

星系团及团内成员星系的研究进展(II)*

潘容士 赵君亮

(中国科学院上海天文台)

刘汝良

(中国科学院紫金山天文台)

提 要

本文介绍了有关星系团X射线性质的近期进展,内容包括星系团的X射线观测及理论研究, 远距星系团的研究以及星系团中的冷流等。

河外X射线源中有许多是星系团,其X射线研究不仅对团本身,而且对X射线天文学的发展都有着十分重要的意义。本文将分两个阶段来介绍星系团X射线性质的研究。第一阶段是1986年以前, Einstein天文台已发射,对观测结果进行了充分详细的研究并取得了丰硕的成果。Sarazin对此作了很详尽的评述。第二阶段以第一阶段作为背景材料,介绍从1986年至今的一些研究工作。

I. 1986年以前^(1,2)

一、X射线观测

1. 检测和证认 观测表明许多星系团表现为河外X射线源,总光度为 $10^{43-45}\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。星系团X射线源是展源,范围在200—3000kpc之间,它的谱与通常的致密源不同,没有低能光学吸收现象。它的X射线辐射没有时变。

2. 光度和光度函数 X射线光度在 L_x 到 L_x+dL_x 之间的归一化星系团的数目定义为光度函数 $f(L_x)dL_x$ 。光度函数的导出有两种方法,一是从光学完备的统计样本中检测X射线星系团,一是从完备的X射线源表中来找光学对应的团。它的形式有指数律和幂律两种:

$$f(L_x) = A_0 h_{50}^2 \exp(-L_x/L_{x0}) (10^{44}\text{erg}\cdot\text{s}^{-1})^{-1}\text{Mpc}^{-3}$$

$$f(L_x) = A_p h_{50}^2 \left[\frac{L_x}{10^{44} h_{50}^2 \text{erg}\cdot\text{s}^{-1}} \right]^{-p} (10^{44}\text{erg}\cdot\text{s}^{-1})^{-1}\text{Mpc}^{-3}$$

其中 A_0 和 A_p 为归一化常数, L_{x0} 和 p 为拟合参数。所有光度测量的能量范围为2—10keV。

1991年11月15日收到。

*国家自然科学基金资助项目。

观测表明, 两种形式的光度函数与数据拟合得都很好。

3. X 射线谱 团 X 射线谱的观测是确定团辐射机制的根本依据。

(1) 连续谱

(i) 如果团 X 射线辐射是由于弥漫(热或非热)等离子体产生的, 则气体为光薄物质。另一方面, 致密源(如星系核或 X 射线双星)由于常常包含大量相对较冷的中性气体, 它们通过光致电离吸收软 X 射线, 而轻元素的荧光辐射效率较低, 使被吸收的软 X 射线不再辐射出来。因此, 软 X 射线受到较强的吸收。两者是不同的。一般在假定元素丰度与太阳大气相同的情况下, 用氢的柱密度 N_H 作为量度吸收程度的参数。对典型的致密源有 $N_H \gtrsim 10^{22} \text{cm}^{-2}$ 。团的 X 射线谱表明它们的低能吸收很弱, $N_H < 10^{22} \text{cm}^{-2}$ 。这表明团的 X 射线辐射可能来自弥漫等离子体。

(ii) 1978—1979 年间从 OSO-8 及 Ariel 5 得到的谱, 首次表明了团 X 射线谱可用 $2 \times 10^7 - 2 \times 10^8 \text{K}$ 的热致辐射较好地拟合。

(iii) 从辐射连续谱很容易得到的两个参数是气体温度 T_e 及辐射积分

$$EI = \int n_p n_e dV$$

n_p 为质子密度, n_e 为电子密度, V 是团内气体体积。团的 X 射线光度正比于 EI , 且与温度强相关, 这从后面给出的热致辐射公式可明显看出。

目前的证据表明, 许多 X 射线团(X-ray cluster)可能有几个温度分量, 这种现象在低光度团中更为显著, 而且不同温度气体在位置上有所不同。这可能是: (a) 在低光度团中 X 射线辐射往往是不均匀的, 某些情况下单个星系的辐射贡献较明显; (b) 一些团中在 cD 星系或中心主导星系位置上 X 射线表面亮度有较大的增强, X 射线谱观测表明在团中心存在冷却中的气体向中心区吸积的现象。

(2) 线谱——7keV 铁线

X 射线团最重要的观测结果之一是高度电离铁谱线的发现, 到 1984 年为止, 大约 30 个团中发现了电离铁谱线。

检测到的谱线实际上是铁离子(主要为 Fe^{24+} 及 Fe^{25+}) 及镍离子弱线的混合。它们的光子能量在 6.5—7keV 之间, 简称为 7keV 线。这些线的分离及相对强度测量能提供大量有关 X 射线辐射气体的环境和物理状态的信息。

HEAO-1, A-2 卫星的观测使得从 Fe^{24+} 的 K_α 线和 K_β 线分离开来, 这些观测证明了辐射的热性质。

线强度通常由等值宽度 EW 给出:

$$EW \equiv \int \left| \frac{I_\nu - I_\nu^0}{I_\nu^0} \right| d(h\nu)$$

I_ν 是总强度, I_ν^0 是连续谱背景强度。利用 EW 可在已知气体温度 T_e 情况下测量气体中铁的丰度。观测得到的结果为 $\text{Fe}/\text{H} \sim 2 \times 10^{-5}$, 大致为太阳丰度的一半, 这个比值对各种光度的 X 射线团相差不大, 这表明了在这些团中气体有相同的起源, 而与团的动力学状态无关。

强的 7keV 线与团的非热辐射起源是不相容的。它的丰度接近太阳丰度, 说明这些气

体大部分是经历了恒星中的核过程后被抛射出来的，因为目前已知宇宙中重元素形成的唯一机制是恒星的核反应。下面我们将会提到团中气体的质量与发光物质的质量几乎相当，而气体的起源至少部分与星系中的恒星有关，这说明气体的起源与星系的形成和演化强烈相关，从而使星系的形成和演化理论变得更为复杂。

原则上 7keV 铁线可用来测定团的红移。虽然目前由于 Einstein 天文台测量能量范围为 0.5—4keV，不能检测硬 X 射线。因此它对高红移团的谱测量是不灵敏的。但这一点对将来的 X 射线研究具有十分重要的意义。

除了 7keV 铁线外 Einstein 天文台的固态光谱仪(SSS)已检测到一些团 X 射线谱中的 Mg、Si 和 S 的 K 线，以及 Fe 的 L 线。由于 SSS 视场很小，而且主要观测团的中心，这意味着这些团中心存在着较冷的气体。

4. X射线的团内空间分布

(1) X 射线的团内分布及质量 许多物理上自洽的流体静力学模型被用来拟合观测到的 X 射线分布，这些计算得出的团中气体质量与观测所要求的基本相符。估计 X 射线气体质量大致与团中所有星系发光物质质量相当，平均为团的位力质量的 10%。这些模型中目前应用得最广泛的是流体静力学等温模型^[3]。在这个模型中气体和星系都假定是等温的，束缚于团中且处于平衡态。假定星系与气体两者速度弥散度平方之比为

$$\beta \equiv \frac{\mu m_p \sigma_r^2}{k T_g}$$

这里 μ 为平均分子权(mean molecular weight, 用原子质量单位 amu 量度), m_p 为质子质量, σ_r 为星系径向速度弥散度, T_g 为气体温度。因此气体和星系密度之间有关系 $\rho_g \propto \rho_{st}^{\beta}$ 。如果星系分布采用等温球 King 模型:

$$n(r) = n_0 [1 + (r/r_c)^2]^{-3/2}, \quad \sigma(b) = \sigma_0 [1 + (b/r_c)^2]^{-1}$$

则 X 射线表面亮度 $I_x(b)$ 为

$$I_x(b) \propto \left[1 + \left(\frac{b}{r_c} \right)^2 \right]^{-3\beta + 1/2}$$

式中 b 为投影距离, r_c 为星系团核半径。由于团中气体质量正比于 $\int n_p dV$, 则从上式得出的气体密度及分布尺度很容易求出气体的质量。Jones 和 Forman^[3]用这一模型拟合了 46 个团, 发现其中 2/3 符合得很好, 1/3 在核心部分有过量的辐射, 这或许可由核心部分的冷流来说明。

(2) 团的 X 射线像和形态分类 Forman 和 Jones^[4]根据团的光学性质和 X 射线形态的联系, 提出了一种二维 X 射线团的形态分类法(见下表)。它已被大部分团 X 射线性质的研究者所采用。除此之外还发现了一些表面亮度分布有双峰的 X 射线团, 在大部分这些团中星系数密度分布也是双峰的, 它们可能是从不规则团向规则团演化的中间阶段。在星系形成的 N 体模拟过程中, 双峰分布的中间阶段也是常出现的, 但存在时间较短, 一般估计双峰团应占总数的 10% 左右, 与观测大致相符。

在不规则团和双峰团中, 气体分布和星系分布相关, 气体可能处在与团的引力势相平衡的流体静力学状态。团的引力势又主要由暗物质所决定, 因此气体与星系分布的相关性可能说

表 1 X射线团的二维形态分类法

	中心无X射线主导星系(nXD)	中心有X射线主导星系(XD)
不规则 (早期)	$L_x \leq 10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 冷气体, $T_g = 1-4 \text{keV}$ 在许多星系周围有X射线辐射 不规则X射线分布 旋臂星系比例高(>40%) 中心区星系密度低 典型团 A1567	$L_x \leq 10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 冷气体, $T_g = 1-4 \text{keV}$ 中心星系有X射线晕 不规则X射线分布 旋臂星系比例高 中心区星系密度低 典型团 Virgo/M87
规则 (已演化)	$L_x \geq 10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 热气体, $T_g \geq 6 \text{keV}$ 无冷流 光滑X射线分布 旋臂星系比例低($\leq 20\%$) 中心区星系密度高 典型团 Coma	$L_x \geq 3 \cdot 10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 热气体, $T_g \geq 6 \text{keV}$ 中心星系处有冷流 致密光滑X射线分布 旋臂星系比例低($\leq 20\%$) 中心区星系密度高 典型团 Perseus

明了星系和暗物质在团中有相同的分布。

5. 团的X射线性质和光学性质的相关性

这里我们主要考虑团的光学性质与团的X射线总光度的经验关系

(1) L_x 与 σ_r (Quintana 和 Meluick)^[5]

$$L_x(2-10 \text{keV}) \simeq 4.2 \times 10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \left[\frac{\sigma_r}{1000 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}} \right]^4$$

(2) L_x 与团的富度 在某种意义上 L_x 和团的富度分别表征了团中气体和星系的质量, 它们之间应有一定关系。Abramopoulos 和 Ku^[6]发现团的低能X射线光度随富度的1.2次幂而增加。

(3) L_x 和团的形态 一般说来规则团有较高的光度, XD比nXD有更高的光度。

(4) L_x 与 \bar{N}_0 (团中心区星系的投影密度) Abramopoulos 和 Ku^[6]于1983年发现了 $L_x \propto (\bar{N}_0)^{3.5}$ 。

(5) L_x 与星系成分 Bahcall^[7]提出

$$f_{s,p} \simeq 0.37 - 0.26 \ln \left[\frac{L_x}{10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}} \right]$$

式中 $f_{s,p}$ 是团内旋臂星系在星系总数中所占的比例。

(6) 一个非常重要的关系是由X射线谱决定的气体温度 T_g 与星系的速度弥散度 σ_r 之间的相关性。如果气体是引力束缚于团中, 它与星系处于同样的团势阱中, 则 $T_g \propto \sigma_r^2$, 但观测尚未得出明确结论, 需要进一步研究。

6. 贫困的X射线性质 在大部分包含cD和D星系的贫困中都发现了X射线辐射, $L_x \sim 10^{42-44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_g \simeq 1-5 \text{keV}$ 。X射线明显地集中在cD星系的位置上。在中心部分, 气体冷却时标一般估计小于团的年龄, 这可能说明像其他富团一样贫cD团也有一个向中心的冷吸积流, 吸积率估计为 $20-100 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 。另外, 包括头尾射电源的贫困也发现有X射线辐射。

7. 高红移团($Z \geq 0.2$)和X射线团的演化

直到 1985 年为止, 高红移团及高红移 X 射线团的样本是比较小的, 研究结果大体上表明直到 $Z \sim 0.5$, 团的 X 射线性质没有非常显著的演化效应, 这方面的工作极为重要但又极其困难。我们将会看到, 从 1986 年至今这一领域的研究工作虽经巨大努力但仍进展不大。

二、X 射线辐射理论

1. 辐射机制 目前已确认团 X 射线辐射机制为团中气体的热韧致辐射, 它可以很好地说明观测到的团的 X 射线性质。团中弥漫气体的温度 $T \sim 10^8 \text{K}$, 原子密度 $n \sim 10^{-3} \text{cm}^{-3}$ 。在这样条件下主要由氢组成的气体的辐射机制为热韧致辐射。一个电荷为 Z 的离子的辐射率为:

$$e_{\nu}^{i-f} = \frac{2^5 \pi e^6}{3 m_e c^3} \left[\frac{2\pi}{3 m_e k} \right] Z^2 n_o n_i g_{ff}(E, T_g, \nu) T_g^{-1/2} \exp(h\nu/kT_g)$$

这里 n_i 、 n_o 为离子及电子密度, T_g 为气体温度, g_{ff} 为冈特因子。上式显然为指数谱形式, 它与观测符合得很好。

气体可能产生于团中星系或自团外流入。如果它们与星系一样被束缚于团的势阱中, 并达到平衡, 则气体的单位质量能量应与星系的单位质量能量相当。即

$$\frac{kT_g}{\mu m_p} \sim \sigma_r^2$$

μ 为平均分子权, m_p 为质子质量, σ_r 是星系径向速度弥散度。如气体温度大于此值, 气体因不能束缚于团而逃逸。因此上式给出了气体温度的一个估值。

$$T_g \sim 7 \times 10^7 \text{K} \left[\frac{\sigma_r}{1000 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}} \right]^2$$

反之, 若气体温度由上式给出, 又假定气体在团的势阱中处于流体平衡, 则它们的空间分布应和星系的空间分布相类似。无论气体来自星系或从外流入, 气体质量将随团总质量的增加而增加。于是, X 射线光度将随位力质量增加而增加。这可以说明 $L_X \sim \sigma_r^4$ 及 L_X 与其他光学性质之间的关系。

2. 团中气体的加热和冷却

(1) 冷却 在 $T_g \geq 3 \times 10^7 \text{K}$ 时主要冷却是由上节讨论的弥漫气体热韧致辐射引起的。 $T_g < 3 \times 10^7 \text{K}$ 时, 线辐射冷却变得很重要。

通常定义冷却时标为 $t_{\text{cool}} = (d \ln T_g / dt)^{-1}$ 对团中气体, 大部分团可应用热韧致辐射的冷却率来估计。如果气体为等压冷却, 则

$$t_{\text{cool}} = 8.5 \times 10^{10} \text{yr} \left[\frac{n_p}{10^{-3} \text{cm}^{-3}} \right]^{-1} \left[\frac{T_g}{10^8 \text{K}} \right]^{1/2}$$

一般它长于团的 Hubble 时标。在这种情况下, 冷却过程是不重要的。但在某些团的中心 $t_{\text{cool}} < t_H$, 因此可能存在冷流。

(2) 加热 在考虑团中气体来源时, 不论采用何种假设都应考虑加热机制以使它们能达到观测温度。

目前考虑气体来源的途径不外乎两条,即来自团外或来自团内星系,对前一种途径可能的加热机制有下落和压缩加热。对后一种途径可能的加热机制为星系喷出气体本身的喷射能及气体随星系运动所具有的动能。其他的加热机制还有星系运动摩擦加热及相对论性电子加热。后两种加热机制由于它们的局域性,产生的效应要小得多。

3. 输运过程——团中气体之间能量、动量和元素的重新分布。关于这一问题我们主要讨论平均自由程和平衡时标。无磁场等离子体中电子和离子的平均自由程由库仑碰撞决定。假定离子为质子,且 $T_e = T_i = T_g$, 则平均自由程为

$$\lambda_e = \lambda_i \sim 23 \text{kpc} \left[\frac{T_g}{10^8 \text{K}} \right]^2 \left[\frac{n_i}{10^{-3} \text{cm}^{-3}} \right]^{-1}$$

式中 T_i 为离子温度,一般,平均自由程远小于团的典型尺度 $\sim 1 \text{Mpc}$, 则团中介质可认为是满足流体动力学方程的流体。但当考虑团中气体与星系相互作用时,可以认为它是无碰撞气体。

从非 Maxwell 分布弹性碰撞,弛豫到 Maxwell 分布的时标,由平均自由程决定:

$$t_{eg}(e, e) = \lambda_e / (v_e)_{\text{rms}}$$

$(v_e)_{\text{rms}}$ 是电子的均方根速度

$$t_{eg}(e, e) \approx 3.3 \times 10^5 \text{yr} \left[\frac{T_g}{10^8 \text{K}} \right]^{3/2} \left[\frac{n_e}{10^{-3} \text{cm}^{-3}} \right]^{-1}$$

最长的平衡时标——电子和离子的平衡时标也不过是 $t_{eg}(p, e) \sim 8 \times 10^8 \text{yr}$, 小于 t_H 和 t_{cool} 。因此,团中等离子体可由单个温度 T_g 来表征。

4. 冷流 从开始研究星系团 X 射线性质以来,冷流一直是一个重要且十分热门的课题,为叙述较为完整起见,我们将在下一部分比较详尽地介绍这一问题。

II. 1986年以后

一、近距团的 X 射线研究

1. 1986年前 Einstein 和 EXOSAT 上的仪器在团中气体的温度范围 (7—10keV) 内是不灵敏的,因此对气体的温度分布研究得比较少。但温度分布对于气体的热历史及暗物质分布的研究是十分重要的。Edge 等人^[8]研究了 Virgo 团的温度分布,发现在半径从 10' 到 100' (44—440kpc) 范围内温度分布近似为一个常数,而在核区的主导星系 M67 周围有一些较复杂的温度分量,这可能与冷流有关。Hughes 等人^[9,10]给出了 Temma, Einstein 和 EXOSAT 的中等能量正比计数器的观测结果,研究了 Coma 团的温度分布情况,得到的结论是 Coma 团中心 25' ($\sim 1 \text{Mpc}$) 内近似为一等温分布。外层为一向外递减的温度分布,可用多方指数为 1.6 的多方分布拟合, X 射线总质量在 2Mpc ($\sim 50'$) 范围之内为 $2.0 \times 10^{14} M_\odot$, 5Mpc 之内为 $5.6 \times 10^{14} M_\odot$ 。而铁丰度近似为均匀的 ($\sim 8 \times 10^{-8}$)。Synder 等人^[11]用 SPARTAN 观测了 Persens 团,得出了 8'—54' (0.25—1.6Mpc) 之间气体近似为等温分布,温度 $7.5 \times 10^7 \text{K}$ 。并拟合了表面亮度分布,得到 γ_{ex} 为 $12'.2 \pm 2'.8$, $\beta \sim 0.72 \pm 0.07$ 。这一时期对近距团的另

一类工作是利用 Einstein 天文台得到的团的 X 射线资料与最近的光学资料进行详细比较, 包括 Coma 团和类 Coma 团 A2256^[12]。结果发现 A2256 中 X 射线表面亮度和星系表面亮度都呈椭圆分布。径向星系分布轮廓比气体密度轮廓要陡, 而星系的速度弥散度大于气体的等效值。在星系速度分布各向同性及气体是等温的简单假定下, 气体和星系不能处于有公共势阱的流体静平衡之中, 对于一个应是充分弛豫的团出现这些现象有很重要的动力学意义。ROSAT 得到的第一个关于星系团的结果就是关于 A2256 中心可能发生并合事件, 即可充分说明这一点。

2. 这一时期的另一方面工作为综合 Einstein 的观测数据来研究 X 射线团的共同性质。如 Rhee^[13]综合光学数据研究了 26 个富度大于及等于 1 且 $Z \leq 0.1$ 的 Abell 团, 发现从 X 射线资料导出的团取向、从星系分布导出的团取向以及最亮(first rank)星系的取向三者符合得比较好。可能它们都标志了团势阱的某些特征。发现 X 辐射中心与最亮星系的位置重合得很好。对团的 X 射线和星系分布两种径向轮廓进行了比较, 从 X 射线导出的 King 模型的核半径与从星系导出的核半径一般是相符的。Price 等^[14]分析了 25 个贫团后得到的结论为, 贫团的 X 射线形态分类与富团相似, 而这种分类仅由贫团的光学性质是得不出的。但与富团不同的是贫团中各别星系的 X 射线辐射对总的辐射贡献很大。在有中心主导星系及无中心主导星系的两类团中, 前者比后者的射电源发现比率要高一些。贫团的光学和 X 射线性质可能是富团相应性质在低质量方向上的延伸, 它们具有相似的动力学年龄。David 等^[15]对典型的光学贫团 Hydra A 进行了分析后发现其 X 射线性质类似于亮的富团。

3. 这一时期的理论研究也十分活跃。Evrard^[16]用流体动力学模拟研究了 X 射线团的形成和演化, 他提出包含在团中的气体有以下几个重要问题尚未得到充分解决。(1) 气体来源于星系形成时的原初物质再加上冲撞压从下落星系剥夺的气体, 还是来源于团形成后星系喷出的气体?(2) 热历史: 气体温度和密度怎样随时间演化? 引力坍缩引起的激波加热是否足以产生 X 射线团中观测到的辐射?(3) 温度轮廓是等温的还是多方的?(4) 气体分布是否与暗物质分布相一致? 他的模拟结果表明, 从观测表面亮度得出的 β 估值是有偏的。矛盾来自激波加热气体的残余动能及对基本束缚质量分布的不正确估计。他认为对 Coma 团低估了 30% 的质量。Coma 团和 A2256 团经过改正后的气体质量估计应为 $2.4-2.6 \times 10^{16} h_{50}^{-1} \cdot M_{\odot}$ 。这类研究工作本身在很大程度上依赖于所选择的模型。如 Evrard 用的是 CDM 模型。

White III^[17]研究了团中气体的金属丰度和比能来判定气体中的金属成份来自原星系风或是冲撞压剥夺所产生的问题。Einstein 卫星得到的谱及表面亮度表明, 在冷团中的气体有比团坍缩时所能获得的更大的比能。超新星驱动的原星系风能提供这个附加的能量, 而冲撞压剥夺则不能。这样的原星系风还可使金属均匀分布, 从而倾向于支持原星系风的机制。

4. 这一时期最振奋人心的消息是 ROSAT 卫星的发射以及开始取得观测成果。Brill 等人^[18]已经报道了 ROSAT 对 A2256 的两条观测短讯, 发现它本应是动力学演化得比较充分的团, 但却在中心区的 X 射线表面亮度分布上发现了两个极大区, 一个与 CD 星系位置重合, 另一个的形态表明它正在被并合之中。这是以前低分辨率仪器所无法观测到的。此外还发现在团的延展 X 射线辐射场中有比预期更多的弱源, 在 0.1—2.4 keV 范围的光度为 $10^{42} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中两个源与成员星系重合。

二、 远距星系团($Z > 0.1$)的X射线研究

远距星系团的研究将对团的形成和演化提供重要的信息。Henry 和 Henriksen^[18]对 3C295($Z = 0.5$)进行了观测,得到了存在吸积率为 $145 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的冷流的证据。Kowalski 等^[20]给出了由 HEAO 1 和 A-1 的观测得到的一些遥远团($Z > 0.1$)的 1—10keV 的总 X 辐射流量。Lea 和 Henry^[21]给出了 Einstein 天文台所测得的、0.5—4keV 范围内一些遥远团的总 X 射线辐射流量。Arnand 等^[22]、Edge^[23]用 EXOSAT 观测了团 2059-25($Z = 0.188$)、PKS 0745-191($Z = 0.103$),给出了它们的铁丰度。Arnand 等^[24]用 GINGA 卫星的大面积计数器(LAC)观测了 A2507($Z = 0.196$)及 A483($Z = 0.28$),能量范围 1—17keV,分别得到它们的温度相应为 9.5keV 及 8.4keV,铁丰度为 $[\text{Fe}] \sim 0.3$,发现温度和光度无显著演化效应发生,对铁丰度因误差较大无法检验演化效应。Lippino 等^[25]用 Einstein 正比计数器观测了 Cl1358 + 6245($Z = 0.22$),给出了气体温度 $T = 7\text{keV}$, $L_{\text{X}}(0.5-5\text{keV}) \sim 4.3-4.4 \times 10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Gioia 等^[26]用 Einstein 观测数据分析了 67 个远距 X 射线团,并相信已发现了团 X 射线性质演化的证据,虽然结果仅仅在 3σ 水平上成立。他们发现 $0.30 < Z < 0.60$ 的团的 X 射线光度函数比 $0.14 < Z < 0.20$ 的团显然要陡一些。

总之,远距团的观测是十分重要而又相当困难的。到目前为止仅有极少数研究者表示发现了团 X 射线性质的演化效应。这个问题的进一步解决看来有待于 AXAF 卫星的发射及观测。

三、 冷 流

冷流现象一直在团的 X 射线研究中占有非常重要的地位,近来尤为突出。近乎有三分之一有关团 X 射线研究的文献是涉及论证冷流的,或与冷流有关。冷流最基本的问题是它的起源、动力学状态及其归宿。

1. 冷流的起源及观测 很早就注意到在密度较高的 X 射线团中心,冷却时标 t_{cool} 可能和 t_{H} 有相同量级,或小于 t_{H} 。因此冷气体不能与周围的热气体保持流体静力学平衡和热力学平衡,而要受到周围热气体的压力向中心流动,这就是冷流这一名称的来源。

这样一种冷流存在的观测证据有:团中心软 X 射线表面亮度有峰值^[3]。用 X 射线表面亮度测得的团中心气体的密度值满足 $t_{\text{cool}} \sim t_{\text{H}}$ ^[27]。观测表明从一些团的中心有较低温度的 X 射线辐射^[28]。比较间接的证据还有在许多冷流团(cooling flow cluster)的中心观测到了 10^4K 的光学发射线,它们形成从中心向外伸展的纤维,尺度 1~100kpc。常见的有氢的巴尔末线及一些重元素的禁线。虽然它们仅仅在冷流团中可能观测到,但它们与冷流团的关系还不十分清楚^[29]。

根据以上的判据,Arnand^[30]列出了包括有 106 个冷流团的表。个别星系团的 X 射线观测也常常用来判定冷流的存在。如 Schwartz 等^[31]用 EXOSAT 的数据拟合出在团 PKS 2354-35 中心周围 $n_0 = 8 \times 10^{-3} \text{cm}^{-3}$, $T = 3.7\text{keV}$,由此定出的冷却时标为 $4.5 \times 10^9 \text{yr}$ 。冷

却率估计为 $\dot{M} = 2/5(\mu m/kT)L_x$ 。由 $L_x(2-6\text{keV}) = 4.1 \times 10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ，得到 $\dot{M} = 320 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 。又如 David 等^[15]对贫团 Hydra A 的观测给出中心区 120kpc 范围内冷却时标为 $t_{\text{cool}} \sim 5 \times 10^8 \text{yr}$ ， $\dot{M} \sim 660 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 。到目前为止可以说冷流的存在是比较明确的。

与冷流存在的一个密切相关的观测事实是：在每一个冷流团的中心几乎都存在一个中心主导星系。在很多情况下这个星系有核活动^[32]。Wise 等还进一步建议观测冷流团中心星系电磁辐射被冷流中电子散射的现象（它的光深估计为 10^{-2} ，它的谱指数应与中心活动核一样）。这样的观测除了可给出冷流的有关数据外，还可能用来测定团的与 Hubble 常数无关的距离。

与冷流团中心主导星系有关的另一问题是中心星系的吸积。为了吸积冷气体，星系通过团内介质的运动速度必须足够慢。中等红移团的观测及冷却时标表明，冷气体在团中存在的时间足够长，典型的气体冷却率（有时也被称为吸积率）为 $100 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 。因此，团形成至今总的吸积质量可达到 $M_{\text{acc}} \sim 10^{12} M_\odot [\dot{M}/100 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}]$ ，与团中心 cD 星系质量相当。因此有人建议，冷气体吸积可能是 cD 星系的起源，下面我们还会详细讨论这个问题。

2. 动力学状态及归宿 目前为止还没有直接观测到过冷气体向中心的流动。如这种慢运动确实存在，由它所产生的多普勒效应没有很高的分辨率是观测不到的。由于热不稳定性，一般可以排除冷气体与周围热气体处于流体静平衡及热平衡的情况^[1]。因此，到目前为止冷流的动力学状态尚不清楚。

冷流的归宿问题更大。到目前为止还没有关于团中心大量冷气体的存在或足够数量冷气体向其他形式物质（如恒星）转化的直接证据。Perseus 团是一个典型例子，它的 \dot{M} 在 10—100kpc 尺度内为 $\sim 300 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[33]。估计在 t_H 时间内可吸积 $10^{12} - 10^{13} M_\odot$ 。对该团中的光学发射线星云已作了观测，如认为星云来源于冷流中的热凝聚，则它的质量仅为 $10^8 M_\odot$ ，这只能说明它仅仅是冷气体处于某种转换过程中的中间阶段^[29]。射电测量也未能探测到以 HI 或 H_2 形式存在的、由冷气体堆积而成的沉积气体^[34]。最近，Lazareff 等^[35]报道了从团中心主导星系 NGC 1275 中检测到了 CO 射电辐射，由此得出 H_2 的质量约为 $1.4 \times 10^{10} M_\odot$ 。但这也远远小于总的吸积质量，从而引起了对冷流归宿问题的严重关注。

理论上两类关于冷流运动状态及去向的模型。早期提出的是稳恒态流体力学模型。一般都假定 \dot{M} 为常数，气体的密度、压力、速度等参数都不随时间而变化^[36]。后来的 X 射线观测表明，质量吸积率有朝中心减少的趋向。因此，在稳恒态模型中加入了冷气体的淀留 (sink)^[37,38]。解释冷气体归宿的一种比较可能的途径是气体转换成恒星，但恒星的初始质量函数 (IMF) 必须与银河系内观测得出的 IMF 不同，而是极大地偏向小质量 ($< 1 M_\odot$)，否则中心主导星系的颜色会比观测到的更蓝^[39]。因此，在 1986—1989 年间提出了各种加热机制来抑制冷流。这些机制中有热传导^[40-42]，超新星加热^[43]，及被团内星系的运动加热^[44,45] 等。

最近发展起来的一类模型是非稳恒态模型。它的基本思想是：由于吸积是连续的、逐步建立的，如流是不稳定的，则由于质量在冷却半径范围内由流的作用而重新分布，质量吸积率有朝中心减少的趋向，则在这种模型中可能不需要大量低质量恒星的形成机制。Volkov^[46] 用静态引力势的假定建立了 M87 与时间有关的数值计算模型。Chevalier^[47] 采用假定具有理

想幂律引力势的同类模型。Meiksin^[48]提出了一种包括热传导、超新星以及团势阱变化和恒星形成等气体淀留机制的非稳恒态模型。

目前比较多的人认为大部分气体最终将形成低质量恒星,也有一小部分会形成大质量恒星^[49]。许多工作集中于搜索冷气体向恒星转变过程中发生的可观测现象。如 Grabelsky 和 Ulmer^[50]建议不管所形成的恒星质量如何,冷气体必须经过一个中间转换过程。因此,最基本的检验是应搜索转换中的冷气体。他们用了 40 个团的 IRAS 数据,并对其中 11 个团进行了射电 CO 观测,但没有发现任何 CO 辐射。McNamara 等^[51]建议探测冷气体在恒星形成前成为中性气体时发出的 21cm 中性氢线。他们在两个冷流团中的中心主导星系中探测到 HI 吸收线,HI 的来源不能肯定。他们倾向来源于冷流。Sarazin 等^[52]提出探测气体刚冷到低于能发出 X 射线辐射时所出现的光学冕发射线。气体在这一阶段冷却得特别快,因此是热不稳定的。他们还讨论了最近进行此类观测工作的可能性。

因此,直到目前为止并没有任何关于冷流的动力学状态和最终归宿的确切信息。AXAF 和 ROSAT 的观测将大大改变这种状况。预期可能检测到 10^3 个新的冷流团。更高分辨率的数据将会向我们提供更多有关的信息。人们正热切地期待着星系团 X 射线性质的新高潮的到来。

参 考 文 献

- [1] Sarazin, C. L., *Rev. Mod. Phys.*, 58 (1986), 1.
- [2] Sarazin, C. L., *X-ray Emmission from Clusters of Galaxies*, Cambridge University Press, Cambridge, (1988).
- [3] Jones, C. and Forman, W., *Ap. J.*, 276 (1984), 38.
- [4] Forman, W. and Jones, C., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 20 (1982), 547.
- [5] Quintana, H and Melnick, J., *A. J.*, 87 (1982), 972.
- [6] Abramopoulos, F. and Ku, W., *Ap. J.*, 271 (1983), 446.
- [7] Bahcall, N. A., *Ap. J. Lett.*, 218 (1972), L93.
- [8] Edge, A. C., Stewart, G. C. and Smith, A., in *NRAO Green Bank Workshop No. 16. Radio Continuum Process in Clusters of Galaxies*, ed. by C. P. Opey and J. M. Uson, p. 105, (1986).
- [9] Hughes, J. P., Yamashita, K., Okumura, Y., Tsunemi, H. and Matsuoka, M., *Ap. J.*, 327 (1988), 615.
- [10] Hughes, J. P., Gorenstein, P. and Fabricant, D., *Ap. J.*, 329 (1988), 82.
- [11] Synder, W. A., Kowalski, M. P., Cruddace, R. G., Fritz, G. G., Middleditch, J. D., Femimore, E. E., Ulmer, M. P. and Majewski, S. R., *Ap. J.*, 365 (1990), 460.
- [12] Fabricant, D. E., Kent, S. M. and Krutz, M. J., *Ap. J.*, 336 (1989), 77.
- [13] Rhee, G. F. R. N. and Latour, H. J., *Astron. Astrophys.*, 243 (1991), 38.
- [14] Price, R., Borns, J. U., Doric, N. and Newberry, N. V., *A. J.*, 102 (1991), 14.
- [15] David, L. P., Arnaud, K. A., Forman, W. and Jones, C., *Ap. J.*, 356 (1990), 32.
- [16] Evrard, A. E., *Ap. J.*, 363 (1990), 349.
- [17] White III, R. E., *Ap. J.*, 367 (1991), 69.
- [18] Brill, U. G., Henry, J. P., Schwartz, R. A., Böbringer, H., Ebeling, H., Edge, A. C., Hartener, G. D., Schindler, S., Trümpler, J. and Voges, W., *Astron. Astrophysics.*, 246 (1991), L10.
- [19] Henry, J. P. and Henriksen, M. J., *Ap. J.*, 301 (1986), 689.
- [20] Kowalski, M. P., Ulmer, M. P., Cruddace, R. G. and Wood, K. S., *Ap. J. Suppl.*, 56 (1984), 403.
- [21] Lea, S. M. and Henry, J. P., *Ap. J.*, 332 (1988), 81.
- [22] Arnaud, K. A., Johnstone, R. M., Fabian, A. C., Crawford, C. S., Nulsen, P. E. J., Shafer, R. A. and Mushotzky, R. F., *M. N. R. A. S.*, 227 (1987), 241.
- [23] Edge, A. C., Ph. D. Thesis, University of Leicester, (1988).
- [24] Arnaud, M., Lacheze-Rey, M., Rothenflug, R., Yamashita, K. and Hatsukade, K., *Astron. Astrophysics.*, 243 (1991), 56.

- [25] Luppino, G. A., Cooke, B. A., Mchardy, I. M. and Ricker, G. R., *A. J.*, 102 (1991), 1.
- [26] Gioia, I. M., Henry, J. P., Maccacaro, T., Morris, S. L., Stoko, J. T. and Wolter, A., *Ap. J.*, 356 (1989), L35.
- [27] Stewart, G. C., Fabian, A. C., Jones, C. and Forman, W., *Ap. J.*, 285 (1984), 1.
- [28] Carnizers, C. R., Markert, T. H. and Donahne, M. E., in *Cooling Flows in Clusters and Galaxies*, ed. by A. C. Fabian, 63, Dordrecht; Kluwer, (1988).
- [29] Heckman, T. M., Baum, S. A., van Breugel, W. J. M. and McCarthy, P., *Ap. J.*, 338 (1989), 48.
- [30] Arnaud, K. A., private communication, (1988).
- [31] Schwartz, D. A., Bradt, H. V., Remilard, R. A. and Trohy, I. R., *Ap. J.*, 376 (1991), 424.
- [32] Wise, M. W. and Sarazin, C. L., *Ap. J.*, 363 (1990), 344.
- [33] Fabian, A. C., Hu, E. M., Cowil, L. L. and Grindlay, J., *Ap. J.*, 248 (1981), 47.
- [34] Jaffe, W., *Astron. Astrophys.*, 171 (1987), 378.
- [35] Lazareff, B., Castets, A., Kim, D. W. and Jura, M., *Ap. J.*, 336 (1989), L13.
- [36] Binney, J. and Cowie, L. L., *Ap. J.*, 247 (1981), 464.
- [37] Thomas, P. A., Fabian, A. C. and Nulsen, P. E. J., *M. N. R. A. S.*, 228 (1987), 973.
- [38] White III, R. E. and Sarazin, C. L., *Ap. J.*, 318 (1987), 612.
- [39] Romanishin, W., *Ap. J.*, 323 (1987), L113.
- [40] Bregman, J. N. and David, L. P., *Ap. J.*, 326 (1987), 639.
- [41] Meiksin, A., *Ap. J.*, 334 (1988), 59.
- [42] Gaetz, T. J., *Ap. J.*, 345(1989), 666.
- [43] Silk, J., Djorgovski, S., Wyse, R. F. G. and Bruzual, G., *Ap. J.*, 307 (1986), 415.
- [44] Miller, L., *M. N. R. A. S.*, 220 (1986), 713.
- [45] Pringle, J. E., *M. N. R. A. S.*, 239 (1989), 479.
- [46] Volkov, E. V., *Astrofizika*, 24 (1986), 477.
- [47] Chevalier, R. A., *Ap. J.*, 329 (1988), 16.
- [48] Meiksin, A., *Ap. J.*, 325 (1990), 466.
- [49] Johnstone, R. M., Fabian, A. C. and Mulsen, P. E. J., *M. N. R. A. S.*, 224 (1987), 75.
- [50] Grabelsky, D. A. and Ulmer, M. P., *Ap. J.*, 355 (1990), 407.
- [51] McNamara, B. R., Bregman, J. N. and O'connell, R. W., *Ap. J.*, 360 (1990), 20.
- [52] Sarazin, C. L. and Craney, L. M., *Ap. J.*, 375 (1991), 532.

(责任编辑 刘金铭)

Recent Progress of Studies in Clusters of Galaxies and in Member Galaxies in Clusters (II)

Pan Rongshi Zhao Junliang

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Liu Ruliang

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

Abstract

Recent progress of studies in X-ray characteristics of clusters of galaxies is described, including observational and theoretical research work of X-ray emission from clusters, studies on distant clusters, cooling flows in clusters, etc,