

星暴星系：研究进展和热点问题

孔 旭^{1,3} 程福臻^{1,2}

- (1. 中国科学技术大学天体物理中心 合肥 230026)
- (2. 中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)
- (3. 中国科学院 - 北京大学联合北京天体物理中心 北京 100871)

摘 要

星暴星系是一类内部正在发生极为剧烈恒星形成的天体。介绍了星暴星系的研究历史及星暴星系的定义。综述了从射电波段到 X 射线波段星暴星系的光度和光谱观测特征及其研究的最新进展。列出了星暴星系研究中存在的一些热点问题，包括星暴的触发机制、星暴时标、星族组分、恒星形成率、初始质量函数、内红化以及星暴星系与活动星系核之间的关系等。最后，简述了可能有助于解决这些问题的观测手段和理论方法。

关键词 星暴星系 — 内红化 — 初始质量函数 — 恒星形成率

分类号：P157

1 引 言

星暴星系 (Starburst galaxies, SBs) 是一类在较大范围内有剧烈恒星形成的天体。对它的研究，最早可追溯到 Guillermo Haro 的早期工作。1942 年，他利用 70cm Schmidt 望远镜寻找到一批具有强发射线且连续谱有明显紫外超的致密天体。20 世纪 70 年代和 80 年代初期，一些天文学家对几个特殊星系的详细研究，包括多波段观测和理论模型构造，最终导致“星暴”现象的发现和广泛的识别。Osmer、Smith 和 Weedman 在研究具有热斑核的 Sersic-Pastoriza 星系时发现，为了解释这类星系 $H\beta$ 光度，它们必须在很短的时间内形成大量的热星^[1]；Rieke 和 Low 在对 NGC 253 进行红外观测研究时发现，这个星系的质光比 (M/L) 很低，说明其内部正在形成大质量的恒星^[2]；高的恒星形成率和低的质光比不能在星系中长久维持，这就意味着恒星形成过程可能是短暂的、具有爆发的特征。早期的星族合成模型研究发现：UBV 颜色特别蓝的星系，其光谱可以用最近剧烈的恒星形成过程叠加于年老星族之上而给予很好的拟合和解释^[3]。1978 年，Larson 和 Tinsley 发现 Arp 星系 UBV 颜色可以用最近恒星形成的爆发给以很好解释，并把恒星形成的活动性与星系间的相互作用和吞并联系在一起^[4]。在前人工作的基础上，Weedman 等人在对 NGC 7714 的 X 射线、紫外、光学

和射电波段特性进行详细研究的基础上, 第一次明确提出了“星暴”概念, 并被广泛采用^[5]。1983年, IRAS(Infrared Astronomical Satellite) 卫星发射, 大量红外亮的星暴星系被发现, 使得对星暴星系的研究开始活跃。随后, 一些高红移星暴星系的发现, 使得星暴星系研究变得空前活跃^[6]。

因为星暴星系分布没有正常星系普遍, 也没有 AGN 那样极高的光度, 所以现在对星暴星系的研究还不够深入和全面; 另外, 星暴星系的形态、年龄分布较宽和多样性的存在, 使得对其进行严格定义比较困难。一般认为, 广义的星暴星系可分为星暴核星系 (SBNGs) 和 HII 星系 (HIIIs) 两类。本文述及的只是狭义的星暴星系, 即星暴核星系。它是一类有比其形态相同星系更蓝的亮核的天体, 其内部正进行剧烈的恒星形成, 其典型的恒星形成时标为 $10^7 \sim 10^8$ yr。在观测上表现为: (1) 红外光度较高, 一般远大于其光学波段的辐射强度; (2) 附近多有其它相邻星系; (3) 星暴核区的光度 (L_{SB}) 远大于星系其它部分光度之和 (L_G), 即 $L_{SB} \gg L_G$; (4) 光谱有强且窄的低电离发射线, $[OIII]/H\beta < 3$, 所有发射线的半峰全宽 $FWHM < 300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $EW_{H\alpha} > 100 \text{ \AA}$, 谱中 $[Fe VII]$ 或 $[Fe X]$ 等特征线很弱或不存在^[7~11]。

2 星暴星系的多波段特性

“星暴”现象在其被发现后的几十年中, 一直是众多天体物理学家研究的重要课题, 其中恒星形成最为剧烈的一类天体——星暴星系, 更是众多天体物理学家关注的热点。通过对星暴星系的观测, 人们发现它们的连续谱没有明显的光度变化 (有些 AGN 光变明显, 且连续谱和发射线的变化有相关性), 所以目前尚无针对星暴星系的多波段国际联测; 另外, 观测上也没有发现星暴星系有 γ 射线发射, 现在的观测主要集中在从射电到 X 射线之间的各独立波段以及对各波段观测资料进行的相关分析, 以期找到它们之间内在的物理联系^[12]。

光度观测发现: 星暴星系的红外辐射特别强, 它的红外光度约占其总光度的 99%, 可达 $10^{11} L_{\odot} \cdot \text{kpc}^{-2}$; 另外, 近红外 J、H、K 波段颜色很红, 这说明星暴星系内部可能存在大量的尘埃物质; 不同的星暴星系, 其红外发射区的尺度有较大变化, 有些星暴星系发射区的尺度大于 3kpc, 而有些却小于 60pc; 星暴星系核的形态也是多样的, 有些极为致密、有些呈延展态, 另外一些则表现为环状、瓣状或明显不对称的复杂形态^[13~15]。光学波段的光度观测发现, 星暴星系中心有一个极亮的蓝核, 有些星暴星系中还存在着一些亮的光学节点; 大多数星暴星系的转动曲线是正常和对称的, 转动速度约为 $50 \sim 300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 对星暴星系进行窄波段 $H\alpha$ 测光发现, 其典型的 $H\alpha$ 光度为 $10^{40} \sim 10^{42} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[9,13,16]。对星暴星系进行射电观测, 发现这类星系的射电发射区的物理尺寸约 $0.3 \sim 11 \text{ kpc}$, 同一星系中, 射电发射区在尺寸上要大于其光学发射区; 形态上多表现为中心有个亮点, 被四周弥散的辐射所环绕^[17]。X 射线波段的辐射光度相对较弱 ($\approx 10^{39} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$), 仅为远红外辐射光度的 0.008^[18]。

连续谱观测发现: 星暴星系的能谱在 $60 \sim 100 \mu\text{m}$ 附近有一个明显的峰, 它的主要成分可能是热的大质量恒星加热其周围尘埃的再辐射。星暴星系具有类似恒星的、蓝的光学和紫外连续谱。射电连续谱有热或非热两种成分, 热辐射成分为 H II 区的自由-自由辐射, 谱指数 $\alpha \leq 0.1$; 非热辐射成分以超新星产生的高能电子在星际磁场中同步辐射为主, 谱指数 $\alpha \approx 0.8$; 星暴星系的内区射电谱指数 $\alpha \approx 0.25$, 外区 $\alpha \approx 0.64$, 即远离星系中心, 射电谱变

陡, 非热辐射变得更为重要。星暴星系的 X 射线连续谱的统计研究发现, 它们的平均谱指数为 0.104, 能谱分布可用热韧致辐射或幂律谱拟合; 主要起源于大质量双星、超新星遗迹、星暴驱动的星风和相对论电子的康普顿散射^[7,9,17]。

谱线观测发现: 星暴星系紫外光谱中一般没有强的特征发射线; 但许多星暴星系紫外光谱中有宽的 Si IV($\lambda 1400$)、C IV($\lambda 1550$) 和弱的 Mg II($\lambda 2800$) 特征吸收线; 它们的蓝移速度约为 $500 \sim 1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 而这一蓝移速度恰好是 O、B 星协中发生质量外流的典型速度, 所以这些宽的特征吸收线被认为是星暴星系中存在大质量热星的最直接证据。光学谱中有强且窄的具有 H II 区特征的低电离发射线, 各种发射线比值和线宽与赛弗特星系和 LINER 的特征谱线有明显区别; 另外, 发射线的强度比随空间变化。有些星暴星系核区光谱中有高激发的特征发射线 ([OIII] $\lambda \lambda 4363, 5007$) 和一些特征吸收线 (Ca IIK $\lambda 3933$, Mg I+Mg H $\lambda 5156$); 有些星系谱中有宽的 He II $\lambda 4686$ 特征发射线存在, 说明这些星暴星系中有 WN 和 WR 星; 有些星暴星系光学谱中有年老恒星的强巴尔末吸收线和弱的恒星发射线, 说明其内部可能存在本底的年老星族^[9,19,20]。星暴星系的红外光谱中特征线极为丰富, 包括尘埃吸收线、恒星吸收带、H 和 He 的复合线、重元素特征线和分子发射线。

Lehnert 等人通过对 55 个星暴星系研究发现: $\text{H}\alpha$ 测光的有效半径 $r_{e,\text{H}\alpha} \approx 10^{3.15} \text{ pc}$, $\log(r_{e,\text{H}\alpha}/r_{e,R}) \approx -0.22$ ($r_{e,R}$ 为连续谱产生区的有效半径), 即发射线产生区域比连续谱产生区更为致密; 另外, $\text{H}\alpha$ 发射区的大小与星系绝对星等相关, 越亮的星系, $\text{H}\alpha$ 发射区越大; 同时, 远红外辐射和射电流量存在紧密的相关性, 前者比后者更为集中; 光学线发射区与恒星形成区也存在强的相关性; 热的红外辐射和光学线发射空间分布极为相似, 这些可能说明它们具有相同的能源: 正在形成的年轻大质量恒星。假设星暴星系质量分布是球对称的, 根据引力与离心力平衡, 由光学转动曲线给出的速度估计出星系的有效半径 r , 就可以给出星系动力学质量上限 M_T 。如果 $r \approx 10 \text{ kpc}$, 则 $M_T \approx 1.4 \times 10^{11} M_\odot$, 星暴核区质量 $M \approx 10^9 M_\odot$; 如果星系内物质分布是盘状, 则可以给出星系质量的下限, 约为上限的 80%^[13]。

在对暗蓝星系的研究中: 光学波段深度星系计数发现这类星系有较大的过剩; 而近红外 K 波段巡天时, 没有发现这种现象。B $\approx 24 \text{ mag}$ 红移巡天发现, 这类星系主要存在于 $z < 0.5$ 的本星系群, 少数暗蓝星系红移有可能大于 0.8。这类星系的颜色、强且窄的发射线、线比等都显示其内部在发生剧烈的恒星形成的爆发, 它们与星暴星系可能存在某种渊源关系^[11]。

为了研究星暴星系中的恒星成分和演化特性, Garcia-Vargas 等人发展了一种演化的星族合成方法, 该方法利用星系的图像和光谱, 结合 CLOUDY 光致电离程序, 能给出星暴星系恒星形成区的物理特性。它可能是研究星暴星系的一种好方法^[21]。

通过观测和理论分析, 目前我们对星暴星系的基本特性已有所了解, 一般认为星暴星系内部正在发生剧烈的恒星形成过程, 其中形成的大质量热的 O、B 星发出的紫外和光学光子以及 O、B 星晚期发生的超新星爆发是星暴星系中的主要能源; 它们直接或间接产生星暴星系的射电到 X 射线波段的辐射; 这类星系的红外光度极高, 有的星暴星系的红外光度甚至超过 AGN 的光学光度; 恒星形成发生区域尺度约为 kpc 量级^[22]。

3 热点问题

通过观测和理论模型的研究,人们对星暴星系的一些基本性质虽然有所了解,但是只能说是初步的,因为对于其内在本质和发生的物理过程还知之甚少。有些极为基本和重要的问题,现在还不能作出肯定的回答。

3.1 星暴的触发机制

星暴的触发机制是一个极为重要的问题。大量的气体是如何进入星系核区,并在极短的时标内形成大量的恒星?如此大规模剧烈的恒星形成过程是由什么原因引起?星暴星系是每一个星系演化进程中所必须经历的阶段,还是完全因为一些特殊的偶然原因引起的?许多观测和理论工作都在致力于这一研究。目前,理论模型主要有三种:随机模型,后续模型和触发模型。随机模型认为星暴星系中大量恒星形成是由于气体云的不稳定性引起的,如热不稳定性,磁不稳定性和引力不稳定性等;后续模型认为星暴星系中恒星形成起因于星系中已有恒星产生的星风或超新星爆发,使得星系中某些区域星际介质密度增大,导致恒星形成;触发模型认为星系间的相互作用是引起星系密度变化,导致剧烈恒星形成的原因^[23]。另外,棒的作用、星系碰撞和巨激波也是恒星形成的可能原因^[24]。

目前,讨论最多的机制是星暴星系由富气体的旋涡星系之间的潮汐相互作用所触发;比较星暴星系和低表面亮度(LSB)矮星系, Taylor 发现恒星形成剧烈的星暴星系有伴星系的几率是恒星形成极低的 LSB 矮星系几率的两倍,他认为这种差异的可能原因是星系间的相互作用触发了星系内恒星形成的爆发^[25]。有人指出任何星系之间的相互作用都会在星系核或核心附近触发强烈的恒星形成,但有些观测和统计结果并不支持这一结论。星暴星系的巡天发现,许多星暴星系根本没有观测到其伴星系的存在;同时,有一些非常密近的双星系尽管有相互作用迹象,但它们并不是星暴星系^[13,26]。尽管星系间的相互作用在触发星暴星系的恒星形成时可能起着重要的作用,但这种机制并不能解释所有星暴星系中恒星形成起因。所以,究竟是什么原因触发星暴星系中剧烈的恒星形成过程目前尚不清楚。也许以上几种机理在触发恒星形成时可能都起作用,但它们的贡献大小并不清楚。

3.2 星暴时标

星暴星系中,恒星形成事件持续时间的长短取决于其中气体耗尽时标, $\tau = M_{\text{gas}}/\dot{M}$ 。观测发现,对于中等强度的星暴星系,其 $L_{\text{IR}}/M_{\text{gas}} \approx 20$;对于极亮红外星系, $L_{\text{IR}}/M_{\text{gas}} \approx 200$ 。如果分子气体形成恒星满足关系: $\tau \approx 10^{10} M_{\text{gas}}/L_{\text{IR}} \text{ yr}$, 则对活动性极弱的星系, $\tau \approx 2 \times 10^9 \text{ yr}$;而对极亮的星暴星系,其 $\tau \approx 10^7 \text{ yr}$ 。另外,以上计算中, M_{gas} 是代表星系中气体总质量,对于中心恒星形成区,气体质量必然小于 M_{gas} ,这使得星暴时标更短(如果没有外部气体流入)。

因为气体流入恒星形成区的机理尚不清楚;星系内部气体总质量的准确确定比较困难,气体总质量包括原子组分和分子组分,现在的观测技术对确定分子气体的质量还无能为力^[27];同时,星系中可用于恒星形成的气体的多少与星系周围环境有关;另外,恒星形成过程可能会因为超星风作用而抑制,甚至会带走恒星形成区内的所有燃料,即星暴终结的原因也不唯一^[28]。正是因为存在以上困难和多样性,所以星暴星系中恒星形成时标尚不确定,现在对星暴时标的计算只是一种量级的估计,不同的工作给出的结果也有较大差距。

3.3 星族成分

星族定义为年龄、金属丰度和运动特性相同或相近的一些恒星的集合。星系的观测特性主要取决于其内部星族的特征和演化。为了解星系中的恒星形成过程、星际介质的能源以及星系的化学演化等问题,必须首先了解星系中的星族成分,但由于观测技术方面的原因,目前对星系中星族成分的了解还很少。即使对较简单的星系(例如矮星系),其中的星族成分仍没有清楚的了解。对星暴星系,问题将变得更为复杂。因为强的发射线不仅影响 U、B、V、I 颜色,还会影响光谱中吸收线的强度,使得研究星系核中星族的常用方法(如观测星系的颜色、吸收线强度、表面亮度、速度弥散以及星族合成技术等方法)变得不可靠。

有些星暴星系的紫外和光学谱中有年老恒星特征吸收线,说明它们内部可能存在超巨星和红巨星等年老的星族,表明这些星系有可能是年老的天体;但是星暴星系的辐射主要能源来自其内部最近形成的大量大质量热星的辐射,在某些情况下,其恒星形成率极高。如果星暴星系保持如此高的恒星形成率,它将在远小于哈勃时标内耗尽其内部气体成分,所以剧烈的恒星形成不允许星暴星系是年老的天体^[29]。另外,星暴现象是各种星系中恒星形成的唯一途径,还是仅为某些星系演化进程中的孤立事件?它是发生于原初星系中首次短时标,大规模的恒星形成的爆发,还是发生于缓慢演化的年老星系中的某一历史阶段^[30]?这些问题都在星暴星系研究中存在广泛争论。这些争论的存在,表明人们对星暴星系中的星族成分以及它们的分布仍不十分清楚。

3.4 恒星形成率

恒星形成率(SFR)定义为单位时间内演化为恒星的气体质量。在正常星系中,恒星形成是有序和缓慢的,SFR一般较低($\approx 1M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$);但对于星暴星系,因为其恒星形成时标较短,恒星形成效率较高,从而使得其内部恒星形成极为剧烈。根据 CNO 循环释放的能量,O、B、A 星消耗气体质量速率可表示为 $dM/dt = 7 \times 10^{-11} L/L_{\odot}$ (以 $M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 为单位),则对于中等亮度的星暴星系,其 $\text{SFR} \approx 3 \sim 30 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$;对于极亮红外星系,SFR 可能会超过 $1000 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。另外,星系的 SFR 一般与时间有关,对于不同类星系,SFR 可以选取不同的含时形式,一般分为瞬时暴、连续的恒星形成和指数下降等三种形式。对于星暴星系,因为其在较短时间内有大量恒星形成,所以人们很自然的设想其 SFR 为瞬时暴形式,但最近的星族合成结果表明,与观测结果符合最好的 SFR 形式为一定时间间隔内的连续的恒星形成。

尽管星暴星系中的 SFR 与正常星系内部的 SFR、以及星暴星系之间的 SFR 可能不同,但关于它的具体形式和大小,现在仍还不能确定。其原因有两个:(1) 观测上,SFR 可以用星系发射线、光度、连续谱和红外特性来示踪,但它们因受到某些不确定的因素影响,结果不一定可靠。例如,因为 $L_{\text{H}\alpha}$ 与大质量 O、B 星相关,能反映最近恒星形成情况,可以用它示踪星系的 SFR,但 $L_{\text{H}\alpha}$ 不仅受尘埃消光的影响,而且仅有少数的星暴星系的 $L_{\text{H}\alpha}$ 已知;又因为年轻大质量 OB 星加热尘埃产生星暴星系的远红外辐射,原则上可以用 L_{IR} 示踪星暴星系的 SFR,但这种方法也存在一些缺点,如年老星族对远红外的贡献未知^[7];(2) 理论计算方面,由于对星系中恒星形成的细节不了解,使得 SFR 的精确计算比较困难^[13]。最近,Barbaro 等人发展了一种谱光度模型,可能有助于该问题的解决^[31]。

3.5 初始质量函数

恒星初始质量函数(IMF)描述星系中同时形成的恒星的质量分布的函数关系,在研究星系演化及与恒星形成相关的星系特性时,初始质量函数是一个重要的输入参数。对于年老星

系, 大质量恒星已经演化到白矮星阶段, 难以观测, 小质量恒星因光度较低无法观测; 对于年轻星系, 它的 IMF 与光度关系取决于其内部恒星形成的历史 (初始爆, 间歇爆), 另外, 探测 IMF 质量下限需要深度的恒星计数, 这些在观测上都比较困难。许多理论工作都企图研究和确定星系的 IMF, 但都是基于引力破碎理论, 而该理论取决于几个理想假定是否正确^[32]。所以从理论和观测方面, 确定 IMF 都比较困难。

恒星的初始质量函数 (IMF) 的一般表达式为一个介于质量上下限 (M_{up} , M_{low}) 之间的幂律的函数式: $\Phi(m) = dN/dm \propto m^{-\alpha}$ 。处于本星系群内的有大量大质量恒星形成星系, 它们的 IMF 的幂指数 α 一般介于 2.0 ~ 2.5 之间^[33]; 但对星暴星系, 其初始质量函数形式的确定是个较为困难的问题, 它的 IMF 与金属丰度、质量上下限以及幂指数 α 有关系, IMF 依赖于不同的变量将会导致星系中迥异的恒星形成的历史, 那么 IMF 与哪个量关系最为密切? 目前尚没有一个广泛被认可的初始质量函数的普遍形式, 不同模型只能适用于某个星系或某个样本或只能与星暴星系的某些观测特征相符合。尽管越来越多的证据表明, 在 O、B 星协中 IMF 的形式与气体的金属丰度无关; 在有大量恒星形成的体系中, 幂指数 α 趋于 2.35^[34]; 但星暴星系 IMF 的质量上下限范围仍存在诸多的争论。首先, 大质量恒星 ($85 \sim 100M_{\odot}$) 普遍存在于银河系、麦哲仑星云和附近可分辨的星暴星系中, 这似乎意味着 IMF 的质量上限与环境无关; 但对较远的不可分辨的星暴星系进行红外观测研究, 通过比较观测谱与模型谱、分析 He/H 发射线比值等, 发现 IMF 质量上限不能大于 $30M_{\odot}$ ^[35]。因为星暴星系中主要的输出能源来自星暴时大质量恒星的热辐射, 质量极小的恒星无法直接观测, 所以 IMF 质量下限的确定将变得更为困难^[36]。另外, IMF 质量上下限确定取决于幂指数 α 和光度的内红化校正, 而对星暴星系, 内红化本身就是一个极为复杂的问题。高度的消光、星族成分不清楚以及恒星辐射与非恒星辐射成分的比值未知, 使得 IMF 确定变得更为困难。

3.6 星暴星系的尘埃及内红化

星际介质中的尘埃粒子不仅有助于分子的形成和转移星系内部气体中的重元素, 而且还吸收和散射星光 (消光作用)。因为尘埃对辐射的消光具有选择性, 所以它将改变光谱的能量分布, 使得星光通过它后会变红。因此, 在研究星暴星系的内部能源机制、光谱能量分布、物理条件和内部结构时, 必须校正星系内部尘埃红化对观测值的影响。对星暴星系这类谱中有发射线的河外天体, 其内红化值的大小, 通常由氢发射线比的观测值和理论值的差异计算得到。但计算氢发射线比的理论值时, 隐含了三个假定, 即存在 Case B 复合 (星云对 Lyman 线是光学厚的)、银河系消光曲线可适用、星系中尘埃均匀分布于核区周围。Case B 复合通常是比较普适的近似; 但银河系消光曲线仅适用于点状源, 对星暴星系这样的面状源将不适合; 另外, 尘埃均匀分布也不合理, Calzetti 等人的研究发现, 尘埃对星暴星系的恒星形成区的遮挡可以用成团状的尘埃分布来描述^[37,38]。星暴星系的红外光度极亮, 这就意味着其内部有大量尘埃存在, 而这些尘埃必将会影响星暴星系的观测特征。

目前, 关于星暴星系的统一的消光关系尚未建立。其困难不仅在于对星际介质中尘埃的物理、化学性质 (如化学组分、物理分布) 还不清楚; 而且延展的辐射流对尘埃的各种几何分布的敏感程度也几乎一无所知。对银河系内点状的恒星源, 其尘埃的消光特性可用介于恒星与观测者之间的尘埃屏的遮挡效应的模型给以解释。但对星暴星系这样的河外延展天体, 问题将变得复杂得多, 必须考虑尘埃形状是成团的还是均匀弥散的? 它们离能源产生区较远、较近、还是混合在一起? 同时, 还须考虑尘埃的再辐射问题^[39]。另外, 观测还发现: 在红外

波段,由发射线和连续谱计算得出的内红化值一致;但在紫外和光学波段,由发射线和连续谱计算得到的内红化值有较大的差异^[40]。这种差异产生的原因目前还不清楚。现在,主要通过构造各种模型来研究星暴星系的内红化,一个成功的尘埃分布模型,必须对以上特性给以很好解释。

3.7 AGN 与星暴星系的关系

星暴星系与 AGN 之间有无关系?这是一个存在激烈争论的问题。因为星暴星系都属于发光效率很高的活动星系,无需借助黑洞的吸积也可以复现 AGN 众多观测特征,所以人们提出能否用与星暴星系相关的物理过程来解释 AGN 的观测特性?即热星能否为窄线 AGN 提供电离能源?在 AGN 与星暴星系关系研究中,另一个重要问题是 AGN 核区周围是否存在恒星形成区?以及星暴星系与 AGN 之间是否存在演化关系^[41]?

Terlevich 等人发展了一种致密超新星遗迹的模型(cSNR)。他们认为星暴星系的演化可分为四个阶段:(1) 0~3Myr, 初始 HII 相, 所有恒星处于主序;(2) 3~4Myr, Warmers(极端的 WR 星, 温度可达到 10^5 K) 开始出现, 发射线谱将具有 Sy2 或 LINER 特征;(3) 4~8Myr, Warmers 和 O、B 星仍占主导, 但 Ib 型 SN 和红巨星开始出现;(4) 8~60Myr, cSNR 出现, 它被周围密度极高 ($n_{\text{csm}} > 10^6 \text{cm}^{-3}$) 的星际介质包围的超新星遗迹(SNR), 它的出现极为关键, 导致光谱变为 Sy1 的特征谱。同时, SNR 和星风将驱动星系中的分子物质, 形成尘埃环(torus), 它被认为是导致 Sy1 和 Sy2 差异的原因^[42]。这种星暴星系的 AGN 模型可以解释 AGN 的宽发射线区特性、连续谱和发射线变化的时延、QSO 光度函数、光谱的能量分布、射电发射和变化等;该模型的缺点是它不能解释射电强和射电弱 AGN 差异、UV 谱恒星吸收谱线、快的 X 射线变化以及宽的 Fe 线产生的原因^[43];该模型的优点是它的结论可以在 AGN 外部得到检验, 模型需要的参数较少, 仅需要一个参数: SNR 周围星际介质的密度(n_{csm})。标准的 AGN 理论模型是其中有一大质量的黑洞, 黑洞外围有一吸积盘, 在吸积盘和发射线产生区之外还存在一个尘埃环。该模型能对 AGN 的主要观测特性给予较好解释, 缺点是日前观测上没能给出黑洞存在的有力证据, 模型需要的参数较多^[44]。两种模型各有优、缺点, 星暴星系与 AGN 究竟有无关系? 这种关系是否普遍存在? 目前下定论可能还为时过早。

因为标准的 AGN 理论模型对 AGN 的某些特征, 例如宽线区云的形成和稳定问题、Sy2 星系的蓝的无特征连续谱和 Sy2 星系谱中 Ca II 三重线, 不能给予很好的解释, 而这些特征恰好可以用 AGN 核区周围存在恒星形成区给予解释。基于此, 人们提出了一种新的 AGN 理论模型, 即“星暴+黑洞”模型: 星暴活动与 AGN 活动共存, 在 AGN 的中心区黑洞仍然存在, 但 AGN 外边存在一个环状的恒星形成区, 这样可用星暴解释 AGN 的低能现象, 黑洞解释其高能现象。ISO 对极亮的 IRAS 源观测发现, 约有一半的源中可能同时存在活动核和星暴的作用^[45]; 观测表明, Sy2 星系周围存在星暴活动现象比 Sy1 星系更为普遍; Sy2 星系中星暴活动现象比星暴星系年老; 这些观测事实可能预示着一一种演化关系的存在, SB→Sy2→Sy1: 星暴星系演化后期, 随着气体的下落, 星暴星系逐渐演化为 Sy2 星系; 当星暴活动完全停止后, 星系中心形成了一个致密的星团, Sy2 演化为 Sy1。但该模型同样也存在一定的困难。这种演化关系是否存在, 还需进一步的研究。

除了以上问题以外, 星暴的能源机理、星暴星系中的超星风、Superbubble 以及喷流在星系能量交换中的作用、恒星形成区的物理参数、光致电离和激波对星暴星系发射线谱贡献

的大小以及星暴星系与其它矮活动星系之间的关系和演化序列等问题, 目前也未研究清楚, 有待于进一步深入研究。

4 未来的发展

关于星系形成和演化的研究, 是天体物理学中最具有吸引力的课题之一。近几年新的观测和理论都表明, 本世纪末和下世纪初, 在该领域将会取得重大的实质性进展; 星系的形成和演化问题, 也是下一代大型天文望远镜的探索目标。星暴星系因为其中剧烈的恒星形成和大量气体的存在, 它的光度和谱线都很强, 使得红移很大的星暴星系也可以清楚地被观测到, 所以它是研究星系形成和演化问题的极好候选者。另外, 相对于经典 AGN, 星暴星系的研究较少, 对它的进一步研究, 必然会得到大批有用信息, 从而有可能构造出星暴星系的完整图像。同时, 由上述分析可知, 星暴星系中还存在诸多有待解决的问题, 为了解决这些问题, 应该从理论和观测两方面着手。

观测上, 一批大型新技术望远镜的使用, 将在今后几年为星暴星系研究提供极好的机会。因为星暴星系中有大量尘埃的存在, 使得以前利用光学谱线分类星暴星系和其它类发射线星系时, 将受到内红化影响。红外波段受消光影响远小于光学波段, 所以利用红外波段的两种特征谱线的强度比的两维图 (例如 $[\text{FeII}](\lambda 1.64\mu\text{m})/\text{Br}\gamma(\lambda 2.166\mu\text{m})$ vs. $\text{H}2(\lambda 2.12\mu\text{m})/\text{Br}\gamma(\lambda 2.166\mu\text{m})$) 将会使得发射线星系分类更精确。另外, 红外波段光谱中有大量原子和分子谱线, 对它们进行观测, 将会得到星暴星系内物质更为详细的信息。ISO 等红外光谱望远镜将会有助于这些方面的研究。传统方法多是利用复合线 (主要为 $\text{H}\alpha$) 确定星系中的 SFR。如果星暴星系的红外光度起源于大质量恒星, 那么利用红外光度确定 SFR 将更为精确, 但因为 IRAS 空间分辨率有限, 使得其观测的很多星系红外光度包括盘和中心区的贡献, 而盘中可能存在其它红外源, 所以这些数据不足以确定星暴星系中心区的 SFR。更高空间分辨率的仪器将有助于恒星形成区 SFR 的确定。另外, HST 将会在确定星暴星系的 IMF 质量下限 (M_{low})、尘埃分布、星暴与 AGN 的异同等研究中起重要作用; 另一种途径是引入相干观测的方法, 系统研究星系的恒星形成区和其周围气体的形态、运动学、动力学关系以及恒星形成区与星系内各处气体的相关性, 进一步研究星暴星系的触发机制; 同时, 更大更完备的样本有助于检验统计结果, 进一步了解各波段发射线和连续谱产生机制及相互关系^[46]。

理论方面, 数学方法 (小波分析、非线性、分形)、计算能力、物理思想的丰富和发展, 多种精细复杂的理论模型的提出, 也给出了各种数值模拟的结果。它们与观测结果的比较, 必将有助于对星暴星系研究的进一步深入。另外, 星族合成也是研究星暴星系的重要方法, 近几十年中, 由于观测技术的长足发展和合成算法的不断改进, 星族合成方法也日趋完善, 发展了从实验到理论演化的多种星族合成方法^[47]。利用星团谱样本的星族合成方法, 分析星暴星系光谱, 合成结果不仅给出了星暴星系中年龄和金属丰度不同的星族成分; 同时它的结果也能帮助我们了解星系中恒星形成历史、能源机制、内红化等; 另外, 利用其结果, 可以扣除恒星成分对发射线的影响, 进一步研究发射线区的物理和化学特性。另一种星族合成方法是演化的星族合成方法, 在近几年发展极为迅速。该方法只要输入 IMF 和 SFR, 就能计算星系中不同时刻形成的恒星数。它能给出大量的有用信息, 如星系内的星族分布、气体质量组

分和金属丰度、星系的绝对星等、宽波段积分颜色、质光比等。随着观测技术的进步, IMF 和 SFR 将会被精确确定, 这种方法运用于星暴星系研究, 必将有助于星暴星系内红化、恒星形成率、初始质量函数、星族成分、恒星形成时标等问题的解决。

参 考 文 献

- 1 Osmer P S, Smith M G, Weedman D W. *Ap. J.*, 1974, 192: 279
- 2 Rieke G H, Low F J. *Ap. J.*, 1975, 197: 17
- 3 Huchra J P. *Ap. J.*, 1977, 217: 928
- 4 Larson R B, Tinsley B M. *Ap. J.*, 1978, 219: 46
- 5 Weedman D M, Feldman F R, Balzano V A *et al.* *Ap. J.*, 1981, 248: 105
- 6 Coziol R, Carlos A O T, Germano R *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1998, 119: 239
- 7 Rephaeli Y, Gruber D, Persic M. *Astron. Astrophys.*, 1995, 300: 91
- 8 Coziol R. *Astron. Astrophys.*, 1996, 309: 345
- 9 Gonzalez-Delgado R M, Perez E, Diaz A I *et al.* *Ap. J.*, 1995, 439: 604
- 10 Vaceli M.S, Viegas S.M, Gruenwald R *et al.* *A. J.*, 1997, 114: 1345
- 11 Terlevich R. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 1997, 6: 1
- 12 Sun w-h. In: Filippenko A V ed. *Relationships between AGN and SBs*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1992. 14
- 13 Lehnert M D, Heckman T M. *Ap. J.*, 1996, 472: 546
- 14 Smith D A, Herter T, Haynes M P *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1996, 104: 217
- 15 Telesco C M, Dressel L L, Wolstencroft R D. *Ap. J.*, 1993, 414: 120
- 16 Ho C L, Filippenko A V, Sargent W L W. *Ap. J.*, 1997, 487: 579
- 17 Stine P C. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1992, 81: 49
- 18 Ceca R D, Griffiths R E, Heckman T M. *Ap. J.*, 1997, 485: 581
- 19 Smith D A, Herter T, Haynes M P *et al.* *Ap. J.*, 1995, 439: 623
- 20 Bernlohr K. *Astron. Astrophys.*, 1993, 268: 25
- 21 Garcia-Vargas M L, Gonzalze-Delgado R M, Perez E *et al.* *Ap. J.*, 1997, 478: 112
- 22 邹振隆. 见: 李启斌等人编. *能源的希望*. 北京: 科学出版社, 1997, 155
- 23 Magnier E A, Prins S, Augusteijn T *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 326: 442
- 24 Terlevich E. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 1997, 6: 243
- 25 Taylor C L. *Ap. J.*, 1997, 480: 524
- 26 Planesas P, Colina L, Perez-Olea D. *Astron. Astrophys.*, 1997, 325: 81
- 27 Chini R, Krugel E, Lemke R *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1995, 295: 317
- 28 Beck S C, Turner J L, Ho P T *et al.* *Ap. J.*, 1996, 457: 610
- 29 Vacca W D. *Ap. J.*, 1994, 421: 140
- 30 Thuan T X. In: Leitherer C *et al.* eds. *Massive Stars in Starbursts*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. 183
- 31 Barbar G, Poggianti B M. *Astron. Astrophys.*, 1997, 324: 490
- 32 Padoan P, Nordlund A, Jones B J K. *M.N.R.A.S.*, 1997, 288: 145
- 33 Leither C, Heckman T M. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1995, 96: 9
- 34 Stasinska G, Leitherer C. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1996, 107: 661
- 35 Massey P, Lang C C, De Gioia-Eastwood K *et al.* *Ap. J.*, 1995, 438: 188
- 36 Satyapal S *et al.* *Ap. J.*, 1995, 448: 611
- 37 Petersen L, Gammelguard P. *Astron. Astrophys.*, 1997, 323: 697
- 38 Calzetti D, Kinney A L, Storchi-Bergmann T. *Ap. J.*, 1996, 458: 132
- 39 Calzetti D. *A. J.*, 1997, 113: 162
- 40 Calzetti D, Kineey A L, Stochi-Bergmann T. *Ap. J.*, 1994, 429: 582
- 41 Moorwood A F M. *Space Sci. Rev.*, 1996, 77: 303

- 42 Terlevich R. In: Filippenko A V ed. Relationships between AGN and SBs. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1992. 133
- 43 Cid Fernandes R. Rev. Mex. Astron. Astrofis., 1997, 6: 201
- 44 Aretxaga I, Cid Fernandes R, Terlevich R. M.N.R.A.S., 1997, 286: 271
- 45 Genzel R, Lutz D, Sturm E et al. Ap. J., 1998, 498: 579
- 46 Garnett D R. Rev. Mex. Astron. Astrofis., 1995, 3: 141
- 47 孔旭, 薛随建, 程福臻. 天文学进展, 1997, 15: 254

Recent Developments and Several Interesting Problems of Starburst Galaxies

Kong Xu^{1,3} Cheng Fuzhen^{1,2}

(1. Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(3. Beijing Astrophysics Center (BAC), Beijing 100871)

Abstract

Starburst galaxies are those in which star formation occurs at a much higher rate than the mean rate in a typical galactic time-scale. In this review, the study history and the definition of starburst galaxies are introduced first. Then, we briefly summarize the photometric and spectral observation properties (from radio to X-ray), and the latest progress of starburst galaxies. We list several interesting problems in starburst galaxies study, including the trigger mechanisms, the star formation time-scale, the stellar population, the initial mass function (IMF), the interstellar reddening of starburst galaxies and the connection between starburst galaxies and active galaxy nuclei (AGN). Finally, some potential observation and theoretical methods to solve these problems are presented.

Key words starburst galaxies—interstellar reddening—initial mass function—star formation rate