喷流的强相关性, 低光度 microquasar 源在爆发期间产生喷流而仍然处于低态的事实^[44], 以及高光度 microquasar 源的超爱丁顿吸积可用光学厚几何厚盘的模型来解释等种种情况。另外, 该模型还能推广到射电星系以及类星体, 因此可以说是一个非常成功的模型。

8 结论和展望

由于 microquasar 是河内天体, 其质量只有类星体的几百万分之一, 且距离我们非常近, 因此人们能够跟踪 microquasar 天体双边喷流的运动, 确定喷流主要是由作相对论性运动的物质所构成, 而非是在缓慢运动的喷流中以相对论速度传播的波。在 microquasar 天体中, 喷流作相对论性运动的洛伦兹因子与类星体中所探测到的大小相类似。通过对 microquasar 源的双边运动喷流的研究, 可以用狭义相对论约束来确定源与观测者之间的距离。尤其是 microquasar 源能够提供非常丰富的 X 射线波段信息。由于 X 射线的辐射区域被认为是来自黑洞附近的吸积盘的不同区域, 人们对吸积盘本身以及吸积盘与喷流形成之间关系的认识都有了长足的进步, 径移吸积流模型和 Meier 的喷流形成模型都是非常成功的理论模型, 能够与很多观测结果符合得相当好。

河内 Microquasar 的发现开辟了不少新的研究课题, 对它们的研究将会被证明是富有成效的。利用狭义相对论约束, microquasar 源提供了一种新的确定源距离的方法。利用双边喷流中谱线的红移和蓝移, 结合双边喷流的自行方程, 可以精确地测定喷流的速度, 以及源离开我们的距离。目前利用该方法测定距离的源还只有 SS 433, 随着仪器的改进和技术的不断进步, 该方法将会有更多的用武之地。通过对 X 波段更加细致深入的观测和分析以及准周期性振荡和谱线的研究, 可以对广义相对论进行实质性的验证; 对硬 X 射线和软 X 射线的流量变化和光谱分析能更深入地了解盘的动力学模型, 再与其它波段如射电、红外和光学波段相结合进行观测和研究, 可以更进一步地了解黑洞的自转、吸积盘的物理结构和喷流形成之间的关系, 同时也为研究河外类星体提供非常有用的帮助。

参 考 文 献

- 1 Mirabel I F, Rodriguez L F. *Nature*, 1998, 392: 673
- 2 Mirabel I F, Rodriguez L F. *ARA&A*, 1999, 37: 409
- 3 Tanaka Y, Shibasaki N. *ARA&A*, 1996, 34: 60769
- 4 Gies D R, Bolton C T. *ApJ*, 1982, 260: 240
- 5 Bolton C T. *Nature*, 1972, 235: 271
- 6 Webster B L, Murdin P. *Nature*, 1972, 235: 37

- 7 Herrero A, Kudritzki R P, Gabler R *et al.* *A&A*, 1995, 297: 556
- 8 Pooley G G, Fender R P, Brocksopp C. *MNRAS*, 1999, 302: L1
- 9 Stirling A M, Spencer R E, de la Force C J *et al.* *MNRAS*, 2001, 327: 1273
- 10 Brocksopp C, Fender R P, Larionov V *et al.* *MNRAS*, 1999, 309: 1063
- 11 Dolan F F. *PASP*, 2001, 113: 974
- 12 Golenetskii S, Aptekar R, Mazets E *et al.* *GCN GRB Observation Report*, 2002: 1258
- 13 Castro-Tirado A J, Brandt S, Lund S. *IAU*, 1992, Circ. 5590
- 14 Greiner J. 2001, preprint (astro-ph/0111540)
- 15 Mirabel I F, Rodriguez L F. *Nature*, 1994, 371: 46
- 16 Dhawan V, Mirabel I F, Rodriguez L F. *ApJ*, 2000, 543: 373
- 17 Greenhough S C, Chapman S C. 2002, preprint (astro-ph/0207007)
- 18 Fender R P, Rayner D, Trushkin S A *et al.* *MNRAS*, 2002, 330: 212
- 19 Marshall H L, Canizares C R, Schulz N S. *ApJ*, 2002, 564: 941
- 20 Margon B, Anderson S F. *ApJ*, 1989, 347: 448
- 21 Vermeulen R C, Schilizzi R T, Spencer R E *et al.* *A&A*, 1993, 270: 177
- 22 Gies D R, McSwain M V, Riddle R E *et al.* *ApJ*, 2002, 566: 1069
- 23 Okuda T. *PASJ*, 2002, preprint (astro-ph/0202446)
- 24 King A R. 2002, preprint (astro-ph/0206117)
- 25 King A. Workshop on Relativistic Jet Sources in the Galaxy, Paris, 1998
- 26 Mirabel I F, Rodriguez L F, Cordier B *et al.* *Nature*, 1992, 358: 215
- 27 Sunyaev R, Churazov F, Gilfanov M *et al.* *ApJ*, 1991, 383: L49
- 28 Rees M J. *ARA&A*, 1984, 22: 471
- 29 Fender R P. *MNRAS*, 2001, 322: 31
- 30 Smith D M, Heindi W A, Swank J H. *ApJ*, 2002, 569: 362
- 31 Esin A A, McClintock J E, Narayan R. *ApJ*, 1997, 489: 865
- 32 Narayan R, McClintock J E, Yi I. *ApJ*, 1996, 457: 821
- 33 Narayan R, Barret D, McClintock J E. *ApJ*, 1997, 482: 448
- 34 McClintock J E, Horne K, Remillard R A. *ApJ*, 1995, 442: 358
- 35 Marti J, Paredes J M, Estalella R. *A&A*, 1992, 258: 309
- 36 Fender R P, Rayner D, Trushkin S A *et al.* *MNRAS*, 2002, 330: 212
- 37 Mirabel I F, Dhawan V, Chaty S *et al.* *A&A*. 1998, 330: L9
- 38 Corbel S, Fender R P. 2002, preprint (astro-ph/0205402)
- 39 Fender R. 2001, preprint (astro-ph/0109502)
- 40 Tanaka Y, Shibazaki N. *ARA&A*, 1996, 34: 607
- 41 Nowak M A. *PASP*, 1995, 107: 1207
- 42 Klein-Wolt M, Fender R P, Pooley G G *et al.* *MNRAS*, 2002, 331: 745
- 43 Pottschmidt K, Wilms J, Nowak M A *et al.* 2002, preprint (astro-ph/0202258)
- 44 Bandyopadhyay R M, Brocksopp C, Fender R P. 2002, preprint (astro-ph/0207386)
- 45 Paredes J M, Marti J, Ribo M *et al.* *Science*, 2000, 288: 2340
- 46 Gies D R, Huang W, McSwain M V *et al.* 2002, preprint (astro-ph/0206253)
- 47 Zensus J A. *ARA&A*, 1997, 35: 607
- 48 Eikenberry S S, Matthews K, Morgan F H *et al.* *ApJ*, 2000, 532: L33
- 49 Rodriguez L F, Mirabel I F. *ApJ*, 1999, 511: 398
- 50 Paragi Z, Vermeulen R C, Jejes I *et al.* Workshop on Relativistic Jet Sources in the Galaxy, Paris, 1998
- 51 Muno M P, Remillard R A, Morgan E H *et al.* *ApJ*, 2001, 556: 515
- 52 Zhang S N, Mirabel I F, Harmopn B A *et al.* In: Williamburg V A ed. *Proc. of the 4th Compton Symposium*, 1997
- 53 Fender R P, Corbel S, Tzioumis T *et al.* *ApJ*, 1999, 519: L165

- 54 Fender R P, Kuulkers E. MNRAS, 2001, 324: 923
55 Belloni T, Klein-Wolt M, Mendez M et al. A&A, 2000, 355: 271
56 Revnivtsev M, Gilfanov M, Chruazov E et al. A&A, 2002, 391: 1013
57 Dubus G, Hameury J M, Lasota J P. A&A, 2001, 373: 251
58 Garcia M R et al. Am. Astron. Soc., 2000, 197: 118.04
59 Begelman M C. ApJ, 2002, 368: L97
60 Yu W, van der Klis M, Fender R. 2002, preprint (astro-ph/0207645)
61 Bandyopadhyay R M, Brocksopp C, Fender R P. 2002, preprint (astro-ph/0207386)
62 Naik S, Rao A R. A&A, 2000, 360: L25
63 Naik S, Agrawal P C, Rao A R et al. ApJ, 2001, 546: 1075
64 Meier D L. ApJ, 2001, 548: L9
65 Blandford R D, Payne D G. MNRAS, 1982, 199: 883

On Studies of Some Latest Results on Microquasar

Chen Yongjun

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

Some latest studies on microquasars are comprehensively reviewed. Microquasars with relativistic jets mimic, on a much smaller scale, many of the phenomena seen in quasars. The X-ray emission from these objects probes the inner accretion disk and immediate surroundings of the black hole. Along with observations at lower frequencies, a great progress has been made in research fields such as the dynamical model of accretion disk, the connection between accretion of matter onto black holes and the origin of relativistic jets as well as the superluminal motion of jets. New evidences on the existence of black holes are also found in microquasars. Their studies open the way for a better understanding of relativistic jets and accretion of matter onto black holes seen elsewhere in the universe .

Key words astrophysics—microquasar—review—black hole—accretion disk—jet