

文章编号: 1000-8349(2011)01-0060-11

E+A 星系的研究进展

李金荣¹, 林宣滨^{1,2}, 潘治政¹, 孔 旭^{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 星系宇宙学重点实验室, 合肥 230026)

摘要: E+A 星系的光谱具有很强的巴耳末吸收线, 缺乏与恒星形成相关的发射线, 将典型的椭圆星系 (E) 和 A 型恒星的光谱进行线性组合就能够拟合出这类星系的光谱。它们的颜色、形态、星族年龄等参数介于典型的早型和晚型星系之间。E+A 星系近期经历了星暴活动, 在星系演化进程中, 它们处于晚型到早型的过渡阶段, 可能在演变过程中扮演着重要角色。介绍了 E+A 星系的基本观测特征, 并讨论了它们的形成机制、演化去向、所处的环境以及它们与 AGN 的关系。

关键词: 星系形成; 星系演化; 星暴星系; 星系合并; 星系环境

中图分类号: P157.9 **文献标识码:** A

1 引 言

星系的形成和演化是天体物理研究中最热门的领域之一。正常星系总体上可以分为两大类: 晚型星系富含冷气体和尘埃, 拥有活跃的恒星形成活动, 形态为旋涡状或不规则, 颜色偏蓝, 光谱上有很强的发射线; 早型星系则缺乏气体和尘埃, 恒星形成活动较弱或无最近的恒星形成, 形态上表现为椭球形, 光度分布平滑, 颜色偏红, 光谱上有很多吸收线/带, 很少有发射线特征。恒星形成活动在星系演化过程中扮演着重要角色, 有些富含气体和尘埃的普通晚型星系遇到触发剧烈恒星形成活动的事件时, 大量冷气体被快速耗尽, 然后可能转变为宁静的早型星系。但是, 具体的演化过程受到多种内、外因素的影响, 于是出现了多种多样的处于过渡状态的星系, 这类星系在观测上具有早、晚型星系的复合特征: 如被动演化的旋涡星系^[1-4], 发射线早型星系^[5, 6]和 E+A 星系^[7-9]等。

1983 年, Dressler 和 Gunn 在研究红移 $z \approx 0.5$ 的星系团 3C 295 时, 发现三个成员星系的颜色比椭圆星系稍蓝, 光谱具有很强的巴耳末吸收线, 几乎没有发射线特征。他们对这些光谱进行拟合时, 发现使用年老星族 (椭圆星系 (E), 或 K 型恒星) 的光谱加上 A 型恒星的光谱就可以较好地拟合出来^[7]。因此, 从光谱拟合的角度, 这类星系被称为 E+A 星系或

收稿日期: 2010-06-02; 修回日期: 2010-07-23

资助项目: 国家自然科学基金项目 (10633020, 10873012); 科技部 973 项目 (2007CB815404); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

K+A 星系。1987 年, Couch 和 Sharples 研究了 $z \approx 0.3$ 的三个富星系团, 他们也发现了这样的光谱, 分析恒星形成历史, 将其解释为星暴之后的星系, 并指出星暴发生在 1~15 亿年之前^[10]。从恒星形成历史的角度, 这类星系又被称为星暴后星系 (Post-Starburst Galaxies)。上述 E+A 星系都是在星系团中发现的, 直到 1991 年, Oegerle 等人意外地发现一个非常明亮的、不在星系团中的低红移 ($z \approx 0.1$) E+A 星系。该星系有明显的潮汐尾巴, 这意味着它可能是星系之间并合的产物^[11]。至此, 不同红移、不同环境中都发现了 E+A 星系。然而, 观测结果显示, 这类星系的数目很少, 在全体星系中所占的比例很低。所以, 要深入研究 E+A 星系自身的物理特性、环境的影响以及与其他类别星系的演化关系等问题, 需要大的星系样本、高质量的图像和光谱数据。

近年来开展的大规模光谱巡天, 为开展 E+A 星系的统计研究提供了可能。Zabludoff 等人用 LCRS (Las Campanas Redshift Survey) 数据研究了 21 个近邻 E+A 星系的环境^[8]; Blake 等人利用南半球的 2dFGRS (2-degree Field Galaxy Redshift Survey) 统计了 56 个 E+A 星系的形态、环境和光度函数等^[16]; Goto 等人使用 SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 光谱库建立了目前最大的 E+A 星系样本 (DR5 中选出 564 个 E+A 星系), 分别研究了它们的环境、起源、颜色轮廓和元素丰度等^[9, 12-15]; Yan 等人使用 SDSS 和 DEEP2 对比研究了不同红移处的环境对 E+A 星系的影响^[17, 18]。

另外, 哈勃空间望远镜以及地面大口径望远镜拍摄的高分辨率图像能够让我们进一步认识 E+A 星系形态轮廓、光度分布^[19, 20]、径向颜色梯度和二维颜色分布^[13, 21]等信息。长缝光谱仪和全局光谱仪的应用, 能够让我们更深入地研究 E+A 星系中“星暴后”特征的分布范围, 如星族的空间分布、年龄梯度、金属度分布和运动学等特征, 从而更详细地理解这类天体的物理特性^[21-25, 27, 28]。在这些详尽的观测数据之外, 数值模拟也是分析、理解 E+A 星系的形成机制和演化过程的一条有效途径^[29, 30]。

2 观测特征

早期受限于仪器的观测能力, 只能对 E+A 星系进行总体特征的观测, 了解其形态、颜色、星族成分等简单信息。随着观测能力的提高, 逐步可以观测星系的二维特性, 分析星系中星族、颜色的空间分布, 估算星系的运动学参数等诸多信息。

2.1 基本信息

E+A 星系最显著的特征是, 它们的光谱具有很强的巴耳末吸收线, 与恒星形成相关的发射线没有或很弱。图 1 显示了三条从 SDSS DR7 中选取的 E+A 星系的光谱。前一特征说明它们近期 ($\lesssim 1$ Ga) 经历过星暴活动, O、B 型恒星的演化刚刚结束, 当前的主导星族成分是 A 型恒星; 后一特征则表示它们当前几乎完全终止了恒星形成活动^[8, 9, 16, 31], 中性氢的观测也支持这一结果^[32, 33]。A 型恒星的寿命大约 10 亿年, 与之相应, 星系处于 E+A 阶段的时间也只能有短暂的 10 亿年, 所以 E+A 星系在全体星系中所占比例会很小。大样本统计研究表明, 它们在近邻星系中的比例为 0.1% ~ 0.2%^[8, 9, 15-17]; 高红移星系中比例稍高, $z \approx 1$ 时达

到 2%^[17]。这一比例的具体数值受到光谱分辨率、谱线测量方法、E+A 星系选取的判据以及被统计样本的选取等诸多因素的影响,不同工作给出的结果会有较大差异。

利用哈勃空间望远镜的高分辨率图像结合地面凯克望远镜的光谱,Tran 等人选出两个中等红移 ($0.3 \lesssim z \lesssim 1$) 的 E+A 星系样本,研究发现:场环境中它们的比例是星系团环境中的四分之一;星系团中它们的形态一般是盘成分主导的,但各种哈勃型都存在;场环境中,它们的形态主要由核球主导,且多数 ($\approx 80\%$) 不规则^[34, 35]。Blake 等人的 2dF 星系红移巡天大样本统计结果和 Balogh 等人的近红外 K 波段研究结果也都表明, E+A 星系主要是核球主导系统^[16, 36]。以上形态特征说明, E+A 星系可能处于盘主导的晚型星系到核球占绝对优势的早型星系这一演化路途中的过渡状态。在星系的“颜色-星等”图上,早型星系集中在红色区域且颜色范围很窄,通常称为红序列;晚型星系主要分布在蓝色区域但颜色范围相对弥散,一般称为蓝云;红序列和蓝云之间的区域被称为绿色峡谷,大量的 E+A 星系正好分布在这个峡谷区域^[17]。从颜色特征来看, E+A 星系介于典型的早型星系和晚型星系之间,也说明它们是星系从蓝云到红序列演化进程中的一条可能的纽带。

2.2 二维信息

近年来,天文观测仪器的性能不断提高,全局光谱和高分辨率图像在天体物理研究中得到广泛应用,二维信息让我们对星系的认识更加深入和全面。

光谱方面,使用长缝光谱仪, Franx 等人首次测量了星系团 Abell 665 中一个 E+A 星系的运动学参数,发现这个星系的转动速度达到 $v = 180 \text{ km/s}$, 中心速度弥散度 $\sigma = 150 \text{ km/s}$, 说明运动学上这个星系属于盘主导的系统^[22]。随后, Norton 等人研究 LCRS 样本的 20 个 E+A 星系中星族的运动学参数和空间分布特征,发现 18 个星系的转动速度小于速度弥散度, $v/\sigma < 1$, 星族的空间分布表明年轻星族比年老星族更聚集于星系中心,但年轻星族的分布不局限在星系核区 ($r \lesssim 1 \text{ kpc}$)^[23]。通过全局光谱仪器, Pracy 等人对 2dF 中 10 个样本的测量发现,年轻星族仍然存在明显的转动特征,年轻星族在星系中心几个 kpc 范围内均匀分布^[21]。Goto 等人多次使用以上两类光谱仪观测,结果表明 E+A 星系中的年轻星族可以分布在整个星系范围内,但中心区域的恒星巴耳末吸收线更强,年轻星族随半径的分布表现出正的年龄梯度^[25-27]。

测光方面, Bartholomew 等人从富星系团 Cl 1358+62 中得到 70 个具有光谱和图像信息的早型星系,其中 24 个为 E+A 星系,其余 46 个作为控制样本。利用 HST 图像数据进行表面测光,进而比较这两个样本中星系颜色的径向分布趋势。结果发现, E+A 星系的颜色从外到内,一般是越来越蓝,即颜色梯度为正值;而控制样本的颜色梯度大多为负值或不明显^[37]。Yamauchi 等人利用 SDSS DR2 数据,使用更为严格的判据选出 22 个 E+A 星系,他们也发现大多数 E+A 星系有正的颜色梯度,还发现了颜色梯度和颜色、D4000 的关系:颜色更蓝、D4000 更小的星系拥有更陡的径向颜色梯度, D4000 较大的星系颜色梯度平缓^[13]。Bekki 等人的数值模拟也得到正的颜色梯度^[29]。然而, Pracy 测量 2dF 中 10 个 E+A 星系的颜色梯度,却发现三个样本具有明显的负梯度^[21]。所以, E+A 星系的颜色梯度还需要更大样本数据进行进一步的系统研究。

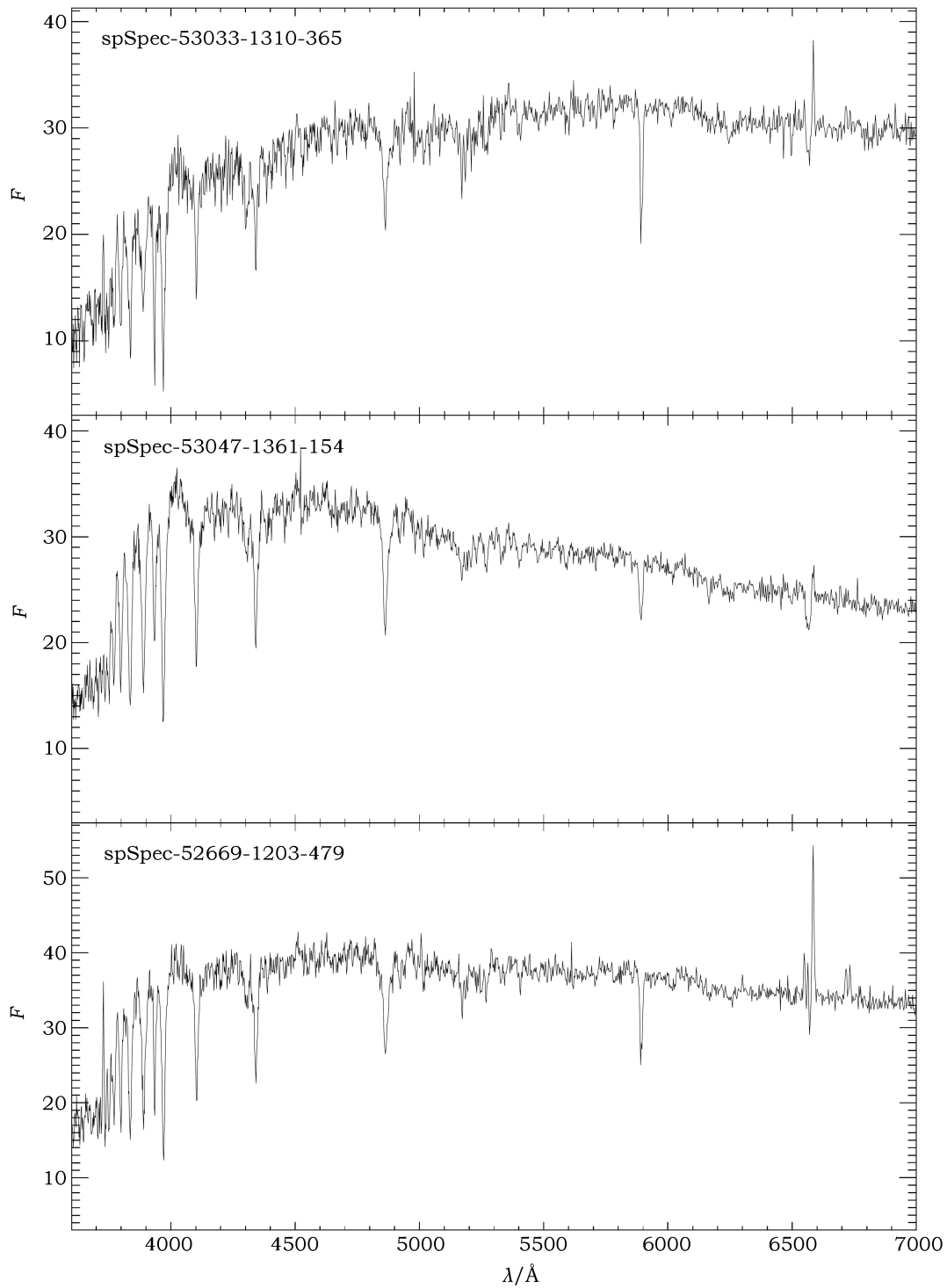


图 1 SDSS DR7 数据库中选取的三条 E+A 星系光谱

在这些光谱上, 不存在显著的 $H\alpha$ 发射线, 而 A 型恒星的巴耳末吸收特征非常显著; 年老星族的 Ca II K、Ca II H、Mg b、Fe 5270、Fe 5335 等吸收线也很明显。

3 形成与演化

在了解 E+A 星系的基本特征之后, 本节将进一步分析 E+A 星系要经历怎样的演化过程, 涉及哪些物理机制, 演变过程的主导因素是内因还是外部环境, 与其他天体有何联系等问题。

3.1 形成机制

关于 E+A 星系的形成机制, 目前主要有两类观点。一类观点认为 E+A 星系的形成与星系团紧密相关, 团中高密度热气体的冲压剥离作用终止了星暴星系中的恒星形成活动, 从而产生具有 E+A 特征的光谱; 另一类观点认为 E+A 星系是星系之间发生并合和相互作用之后的产物, 与星系团无关。

由于 E+A 星系首先是在星系团 3C 295 中发现的, 它们的数目又极其稀少, 并且早期的观测设备还不能进行大规模的星系光谱巡天观测, 所以, 20 世纪八九十年代, E+A 星系一般都是在星系团中被发现的^[1, 7, 10, 38-41], 它们的形成原因常被考虑为与星系团相关的作用机制。X 射线观测已经证实, 星系团里存在高温高密度的星系际介质, 团里的漩涡星系与这些介质相互作用产生冲压效应, 星系盘里的冷气体被快速剥离, 恒星形成活动随之而止, 但熄火之前可能会有小型的星暴活动。团内的介质密度越大, 星系与介质的相对速度越高, 冲压作用就越强, 所以星系团的内区更容易发生气体剥离事件, 这种效应也直接影响团内星系的形态演化^[30]。

Fisher 等人对星系团 Cl 1358+62 中的 232 个成员星系进行了光谱普查, 发现星系团中发射线星系和吸收线星系的分布存在明显的分层效应, 从外部的半径 $r \approx 1.7$ Mpc 到内部的 $r < 0.7$ Mpc 区域, 吸收线星系的分布比例从约 59% 增加到约 84%。这种分布说明星系团中的星系中存在演化现象, 外围的发射线星系在进入团中心的过程中, 一部分演化为吸收线星系, 该过程中一些成员星系与团内介质发生相互作用就有可能出现 E+A 星系^[40]。Dressler 等人研究了 10 个中等红移星系团中 424 个成员星系的光谱信息, 也发现不同光谱型的星系在团的径向分布上存在明显的空间分层效应, 发射线星系在外, 年老星系在内, E+A 星系的位置介于两者之间。Dressler 等人还发现, 发射线星系和年老星系在团中的相对速度弥散度 $\sigma_{em}/\sigma_{old} = 1.40 \pm 0.16$, E+A 星系的速度弥散度也介于这两类之间^[38]。Ma 等人研究了 X 射线很亮的富星系团 MACS J0717.5+3745 中各类星系的分布, 563 个成员中有 17 个 E+A 星系, 其中 16 个位于冲压剥离半径之内, 直接证明了冲压剥离是星系团中结束恒星形成活动, 形成 E+A 星系的主要机制^[42]。可见, 星系团中高温介质的冲压剥离作用可能是形成 E+A 星系的一种重要机制。

然而, 除了在星系团中被发现, 很多 E+A 星系是场星系, 这些 E+A 星系显然和星系团中的高温介质无关, 星系团中高温介质的冲压剥离不再是导致这些星系中恒星形成停止的原因。Liu 等人分析了近邻的 40 个正在并合或者发生强相互作用的星系光谱, 发现很多并合星系的光谱是由巴耳末吸收线主导的, 与 E+A 谱型相似, 说明这些并合星系和 E+A 星系可能是同一类天体^[43]。Falkenberg 等人通过模型分析, 认为富含气体的星系之间相互并合会

触发剧烈的星暴事件, 活动时标为 $\tau \approx 1 \sim 4$ 亿年, 之后并合体将演变为一个“星暴后”星系^[30]。Yang 等人使用高分辨率的 HST 图像数据, 研究了 Zabludoff 等人从 LCRS 星系巡天数据中选取的 21 个 E+A 星系, 发现至少有 11 个 (55%) 在形态上有明显的受过扰动的特征; 还发现一对双 E+A 系统, 两个星系都拖着潮汐尾巴^[8, 20]。Goto 等人利用 SDSS 数据, 选出 266 个 E+A 星系, 发现它们几乎都有一个致密的亮核, 其中的 30% 在形态上有受过扰动的特征或存在潮汐尾巴; 且 E+A 星系拥有伴星系的几率比控制样本高出 54%^[12, 44]。最近的其他观测也显示, 很多非星系团中的 E+A 星系都有并合或者相互作用的特征^[21, 45, 46], 可见, 星系之间的并合和相互作用也是形成 E+A 星系的一种重要机制。

星系之间的并合又可分为主并合 (major merger, 质量相近的星系并合) 和小并合 (minor merger, 质量悬殊的两星系并合)。Bekki 等人通过数值模拟发现, 主并合产生的 E+A 星系多为椭圆型, 内区的 A 型恒星比例很高, 在径向上具有正的颜色梯度 (中心蓝) 和负的巴耳末吸收梯度, 动力学性质会因为并合时的轨道参数而表现出差异。小并合产生的 E+A 星系为 E/S0 型, 也具有正的颜色梯度和负的巴耳末吸收梯度, 但整体转动速度大于速度弥散度, $v/\sigma > 1$ 。星系相互交会时, 强烈的潮汐作用能够产生 SB0 型 E+A 星系, 但交会时需要特殊的轨道位形^[29]。Tran 等人指出, 星系团之外的 E+A 星系, 形态大多不规则, 大部分仍然残存有重要的盘成分 ($B/T \lesssim 0.5$), 所以小并合在团外 E+A 星系的形成过程中可能更普遍, 因为主并合会使星系盘被完全破坏^[35]。Pracy 等人测量了 10 个 E+A 星系的运动学特征, 发现所有样本都有重要的转动成分, 说明等质量并合不是形成 E+A 星系的主要渠道^[21]。Chilingarian 等人用欧洲南方天文台的甚大望远镜拍摄了一个 E+A 星系的全局光谱, 发现它的转动速度 $v \approx 300$ km/s。如果它形成于星系并合事件, 最可能的方式就是主星系与一个富含气体的卫星星系发生小并合^[28]。

综合分析上述文献中的结果可以看出, 两类机制都对 E+A 星系的形成有所贡献, 星系数密度高的环境中通过第一类机制来形成, 而星系数密度非常低的环境中则以第二种机制产生。

3.2 演化去向

星系在演化过程中遇到强烈而短暂的星暴事件之后, 年轻星族的比例显著增加, 最年轻的 O、B 型恒星很快终结之后, 就进入 A 型星特征最明显的 E+A 阶段, 停留在这一阶段的时标约为 A 型恒星的主序寿命: 10 亿年左右。即“E+A”可能是某些星系从一种状态演化到另一种状态时显现出来的一种过渡形式。Yan 等人发现, E+A 星系在红移 $z \approx 0.1$ 和 $z \approx 0.8$ 的时候, 在“颜色-星等”图上都位于红、蓝星系之间的绿色峡谷区域^[17]。Helmholtz 等人统计各类星系的质量分布, 发现 E+A 星系的质量低于典型的早型星系而高于典型的恒星形成星系^[49]。Dressler 还指出, 位于星系团中的 E+A 星系, 速度弥散度和位置分布也都介于发射线星系和被动演化的星系之间^[38]。此外, E+A 星系的星族年龄也在早、晚型星系之间。以上观测数据说明, E+A 星系可能是早、晚型星系之间演变的一种过渡天体。

E+A 星系的多项观测参数处在早、晚型星系之间已经说明它们可能处在过渡状态, 更多的观测数据更是将它们最终归宿指向了宁静的、无恒星形成的椭圆星系。Yang 等人利用哈勃空间望远镜的高分辨率图像, 详细分析了 21 个 E+A 星系的形态参数, 发现它们的核

球光度占星系总光度的比例 B/T 的中值为 0.59, Sersic 指数 $n \gtrsim 4$, 聚集度指数 $C \gtrsim 4.3$, 不对称度指数 $A \gtrsim 0.04$, 11 个样本具有显著的潮汐特征, 这些参数说明, 相对低面亮度的潮汐扰动特征逐渐暗淡下去之后, E+A 星系在形态上就演化为早型星系了^[20]。Yamauchi 和 Goto 发现, 随着巴耳末吸收线强度的减弱, E+A 星系的颜色梯度由正变平, 进而变负 (即星系中心逐渐由蓝变红), 而二维颜色分布也由不规则逐渐变得平滑起来^[13], 由此可以推测, 进一步演化, 就可能成为平滑的红色椭圆星系。Quintero 等人从星系的“颜色-面亮度”分布图上, 发现 E+A 星系的分布区域接近早型星系, 只是面亮度稍高, E+A 星系中心的年轻星族逐渐老化之后就会走向早型星系^[47]。Goto 发现 E+A 星系的 α -元素丰度高于具有相近巴耳末吸收强度的恒星形成星系, 而非非常接近椭圆星系, 从化学演化方面也说明 E+A 星系可能是椭圆星系的前体之一^[14]。Norton 等人测量了 20 个 E+A 星系的运动学参数, 发现 18 个星系内部的速度弥散度大于星系的整体转动速度, 属于压强支撑的核球主导系统, 这说明 E+A 星系的运动学状态也接近早型星系^[23]。在 2dF 星系红移巡天样本中, Blake 还发现亮 E+A 星系的光度函数与椭圆星系的光度函数一致^[16]。综上所述, 对于今天看到的众多椭圆星系, E+A 星系可能是它们的前体之一。

3.3 环境与红移

虽然高密度的富星系团和低密度的场环境中都发现了 E+A 星系, 但是由于 E+A 星系只占有所有星系的很小比例, 所以研究 E+A 星系的各种物理性质以及形成与演化和环境的关系, 需要足够大的星系光谱样本。受限于大规模光谱观测的困难, 以前在这方面的研究较少。

利用 LCRS 星系光谱巡天数据, Zabludoff 等人首次研究了 E+A 星系的环境, 发现近邻 E+A 星系中的大部分 ($\approx 75\%$) 位于星系团和富星系群之外, E+A 星系多位于贫星系群中^[8]。Blake 等人利用 2dF 星系红移巡天数据, 选出 56 个 E+A 星系, 也发现低红移 E+A 星系主要分布在场环境中, 并特别指出, 近 50% 的 E+A 星系是孤立天体^[16]。利用 SDSS 数据, 不同的工作组研究了 E+A 星系的环境问题, 发现 E+A 星系的典型环境是星系数密度较低的区域, 它们的周围星系密度分布与场星系的分布相似, 而与团星系的分布差别很大, 说明星系团尺度和宇宙大尺度相关的物理机制对 E+A 星系没有重要影响^[12, 36, 47]。

除了观测和研究近邻 E+A 星系的环境, 天文学家们已经开始研究更高红移的 E+A 星系环境。Lin 等人使用 DEEP2 数据库, 研究了星系之间发生干并合 (dry merger, 贫气体星系相互并合)、湿并合 (wet merger, 富气体星系相互并合) 和混合型并合 (mixed merger, 贫、富气体星系相互并合) 的环境, 发现湿并合在各类环境中都发生, 而干并合仅仅在高密度区域是有效的; E+A 星系的环境与湿并合或者湿+混合型并合的环境非常相似^[18]。Yan 等人使用 DEEP2 和 SDSS 数据, 对比研究了不同红移处 E+A 星系的环境。他们发现: $z \approx 0$, E+A 星系与蓝色星系的环境分布在统计上难以区分, 与红色星系的差异很大; $z \approx 1$, E+A 星系的环境分布更接近红色星系的。可见, E+A 星系在低红移处主要位于相对稀疏的环境, 而高红移处主要位于相对密集的环境中^[17]。

虽然大样本统计结果显示, 高密度区域不是 E+A 星系的典型环境, 然而高密度区域中依然存在一部分 E+A 星系。统计不同星系团/群中 E+A 星系的比例, Poggianti 等人发现它们主要分布在星系团和发射线成员很少的星系群中, 并且质量越大的星系团中 E+A 星系的

出现几率越高^[31]。De Lucia 等人分析了两个 $z \approx 0.5$ 的星系团中各成员星系的光谱, 发现吸收线成员为主的星系团 Cl 1232 中有 6 个 E+A 星系, 而发射线为主的星系团 Cl 1138 中没有 E+A 星系^[50]。所以对处于星系团/群中的 E+A 星系的环境研究, 现在还比较少, 没有一个统一的结论, 需要利用更大样本数据开展系统的研究和分析。

3.4 恒星形成停止的机制

Di Matteo 等人研究了星系碰撞期间的物理过程, 发现并合诱发的气体内流除了产生星暴之外, 还点燃了超大质量黑洞生成类星体, 而类星体释放的巨额能量反过来又驱赶气体, 抑制黑洞的进一步增长和快速结束恒星形成活动^[51]。既然 AGN 的反馈作用能够抑制星暴活动, 而 E+A 星系正好是星暴活动刚刚结束的星系, 那么 E+A 星系的形成过程是否与 AGN 有关?

观测发现, 很多 E+A 星系中存在微弱的 AGN 活动特征。Yan 等人发现大部分 E+A 星系的 [O II] 发射线仍然显著, 并且在 BPT 诊断图上位于 Seyfert 和 LINER 区域, 这说明 E+A 星系中存在微弱的 AGN 活动^[52-54]。Yang 观测了 LCRS 样本中 5 个 E+A 星系的长缝光谱, 发现其中 4 个都显示出明亮的蓝核, 它们在 BPT 诊断图上处在右翼的 LINER 区域^[19]。Chilingarian 等人使用欧洲南方天文台的全局光谱仪观测了一个近邻的 E+A 星系, 也发现它具有 LINER 光谱特征^[28]。Liu 等人分析了非常明亮的 E+A 星系 G515 的多波段观测数据, 结果显示 G515 过去可能是一个极亮红外星系, 现在是拥有尘埃遮蔽且活动较弱的 AGN^[55]。星系团中的 E+A 星系一般处于内区, Miller 等人发现 AGN 在星系团中也主要位于早型星系为主的团心区域^[56, 57]。

从 E+A 星系中还遗留着微弱的 AGN 特征可以猜测, AGN 的反馈作用对 E+A 星系中恒星形成活动的终止可能具有重要贡献。Tremonti 等人在 14 个 $z \approx 0.6$ 的 E+A 星系光谱中, 发现其中 10 个星系的 Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803$ 吸收线相对于背景的恒星光谱, 普遍蓝移了 $500 \sim 2000$ km/s, 说明这 10 个星系中存在正在外流的气体, 外流气体的速度介于星暴星系和宽吸收线类星体的速度之间。由此可以推断, AGN 的反馈在驱逐冷气体进而快速终结恒星形成活动的过程中确实扮演了重要角色^[58]。

除了 AGN 的反馈可以抑制星系中的恒星形成之外, 超新星导致的外流也可以抑制星系中的恒星形成。为了研究 AGN 的反馈作用对星暴活动的抑制效率, Kaviraj 等人使用近紫外和光学波段数据, 以星暴时标与星系动力学时标的比值为参数, 定量研究了抑制效率与 E+A 星系中恒星质量的关系。结果发现, 以 $10^{10} M_{\odot}$ 为界, 高质量 E+A 星系过去的星暴抑制效率与星系质量正相关, 而低质量星系中则是反相关的。对于近邻星系, 质量 $M > 10^{10} M_{\odot}$ 的星系中 AGN 的比例开始明显增加, 这里出现的抑制效率双峰行为可以解释为: AGN 的反馈过程是抑制 $M > 10^{10} M_{\odot}$ 星系的主要原因; 超新星反馈是抑制小质量星系中恒星形成的主要原因^[59]。因此, 可能至少存在两种机制抑制星暴活动, AGN 反馈在 $M > 10^{10} M_{\odot}$ 的大质量星系中发挥作用, 而超新星反馈可能在小质量星系中对抑制恒星形成更为重要。

4 总结与展望

E+A 星系的研究开始于 Dressler 和 Gunn^[7]，其光谱具有很强的巴耳末吸收特征，但缺乏恒星形成相关的发射线。E+A 星系的形态一般由核球主导，颜色比椭圆星系稍蓝，径向具有正的颜色梯度。大量研究表明，E+A 星系主要是通过星系之间的并合形成的，但是星系团中高温高密度介质的冲压剥离作用也对它们的形成有所贡献。近邻的 E+A 星系主要分布在星系数密度相对较低的环境中，而高红移的 E+A 星系分布在相对密集的环境中。AGN 的反馈在结束星暴活动的过程中可能发挥过重要作用，但这只对大质量星系有效；而小质量星系中星暴的结束可能是超新星反馈导致的。E+A 星系的基本物理参数大多介于早、晚型星系之间或接近早型星系，说明它们最终将可能会演化为椭圆星系。另外，发射线早型星系和被动演化的旋涡星系也都具有早、晚型星系的复合特征，揭开 E+A 星系的演化经历也将有助于理解这两类星系的演化过程。所以，研究 E+A 星系的物理过程对深入理解星系演化具有重要意义。

E+A 星系都是通过它们的光谱特征选出来的。遗憾的是，它们的发射线非常微弱，很容易与噪声相混，所以光谱质量对 E+A 星系样本的选取至关重要。不同望远镜拍摄的光谱分辨率和波长覆盖范围存在差异，不同研究人员采取的谱线测量方法、采用的判别参数以及参数阈值也不一致，这些因素导致不同文章中研究的“E+A”星系样本并不完全相同。事实上，不同方法选出的样本甚至会产生很大的差异，最终使得不同研究结果之间难以进行准确的比较。遵循 E+A 星系近期发生过星暴现象和现在星暴活动已经停止这两条原则，结合星族合成方法，找出简洁且物理意义明确的判据，并利用 SDSS-BOSS 项目、WiggleZ、z-COSMOS 和我国未来 LAMSOT 深场巡天等巡天项目获得的海量光谱数据，我们可以选取既合理又完备的 E+A 星系样本。使用这些样本，可以系统研究 E+A 星系的物理特性、星系特性与环境的关系，详细分析星暴阶段星系物理参数的演化过程，还可以横向比较它们与被动演化的旋涡星系和低吸积率 AGN 的寄主星系等其他过渡类型天体的特性。这对于理解 E+A 星系在星系演化整体过程中的作用，揭开各类星系详细的演化历程都有重要的科学意义^[60]。

参考文献:

- [1] Poggianti B, Smail I, Dressler A, et al. *ApJ*, 1999, 518: 576
- [2] Goto T, Okamura S, Sekiguchi M, et al. *PASJ*, 2003, 55: 757
- [3] Ishigaki M, Goto T, Matsuhara H. *MNRAS*, 2007, 382: 270
- [4] Masters K, Mosleh M, Romer A, et al. *MNRAS*, 2010, accepted, arXiv0910.4113
- [5] Fukugita M, Nakamura O, Turner E, et al. *ApJ*, 2004, 601: 127
- [6] Schawinski K, Lintott C, Thomas D, et al. *MNRAS*, 2009, 396: 818
- [7] Dressler A, Gunn J. *ApJ*, 1983, 270: 7
- [8] Zabludoff A, Zaritsky D, Lin H, et al. *ApJ*, 1996, 466: 104
- [9] Goto T, Nichol R, Okamura S, et al. *PASJ*, 2003, 55: 771
- [10] Couch W, Sharples R. *MNRAS*, 1987, 229:423
- [11] Oegerle W, Hill J, Hoessel J. *ApJ*, 1991, 381: 9

-
- [12] Goto T. MNRAS, 2005, 357: 937
- [13] Yamauchi C, Goto T. MNRAS, 2005, 359: 1557
- [14] Goto T. MNRAS, 2007, 377: 1222
- [15] Goto T. MNRAS, 2007, 381: 187
- [16] Blake C, Pracy M, Couch W, et al. MNRAS, 2004, 355: 713
- [17] Yan R, Newan J, Faber S, et al. MNRAS, 2009, 398: 735
- [18] Lin L, Cooper M, Jian H, et al. 2010, arxiv:1001.4560
- [19] Yang Y, Tremonti C, Zabludoff A, et al. ApJ, 2006, 646: 33
- [20] Yang Y, Zabludoff A, Zaritsky D, et al. ApJ, 2008, 688: 945
- [21] Pracy M, Kuntshner H, Couch W, et al. MNRAS, 2009, 396: 1349
- [22] Franx M. ApJ, 1993, 407: 5
- [23] Norton S, Gebhardt K, Zabludoff A, et al. ApJ, 2001, 557: 150
- [24] Pracy M, Couch W, Blake C, et al. MNRAS, 2005, 359: 1421
- [25] Yagi M, Goto T, Hattori T. ApJ, 2006, 642: 152
- [26] Goto T, Kawai A, Shimono A, et al. MNRAS, 2008, 386: 1355
- [27] Goto T, Yagi M, Yamauchi C. MNRAS, 2008, 391: 700
- [28] Chilingarian I, Rijcke S, Buyle P. ApJ, 2009, 697: 111
- [29] Bekki K, Couch W, Shioya Y, et al. MNRAS, 2005, 359: 949
- [30] Falkenberg M, kotulla R, Fritze U. MNRAS, 2009, 397: 1940
- [31] Poggianti B, Aragon-Aslanmanca A, Zaritsky D, et al. ApJ, 2009, 693: 112
- [32] Goto T. A&A, 2004, 427: 125
- [33] Buyle P, De Rijcke S, Dejonghe H. ApJ, 2008, 684: 17
- [34] Tran K, Franx M, Illingworth G, et al. ApJ, 2003, 599: 865
- [35] Tran K, Franx M, Illingworth G, et al. ApJ, 2004, 609: 683
- [36] Balogh M, Miller C, Nichol R, et al. MNRAS, 2005, 360: 587
- [37] Bartholomew L, Rose J, Gaba A, et al. ApJ, 2001, 122: 2913
- [38] Dressler A, Smail I, Poggianti B, et al. ApJS, 1999, 122: 51
- [39] Belloni P, Bruzual A, Thimm G, et al. A&A, 1995, 297: 61
- [40] Fisher D, Fabricant D, Franx M, et al. ApJ, 1998, 498: 195
- [41] Caldwell N, Rose J, Dendy K. ApJ, 1999, 117: 140
- [42] Ma C, Ebeling H, Donovan D, et al. ApJ, 2008, 684: 160
- [43] Liu C, Kennicutt R. ApJ, 1995, 450: 547
- [44] Yamauchi C, Yagi M, Goto T. MNRAS, 2008, 390: 383
- [45] Brown M, Moustakas J, Caldwell N, et al. ApJ, 2009, 703: 150
- [46] Maybhate A, Goudfrooij P, Schweizer F, et al. ApJ, 2009, 137: 383
- [47] Quintero A, Hogg D, Blanton M, et al. ApJ, 2004, 602: 190
- [48] Choi Y, Goto T, Yoon S. MNRAS, 2009, 395: 637
- [49] Helmboldt J, Walterbos R, Goto T. MNRAS, 2008, 387: 1537
- [50] De Lucia G, Poggianti B, Halliday C, et al. MNRAS, 2009, 400: 68
- [51] Matteo T, Springel V, Hemquist L. Nature, 2005, 433: 604
- [52] Baldwin J, Phillips M, Terlevich R. PASP, 1981, 93: 5 (BPT)
- [53] Kauffmann G, Heckman T, Tremonti C, et al. MNRAS, 2003, 346: 1055
- [54] Yan R, Newan J, Faber S, et al. ApJ, 2006, 648: 281
- [55] Liu C, Hooper E, O'neil K, et al. ApJ, 2007, 658: 249
- [56] Miller N, Owen F. ApJ, 2002, 124: 2453
- [57] Ho L. ARA&A, 2008, 46: 475
- [58] Tremonti C, Moustakas J, Diamond-Stanic A. ApJ, 2007, 663: 77
- [59] Kaviraj S, Kirkby A, Silk J, et al. MNRAS, 2007, 382: 960
- [60] Li J-R, Kong X, Lin X-B, et al. ApJ, 2010, in preparation

Research Progress on E+A (Post-Starburst) Galaxies

LI Jin-rong¹, LIN Xuan-bin^{1,2}, Pan Zhi-zheng¹, KONG Xu^{1,2}

(1. Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, USTC, CAS, Hefei 230026, China)

Abstract: The most typical characteristics of E+A galaxies are that their spectra show strong Balmer absorption lines but no significant emission lines associated with ongoing star formation. The spectra can be roughly fitted by a combination of an old elliptical galaxy (E) and a young A-type star spectrum, so named E+A galaxies. The existence of strong Balmer absorption lines indicates that E+A galaxies have undergone starburst activities, and the shortage of emission lines implies that they have quenched their star formation recently. Therefore, E+A galaxies are also interpreted as post-starburst galaxies.

On the evolutionary path of some galaxies from gas-rich, star-forming, disk-dominated blue ones into gas-poor, quiescent, bulge-dominated red ones, E+A galaxies, which are in the intermediate phase, play an important role in our understanding of galaxy formation and evolution. E+A galaxies originate mainly from merging/interaction in low density regions, especially wet merging between gas-rich galaxies, but a few cluster-related physical mechanisms also play some role, such as ram pressure stripping star-forming gas by high-temperature and high-density intracluster media. Many physical parameters of E+A galaxies are between typical early-type and late type galaxies, or close to early-type, which suggest they will eventually evolve into elliptical galaxies. Although poor groups and field environment are preferred by E+A galaxies to reside in, a fraction of them located in rich groups and clusters whose members are almost early-type galaxies. Feedback from AGNs may be responsible for quenching star formation on the path of forming E+A galaxies. Spectral features of LINER/Seyferts and observational evidences for feedback from AGNs are indeed found in many E+A galaxies recently. However, this mechanism does not work in less massive galaxies.

This paper presents the basic observational characteristics of E+A galaxies, and reviews their formation mechanism, evolutionary destination, environment and the connections with AGNs. Some problems are reviewed, .ie. the method for picking out homogeneous E+A galaxies, the connections between E+A and other transition galaxies, the detailed histories of star formation at the very starburst and post-starburst stages.

Key words: galaxies formation; galaxies evolution; starburst galaxies; galaxies merging; galaxies environment