

Coma 星系团的研究进展

田凯平 邵正义 黄卫红
(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

Coma 团是离我们最近的典型富星系团之一。对此,人们积累了丰富的观测资料,并且进行了广泛深入的研究。在本文中着重介绍有关 Coma 团的成员判定、结构、光度函数、动力学和次结构等方面的研究情况,并简单介绍目前的最新研究动态。

关键词 星系: 星系团: Coma 团

Coma 团是距我们最近的规则星系团之一,因而对它实施的观测也最多,其中不仅有涉及射电、光学和 X 射线波段的多波段观测资料,就观测类型而言,还包括测光和分光观测。另一方面由于 Coma 团是富星系团,在其天区内的成员星系较多,这为开展各类研究提供了一个比较理想的样本,因而近年来 Coma 团一直是星系团工作中倍受关注的研究对象。

对 Coma 团早期的研究可以追溯到 1958 年 Abell^[1] 对该团进行的测光工作。而在近期有关该团的研究工作中,以 Kent 和 Gunn^[2] 对团的结构、运动学和动力学问题的研究最为详细。Ferney 和 Bhavsar^[3] 对 Coma 团的位力 (Virial) 质量、质光比等问题也作过一些讨论。由于观测技术的发展, Godwin 和 Peach^[4] 在 1977 年重新对 Coma 团天区的星系测光研究作了讨论。另外,还有许多学者对 Coma 团的次结构和演化问题^[5-8], 团的质量均分和能量均分问题,团的密度轮廓问题^[9], 团的射电晕^[10,11] 和冷流问题以及团的弥漫 X 射线发射结构问题^[12], 作了深入细致的讨论。由于 Coma 团天区的观测资料相当丰富,在本文中将以光学资料研究结果为主介绍对 Coma 团近期研究的进展。

1 成员判定

星系团的成员判定在星系团的研究工作中占有举足轻重的地位,它是所有有关星系团研究工作的基础。早期人们通常用位置和视星等作为区分团星系和场星系的判据。这种成员判定方法是基于以下考虑提出的: 星系越靠近中心,其作为成员星系的概率就越

国家自然科学基金资助项目

本文据“星系团专题讨论会”(1993 年 10 月 20 日—23 日,浙江镇海)上的综述报告修改整理而成
1994 年 2 月 23 日收到

大, 而极限视星等越亮, 场星系的污染就越少。Abell 定义星系团的富度判据和致密度判据即属于这一类。另外如 Sandage 和 Tammann^[13] 以及 Turner 和 Gott^[14] 等也是用星系的位置和视星等来确定星系团成员的。Donas^[15] 在采用 GMP(Godwin, Metcalfe 和 Peach^[16]) 的 b 带测光资料讨论 Coma 团的光度函数时, 其成员判定方法中也是以位置和视星等为判据的。他们把同时满足距团中心半径 $R \leq 50'$ 和星等 $b < 18.5\text{mag}$ 的星系看作是成员星系。显然这种方法对于区分团、场星系不是十分有效的。近期有人利用星系的颜色—星等(C—M)图来区别团、场星系, 但这种方法对于旋涡星系不是十分有效, 并且会把一些对星系序偏蓝的团星系误认为场星系。1992 年 Escalera^[8] 在用小波方法来讨论 Coma 团的次结构时, 采用了 Mellier^[7] 提出的 C—M 判据来判定成员。Escalera 认为星等 b 和 r 应满足下式:

$$1.53 \leq 0.0223(b - 22) + (b - r) \leq 1.98$$

的星系是成员星系, 并由此得到了 1337 个成员星系。虽然此关系式应用于 E 和 S0 星系较好而对 Sp 星系不是十分有效, 但是由于讨论区域位于团中心, 而在这一区域 E 和 S0 星系远远多于 Sp 星系, 因而 C—M 关系运用于此还是可行的。随着星系红移资料的增多, 人们开始注意到以视向速度为判据来确定团、场星系的方法。这种方法经过近十年来的发展已日臻完善。现在已经发展成为以视向速度为主要判据, 综合考虑团内星系面分布的星系团的最大似然原理成员判定法。1988 年赵君亮等人^[17] 在 Coma 星系团的研究一文中对以视向速度为判据的最大似然方法进行了详细介绍。他们假定团星系和场星系分别满足一维正态分布, 因而实际拍摄到的星系分布是由场星系和团星系构成的 N 个正态分布的叠加。利用 Kent 和 Gunn 的视向速度资料, 赵君亮等人构造了似然函数, 并用求最大似然值的方法求出了其中的分布参数, 得到了每个星系的成员概率。1993 年, 邵正义^[18] 在其硕士毕业论文中改进了该方法。他在考虑了视向速度资料的同时还综合考虑了团中星系的面分布, 使得这一最大似然判别法更加完善。

2 形状与结构

Abell^[19] 较早地利用 Coma 团的测光资料对 Coma 团的形状和结构进行了研究。Abell 对 Coma 团的测光观测主要集中于团中心 $2^{\circ}.61 \times 2^{\circ}.70$ (7.052 deg^2) 的天区。利用焦外技术, 他得到了极限星等 $m_v = 18.3\text{mag}$ 的所有 1721 个星系的星等。综合 Jan Dobias 的极限星等为 19.9mag 的 Coma 团中心 40.16deg^2 的测光资料, Abell 给出了 Coma 团的形状和大致结构。

2.1 形状

如图 1, Abell 给出了亮于 18.3mag 的所有星系的分布。由图可以清楚地看出 Coma 团中心区的密度较高, 离开中心后, 面密度沿径向迅速减小。Coma 团总体上表现出沿东北—南方向拉长的椭圆状, 长轴为 $5^{\circ}.4$, 短轴为 $4^{\circ}.3$ 。

Rood 和 Page^[20] 等人利用 Coma 团内不同径向距离内的星系计数也发现 Coma 团呈现出一种拉长的椭圆状结构。

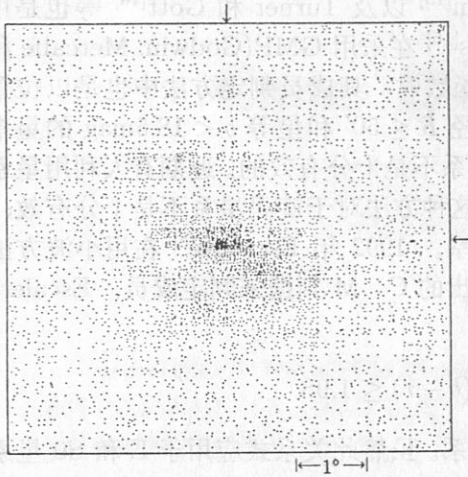


图 1 在 Coma 团中心 40.16deg^2 范围内亮于 18.3mag。所有星系的分布^[1]

由图可见，场星系改正明显不完备，在离中心 $1^\circ.86 - 2^\circ.80$ 处亮星系显著过多。另外亮星系和暗星系从图上也看不出有明显的分层效应。于是为了定量地得到不同星等范围内星系的径向分布，Abell 计算了不同星等范围内星系的径向分布上的弥散度：

$$\begin{aligned} m_v \leq 15.6 & \quad \sigma = 42'.6 \\ 15.6 < m_v \leq 16.5 & \quad \sigma = 44'.5 \\ 16.5 < m_v \leq 18.3 & \quad \sigma = 46'.1 \end{aligned}$$

由此可见光度分层可能存在，但与理论上的能量均分相比还很不显著。

继 Abell 后，Godwin 和 Peach^[4] 也用新的测光资料对 Coma 团的面密度轮廓作了讨论。他们测量了 Coma 团中心区 1.22 平方度范围内 923 个星系的星等，这个样本完备到 $V_{25} = 17.5$ ， V_{25} 是每平方弧秒内目视星等 25mag 光度线的累积星等。他们将样本分为三组：

- (1) $V_{25} \leq 14.0$
- (2) $14.0 < V_{25} \leq 16.0$
- (3) $16.5 < V_{25} \leq 17.5$

1992 年 Watt^[12] 等人利用 Spacelab 2 上的 X 射线望远镜，对 Coma 团在这一辐射波段上显示出来的形状也作了研究。他们发现 Coma 团的整体辐射在 X 射线波段上也显示出沿东北—西南方向的拉长结构。另外他们还发现在 7.5—14keV 的 X 射线波段上，Coma 团在西南方向上有显著的剩余辐射区，如图 2 所示。这显示出 Coma 团内存在着某种更为复杂的结构，而近期的 ROSAT 的巡天结果也确证了 Coma 团内西南方向剩余辐射区的存在。

2.2 Coma 团的结构

在讨论 Coma 团的结构时，Abell 对团中心东、南、西、北四个区域不同星等范围的星系进行了计数，得到了进行过归一化处理的星系的投影面密度分布，结果见图 1。

由此可见，场星系改正明显不完备，在离中心 $1^\circ.86 - 2^\circ.80$ 处亮星系显著过多。另外亮星系和暗星系从图上也看不出有明显的分层效应。于是为了定量地得到不同星等范围内星系的径向分布，Abell 计算了不同星等范围内星系的径向分布上的弥散度：

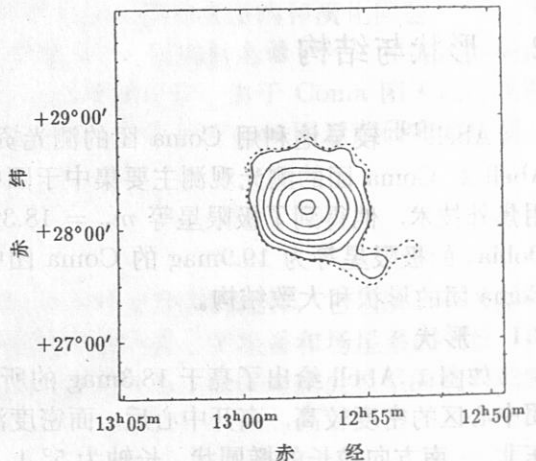


图 2 X 射线波段所显示的 Coma 团形状^[12]

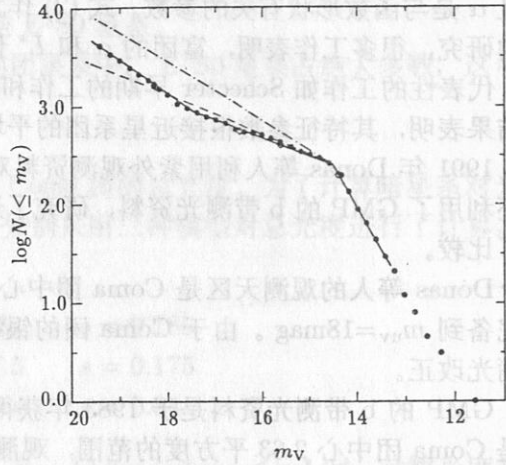
发现与较亮和较暗的星系相比,中等亮度的星系有更强地向团中心聚集的趋势。

3 Coma 团的光度函数和总光度

3.1 Coma 团的光度函数

对 Coma 团的光度函数作过研究的人很多,下面我们以 Abell 和 Dobias^[19], Schechter^[20], Lugger^[21], Donas 和 Milliard^[15] 为代表介绍这方面的工作。

前面提及的 Abell 利用的测光资料完备到 $m_v = 18.3\text{mag}$, 而 Dobias 利用光瞳测光光度计测得了 Coma 团天区极限星等为 $m_v = 19.9\text{mag}$ 的天体。剔除暗弱恒星后, Dobias 得到完备到 $m_v = 19.4\text{mag}$ 的该天区星系



测光资料。为了检验资料的可靠性, Abell 和 Dobias 分别独立地作了 $m_v = 17.0\text{mag}$ 到 18.3mag 的 Coma 团中心同一 2.76 平方度天区的星系的星等校正, 结果吻合得很好。因此他们认为利用 Dobias 的资料作 Coma 团暗端的光度函数是可信的。考虑了场星系改正后, 他们得到了 Coma 团中心 2.76 平方度范围内的光度函数, 结果见图 3。

与以前的结论类似, 对数积分光度函数随着光度的增加在亮端变陡, 当 m_v 暗于 14.5mag 后, 对数积分光度函数随光度的增加而增加的趋势趋缓。人们称 $m_v = 14.5\text{mag}$ 这一折点对应的星等为 m_v^* 。特征星等 m_v^* 是一个对距离有效的标准烛光。

图 3 中 Coma 团的光度函数的不同部分可以用下式来描述:

$$\lg N(\leq m_v) = \text{const} + sm_v \quad (1)$$

s 为斜率, 它的值对于星系团中不同部分为:

- (1) $m_v < m_v^* \leq 17.5$ $s = 0.175$
- $17.5 < m_v \leq \infty$ $s = 0.34$
- (2) $m_v^* < m_v \leq \infty$ $s = 0.2$
- (3) $m_v^* < m_v \leq \infty$ $s = 0.3$

光度函数在暗端中间一端较陡, 折点在 $m_v = 17.5\text{mag}$ 处。由于以前还没有对如此暗弱的星系进行过类似的研究, 作者对 $m_v = 17.5\text{mag}$ 这一折点的存在还有一定的怀疑, 并认为暗端的斜率增加可能是一种假象, 但他们又排除了造成这种假象的几个原因。

Schechter^[21]首次提出了一个连续的、解析的统计分布光度函数,并被广泛采用。其微分形式可由下式表示:

$$n(L)dL = N^*(L/L^*)^{-\alpha}\exp(-L/L^*)d(L/L^*) \quad (2)$$

其中, N^* 为团中成员星系数的某种典型值, α 及 L^* 为拟合参数。 L^* 是特征光度, 并且 α 是与函数形状有关的参数。式 (2) 作为一个普适光度函数被用于许多大样本星系团的研究, 很多工作表明, 富团的 α 和 L^* 值是很相近的, 同样是一个很有效的标准烛光。代表性的工作如 Schechter 早期的工作和后来 Luggner 的研究。他们对 Coma 团的研究结果表明, 其特征参数很接近星系团的平均值, 说明 Coma 是典型的富星系团。

1991 年 Donas 等人利用紫外观测资料对 Coma 团的光度函数进行了研究。他们同时还利用了 GMP 的 b 带测光资料, 研究了这一波段的光度函数, 并将其与紫外结果进行了比较。

Donas 等人的观测天区是 Coma 团中心 2.18 平方度, 观测波段是 $\lambda \sim 2000\text{\AA}$, 样本完备到 $m_{uv}=18\text{mag}$ 。由于 Coma 团的银纬较高, 银河消光值较小, 所以他们没作银河消光改正。

GMP 的 b 带测光资料是于 1983 年获得的, 样本完备到 $b_{26.5} \leq 21.0\text{mag}$, 观测天区是 Coma 团中心 2.63 平方度的范围, 观测得到了 6724 个星系的位置和测光资料。

为了确定星系团的成员, Donas 等人将 Mazure^[24] 等人于 1988 年发表的 238 个星系的视向速度的资料与 Kent 和 Gunn, Godwin 和 Peach 以及 GMP 的资料作了较差证认, 其中满足以下条件的为团星系:

$$(1) \quad 4200\text{km} \cdot \text{s}^{-1} < V < 9600\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$(2) \quad \text{离团中心的投影距离 } r < 50'$$

这样在 UV 波段得到了 52 个星系, 在 b 波段筛选出了 181 个成员星系, 显然这样得到的光度函数是一个下限。

另一方面, 他们考虑了所有探测到的星系中满足以下两个条件的样本:

$$(1) \quad R \leq 50'$$

$$(2) \quad b_{26.5} < 18.5\text{mag}$$

依此规则找到了 b 波段的 478 个星系, UV 波段的 179 个星系。这样得到的光度函数实际上是一个上限。

由于 $m_{uv} \leq 15.4\text{mag}$ 的星系红移经确认 90% 以上均为成员星系, 所以低限的光度函数应与 $m_{uv} \leq 15.4\text{mag}$ 的真实光度函数吻合得很好, 并可把它作为真实光度函数的一段。同理, 对 b 波段的光度函数, 其在亮端 $b < 16.2\text{mag}$ 的结果也可看作 Coma 团在亮端的真实的光度函数。

将 UV 光度函数与 b 光度函数进行比较, Donas 等人发现:

(1) UV 中最亮的星系比 b 中的暗一等。这是因为 b 波段最亮的星系为椭圆星系 ($b_{26.5} \leq 13.5\text{mag}$), 其色指数 $m_{uv} - b \sim 3$, 在 UV 波段它们仅出现在 $m_{uv} \geq 15.5\text{mag}$

处。而 UV 波段最亮的星系为 Irr-Sp 星系, 其色指数为 $m_{uv} - b \sim -1$, 在 b 波段它们仅出现在 $b_{26.5} \geq 13.5\text{mag}$ 处。

(2) 由图可以较明显地看到: 在 ULF 的亮端, 大部分为 Irr-Sp 星系, 在亮于 $m_3 \leq +2(m_{uv} < 16.5\text{mag})$ 的团星系中, 只有 20% 是 E-S0 星系, 另外 70% 是 Irr-Sp 星系, 10% 是尚为确定形态的星系, 因而 Irr-Sp 星系在 Coma 团中的比例最大可占约 80%。在 UV 波段, 场星系中各形态成份的比值与成员星系中的大致相同。而在 b 波段, 亮于 $m_3 + 2(b_{26.5} = 15.5\text{mag})$ 的星系中, 80% 是 E-S0 星系。

(3) 在 UV 波段, 暗于 $m_{uv} = 17.5\text{mag}$ 的团星系中, E-S0 星系占绝大多数, 这可能是因为选择效应引起的。

3.2 Coma 团的光度

利用 Abell 得到的光度函数, 可以计算 Coma 团的总光度。为了计算暗星系对光度的贡献, 对 $m_v \geq 14.5\text{mag}$ 的星系, Abell 分别采用三种模型对总光度进行了计算, 其中目视光度以星系的视星等 m_v^* 为单位。

$$m_v < m_v^* = 14.5 \quad s = 0.185$$

$$14.5 \leq m_v \leq 17.5 \quad s = 0.175$$

$$17.5 \leq m_v \leq 19.4 \quad s = 0.34$$

另外, 亮于 $m_v = 13.3\text{mag}$ 的星系有 21 个, $13.3\text{mag} < m_v \leq m_v^*$ 时, 对数光度函数的斜率为 0.85。

对模型 (1), 总光度为 822, 其中 49% 是亮于 m 的星系的贡献, 25% 是 $m_v^* < m_v \leq 19.4\text{mag}$ 的星系的贡献, 26% 是没有观测到的暗弱星系的贡献。

对模型 (2), 总光度为 636;

模型 (3) 给出的总光度为 1094。

假设太阳的绝对目视星等 $M_v = 4.8\text{mag}$, 平均视向速度采用 Rood^[18] 等人给出的值 $6888\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 哈勃常数 H 取为 $50\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\text{Mpc}$, Coma 团的距离模数即为 35.7, 因而 $M_v^* = -21.2\text{mag}$, 于是单位视光度 $L^* = 2.512 \times 10^{10} L_\odot$ 相应于上面三种模型, 团的总光度为:

$$(1) \quad L = 2.06 \times 10^{13} L_\odot$$

$$(2) \quad L = 1.60 \times 10^{13} L_\odot$$

$$(3) \quad L = 2.75 \times 10^{13} L_\odot$$

因而可以认为 Coma 团的总光度为:

$$L = 2(+0.8, -0.4) \times 10^{13} L_\odot$$

模型 (1) 给出的暗端斜率是三个模型中最大的, 因此给出了暗星系数目的上限。若光度函数在暗端的斜率确实是 0.34, 可以预言, 在 Coma 团中会有 4.5×10^5 个绝对目视星等在 -14 到 -10 的 Sculptor 型矮椭圆星系。虽然目前还无法证实这一结论, 但可以肯定的是, 即使这些矮椭圆星系确实存在, 它们在总光度中所占比例最多也只有 26%。这实际上也为暗物质的存在间接地确定了一个上限。

4 Coma 团的动力学

研究 Coma 团的动力学, 即研究在 Coma 团的引力势范围内, 团中星系所处的动力学演化状态。自 Zwicky^[25] 的工作以来, 通常假定富团的中心部分处于平衡状态。将这种简单的假定运用于 Coma 团后得到的引力质量是光度质量的 100 倍。这似乎喻示着在 Coma 团中存在着大量的暗物质。为了更仔细地讨论, 各种星系团平衡态模型相继提出。最先提出的有等温 Embden^[26] 气体球模型和 King^[27] 模型, 其中定义了与团相关的长度标度, 这就是核半径。在核半径以内认为密度基本上是一个常数。X 射线观测数据后来成为构造 Coma 团非球对称质量模型的基础。当得到丰富的视向速度资料以后, 考虑了速度分布各向异性的动力学模型, 由 Kent 和 Gunn^[2] 作了详细的研究。除此之外, 50 年间还有许多更复杂的分析, 所有的研究都作了均匀分布的假定。可是自 80 年代后期以来, 在 Coma 团和其他星系团中发现团中星系非位力化的证据越来越多。关于 Coma 团外部区域的动力学研究近来也有人作过讨论^[28]。

一般说来, 星系团的形成大致经过两个阶段: 首先, 团中物质经过激烈弛豫过程坍缩形成一些次系统, 次系统不断相互作用合并而最终形成单一的团结构; 这以后, 系统由于动力学摩擦和两体交会运动, 经过漫长的演化而达到动力学平衡状态, 也即能量均分状态。这在宏观上则表现为各种分层效应, 如在位置和速度空间的质量分层和光度分层等等。因此, 分层效应的研究可以有效地反应团的两体弛豫过程以及团内星系演化的情况, 从而成为有关星系团研究中很受重视的研究内容。

4.1 光度分层

Zwicky 较早地对这一问题进行了研究。他采用对不同极限星等计数的方法证实在 Coma 团中存在某种程度分层效应。可是 Rood 等人^[23] 的研究结果表明, 当把背景星系适当地改正到 Zwicky 暗星系系统时, 这种分层效应有较大的弥散度, 由此又可以说 Coma 在大尺度分布上没有明显的分层效应。

关于 Coma 团核半径范围内的分层效应有较多的争论。Quintana^[29] 利用 Godwin 和 Peach 的观测结果确定 Coma 团的核半径是极限星等的函数, 并且发现在 $m_v = 15\text{mag}$ 到 $m_v = 18.5\text{mag}$ 之间, 核半径增加约 2 倍。这说明光度大的星系有向中心聚集的倾向。因而 Quintana 认为在 Coma 团中存在一定程度的光度分层。Sarazin^[30] 用同样的观测资料和不同的处理方法, 得到与 Quintana 相反的结论, 即分层的证据很不明显。但是在他的拟合方法中核半径取得太小。

上面几位作者讨论的是光度在位置空间的分层情况。如果星系足够弛豫, 不难理解, 团中的星系在速度空间也应该存在分层现象。Kent 和 Gunn^[2] 利用收集到的 Coma 团天区 $r < 30'$ 范围内的红移资料, 对不同星等范围内的星系的速度弥散度进行了计算, 结果见表 1。这里 m_2 和 m_1 为星等范围的上限和下限, n 是在这个星等范围内的星系数目, σ 为速度弥散度, 单位是 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由表 1 可见, 不同星等范围内星系的速度弥散度的变化没有表现出规律性, 因而在速度空间没有明显的光度分层现象。

4.2 形态分层

Kent 和 Gunn 选取距团中心半径 $r < 1^\circ$, $m_p \leq 15.7\text{mag}$ 的 Coma 团内有形态分类的成员星系 124 个, 将此 124 个星系以每组大致相同的星系数为原则分为三组: (1)E 和 E/S0, (2)S0, (3)S0/Sp 和 Sp, 同时计算包括每组星系数目一半区域的半径 $r = r_{1/2}(r_{1/2}$ 反映了每组样本成团性的尺寸) 以及每组样本的速度弥散度。具体结果见表 2。

表 2 速度弥散度和形态

形态	%	r	σ/σ
E+E/S0	38	16'.0	0.94
S0	36	22'.5	1.00
S0/SP+SP	26	31'.0	1.08

很明显, 从 E-S0-Sp, 成团性下降, 而速度弥散度则增大, 也即在位置空间和速度空间 Coma 团中的星系存在一定程度的形态分层。

4.3 动力学模型

为了更清楚地了解星系团的动力学状态, Kent 和 Gunn 首次构造了 Coma 团的动力学

模型。与通常的作法一样, 他们首先对团的性质作了如下几个假设:

(1) 由于人们关心较多的是 Coma 团径向的结构, 所以 Kent 和 Gunn 假设 Coma 团具有球对称的结构。

(2) 假设 Coma 团的中心处于动力学平衡状态。因为在宇宙年龄内, 星系可以在这样的尺度内穿越三次。

(3) 假设团中的暗物质与星系分布类似。

下面 Kent 和 Gunn 讨论了构造动力学模型的中心问题: 分布函数的选取问题。分布函数的选取应该考虑到以下两种极端情况: 由于两体弛豫并没有在星系团中占主导地位(中心部分除外), 分布函数应反映团形成初期的无序状态, 如果团的坍塌是足够无序的, 那么剧烈弛豫过程将有效地使星系的运动无规化, 使整个团的分布趋向于麦克斯韦-玻尔兹曼分布而无质量分层。在另一种极端情况下, 如果团的形成是由于核区对物质的平稳吸积, 那么无规分布出现的可能性则较小, 而团应该趋向于一种多方结构。实际情况可能是这两种情况的有机组合。

基于以上考虑, Kent 和 Gunn 给出了以下四种可能的分布函数:

$$f_1 = A_1(e^{-E/\sigma} - 1)e^{-J/2J_0} \quad (3a)$$

$$f_2 = A_2(-E)^\beta e^{-J/2J_0} \quad (3b)$$

$$f_3 = A_3(e^{-E/\sigma} - 1)J^{-\gamma} \quad (3c)$$

$$f_4 = A_4(-E)^\beta J^{-\gamma} \quad (3d)$$

其中 E 和 J 分别是系统中单个星系的能量和动量。这些分布函数包含 E 的两种形式, $e^{-E/\sigma}$ 和 $(-E)^\beta$ 以及动量的两个形式 $e^{-J/2J_0}$, $J^{-\gamma}$ 。 f_1 和 f_3 给出的 E 是截断的高斯型的, 而 f_2 和 f_4 则给出了 E 的多方形式。对于动量 J 分布函数 f_1-f_4 也给出类似的两种形式, J_0 是边界处的角动量。

f 给出的称为 King-Michie 分布, 它描述的是球对称团的结构。当 $J \rightarrow \infty$ 时, 该类型即化为各向同性的 King 模型。

Kent 和 Gunn 对四种分布函数分别计算出了面密度 $\mu = \mu(r)$ 和速度弥散度 $\sigma = \sigma(r)$, 并将 Coma 团的观测结果与具体构造的模型作了拟合。拟合结果如下:

(1) 对 King-Michie 分布来说, 各向同性的 King 模型与 Coma 团的观测结果拟合得令人惊奇地好。而当角动量存在时, 拟合得到的 r_t 相当大 (≥ 10), 也即 J_0 相当大, 因此对于中心区域, 各向异性的存在与否对拟合的质量没有大的影响。

(2) 对于分布函数取 f_2 的幂律分布, 面密度轮廓可以拟合得很好, 但速度轮廓则完全不对。

(3) 在分布函数取 f_3 和 f_4 时, 面密度和速度的拟合结果都很好, 对 r 的限制则不是很严。

如此看来与 Coma 团拟合最好的模型是 f_3 和 f_4 , 另外还有各向同性的 King 模型。但是 Kent 和 Gunn 指出有两点需要说明: (1) 他们只是提出了分布函数所有可能的形式, 并没有指出哪种正确; (2) 他们的模型所取的半径与 Coma 团相比都太大, 而事先作的动力学平衡假定在远大于中心区的范围显然是不成立的。

Kent 和 Gunn 的结果与 Peebles^[31] 等人的 N 体模拟结果是有矛盾的。Peebles 等人的结果倾向于 f_1 模型, 而 Kent 和 Gunn 的则倾向于 f_3 模型。另外, Kent 和 Gunn 还发现 N 体模拟所产生的密度轮廓与 Coma 团的观测结果相差很大。

5 Coma 团中的次团结构

次团结构是星系团研究中近来较受重视的一个研究内容, 它与星系团的动力学演化问题密切相关。很长一段时期以来, 人们通常认为 Coma 团作为富星系团是经过充分弛豫的。近年来由于次团结构的发现, 许多学者对此提出了质疑。如果 Coma 团像通常所认为的那样, 中央部分处于动力学平衡状态, 在结构上则应表现出符合能量均分的质量、光度分层, 而不应该出现次团这样的不均匀结构。

目前对 Coma 团的次团结构研究的问题, 不同学者得到的结论有所不同, 这主要是不同学者采用不同的统计模型和方法造成的。因此, 寻找更为合理的统计模型和统计方法, 成为对 Coma 团研究的极为重要的一部分。

80 年代后期, Fetchett 和 Webster^[32] 用 Lee 函数方法对 Coma 团的次团结构作了讨论。他们同时考虑了星系的面密度分布和视向速度两种因素, 但他们的成员判别方法还很不严格。据此他们得到在 Coma 团中心区存在两个次团结构。具体结果如表 3 所示。

表 3 Coma 团中心区次团结构的分布参数 (1)

次团	N	$V(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
次团 A	30	7230	± 880
次团 B	24	6410	± 1240

赵君亮等人^[33]于 1992 年至 1993 年间也对 Coma 团的次团结构进行了讨论。他们利用 Kent 和 Gunn 提供的视向速度样本对 Coma 团中的星系建立了合理的数学模型,并用最大似然原理对 Coma 团进行了成员判定及次结构的分析。具体结果如表 4。

表 4 Coma 团中心区次团结构的分布参数 (2)

次 团	N	$V(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
次团 1	39	7234	± 886
次团 2	10	6410	± 1240

近年来,通过对 X 射线资料的分析也发现次团结构存在的证据,如前面提到的 Watt 等人在 X 射线波段上发现了 Coma 团的西南方向的剩余辐射区,这即是 Coma 团内存在次团结构的证据之一。

1992 年 Briel^[34]等人利用 ROSAT 卫星的观测资料再次肯定了 Coma 团中次团结构的存在。他们发现在 Coma 团中的 NGC4839 和 NGC4911 区存在着显著的弥漫 X 射线剩余辐射区。

多种证据表明, Coma 团中确实存在着次团结构。

6 近期研究动态

近年来对星系团的研究,包括对 Coma 团的研究,主要集中在 X 射线波段,而次团结构的存在与否则又是该波段研究中的一个热点问题。

80 年代初,首次采用成像技术的 Einstein 卫星就对 Coma 等星系团进行了细致的观测^[35]。观测给出包括 Coma 团在内的 53 个星系团的 X 射线流量、辐射中心和 X 射线核半径。Frank 等人利用这些观测资料,从团的结构和演化学角度对 X 射线波段的物理量和光学及射电波段的物理量间的相关性作了讨论,结果与星系团

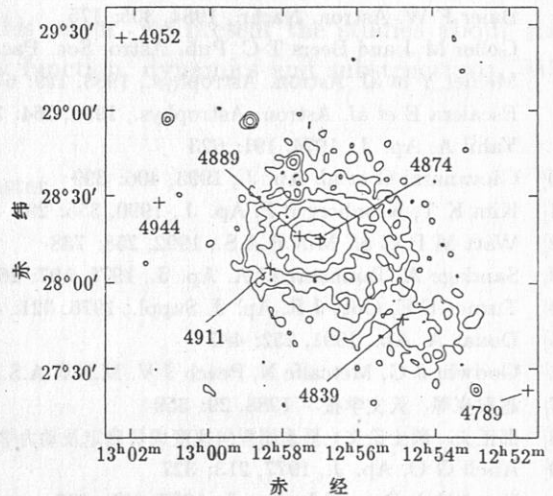


图 4 Coma 团在 0.5—2.4keV 波段的等强度图^[8]

X 射线辐射的热致致辐射模型吻合得很好。Frank 和 William 还对星系团的 X 射线光度函数作了计算,结果显示在 0.5—4.0keV 的软 X 射线波段,星系团贡献的 X 射线辐射占该能段 X 射线辐射的 10%。

EXOSAT 升空之后也对 Coma 团进行过观测^[36]。观测使用了卫星上的 ME 探测器,观测区域包括 Coma 团的中心区以及远离中心区表面亮度较暗的 3 个区域。

1991 年 ROSAT 卫星升空之后在其全天巡天过程中也对 Coma 团进行了观测^[8]。利用对位置敏感的正比计数仪 (PSPC), ROSAT 对 Coma 团进行了时长为 850s 的观

测。为避免 X 射线背景辐射的局域性变化, Escalera 等人将数据分析限制在 0.5—2.4keV 能段进行。考虑红化效应之后, 在 105" 的范围内, 该能段的计数率为 $10.5\text{cts}\cdot\text{s}^{-1}$, 相应的辐射流量为 $2.4 \times 10^{-10}\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 4 给出了根据 ROSAT 卫星的观测数据绘出的表面亮度等强度图。结果发现 Coma 团中确实存在着次团结构, 同时发现 NGC4839 星系群似乎正处在与 Coma 团主体的融合状态之中。

1994 年 Escalera 等人对星系团的次团结构进行了进一步的研究^[37]。通过对 16 个有次团结构的星系团的统计分析, Escalera 等人认为按照三维空间(位置和速度空间)中次团结构的分布, 星系团可以分为两类: 单峰类和双峰类。Escalera 等人对其中三个团的动力学研究表明团中的基本特征量, 尤其是位力质量, 并不因为有次团结构的存在而明显地偏离平衡态, 因此, 次团结构的存在与动力学平衡态之间的关系还值得更进一步的研究, 这是目前关于次团结构的一种新看法。

参 考 文 献

- [1] Abell G O. *Ap. J. Suppl.*, 1958, 3: 211
- [2] Kent S M, Gunn J E. *A. J.*, 1982, 87: 945
- [3] Fernley J A, Bhavsar S P. *M.N.R.A.S.*, 1984, 210: 883
- [4] Godwin J G, Peach J V. *M.N.R.A.S.*, 1977, 181: 323
- [5] Baier F W. *Astron. Nachr.*, 1984, 305: 175
- [6] Geller M J and Beers T C. *Pub. Astro. Soc. Pac.*, 1982, 94: 421
- [7] Mellier Y *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1988, 199: 67
- [8] Escalera E *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1992, 264: 379
- [9] Yahil A. *Ap. J.*, 1974, 191: 623
- [10] Giovannini G *et al.* *Ap. J.*, 1993, 406: 399
- [11] Kim K T, Kronberg P P. *Ap. J.*, 1990, 355: 29
- [12] Watt M P *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1992, 258: 738
- [13] Sandage A, Tammann G A. *Ap. J.*, 1975, 197: 265
- [14] Turner E E, Gott J R. *Ap. J. Suppl.*, 1976, 321: 409
- [15] Donas A. *Ap.*, 1991, 252: 487
- [16] Godwin J G, Metcalfe N, Peach J V. *M.N.R.A.S.*, 1983, 202: 113
- [17] 赵君亮等. *天文学报*, 1988, 29: 359
- [18] 邵正义. 硕士论文: 星系团视向速度成员确定及动力学性质研究, 上海: 中国科学院上海天文台, 1993
- [19] Abell G O. *Ap. J.*, 1977, 213: 327
- [20] Rood H J, Page T L. *Ap. J.*, 1977, 175: 627
- [21] Schechter P. *Ap. J.*, 1976, 203: 297
- [22] Lugger P M. *Ap. J.*, 1986, 303: 535
- [23] Rood H J, Page T L, Kintner E C *et al.* *Ap. J.*, 1972, 175: 627
- [24] Mazure A, Proust D, Mathez G *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1988, 76: 339
- [25] Zwicky F. *Helvetica Physica Acta.*, 1933, 6: 110
- [26] Zwicky F. *Morphological astronomy*. Berlin: Springer-Verlag, 1957. 142
- [27] King I R. *A. J.*, 1966, 71: 64
- [28] Michiel P, van Haarlem, Laura Cayon. *M.N.R.A.S.*, 1993, 264: 71
- [29] Quintana H. A. J., 1979, 84: 15
- [30] Sarazin C L. *Ap. J.*, 1980, 236: 75

- [31] Peebles P J E. A. J., 1970, 75: 113
 [32] Fitchett M, Webster R. Ap. J., 1987, 317: 653
 [33] 赵君亮等. 天体物理学报, 1993, 13: 116
 [34] Briel U G, Henry J P, Bohringer H. Astron. Astrophys., 1992, 259: L31
 [35] Frank A *et al.* Ap. J., 1983, 271: 446
 [36] Gorenstein P *et al.* Bull. of Am. Astron.Soc., 1986, 18: 1015
 [37] Escalera E *et al.* Ap. J., 1994, 423: 539

(责任编辑 舒似竹)

Recent Progress of the Studies of Coma Galaxy Cluster

Tian Kaiping Shao Zhengyi Huang Weihong

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

Abstract

Coma, which is the nearest one to us, is a typical regular rich galaxy cluster. Over the years, various observational data of this cluster have been collected, and many problems have been discussed in depth. In this paper, we present the studies about the Coma's membership, structure, luminosity function, dynamics and substructures. We also introduce the focus of recent studies.

Key words galaxies: clusters: Coma cluster