

致密星系群的起源^{*}

俞允强

(北京大学物理系和中国科学院 北京大学北京天体物理中心, 北京 100871)

马 强

(北京天文台、中国科学院 北京大学北京天体物理中心, 北京 100080)

摘要 致密星系群可以在很短的时间尺度内因多次并合而显著改变其结构. 据此判断其形成应很晚. 但小扰动因引力不稳定而形成天体的结构形成理论要求高密度天体形成较早. 通过对这一表观矛盾的分析, 论证了若星系有冷暗物质暗晕, 则暗晕的并合在致密星系群形成中起着关键作用. 它不仅推迟了致密星系群的形成, 而且加大了星系群的密度.

关键词 结构形成 致密星系群 星系的并合

近年来, 致密星系群中的星系多次并合现象引起了人们的重视^[1~4]. 相关的模型计算表明, 这类星系群中发生多次并合的时间尺度为其穿行时间的若干倍^[5]. 致密星系群中星系的穿行时间短至 0.1 Ga 的量级, 因此模型计算结果与多次并合能被观测到的事实是相洽的.

从另一个角度看, 多次并合所需的时间仅为几个 0.1 Ga, 说明致密星系群应形成得很晚. 粗略地说, 它形成时的回顾时间应只有 1 Ga 的量级, 否则, 星系群中多次并合阶段应已经结束了. 但是这结果与宇宙学的简单估算却是冲突的.

按宇宙学的物质结团理论, 各种不同质量尺度的小扰动将通过引力不稳定性得到发展, 直至演化成一个维里平衡的自引力系统. 由球对称扰动模型计算, 这种平衡系统的形成时间 t_v (或形成红移 z_v) 只依赖于由原初扰动幅度所决定的 $\delta = (\rho/\rho)_1(1+z_1)$, 其中 z_1 是扰动线性增长阶段的任一时刻 t_1 相应的红移, $(\rho/\rho)_1$ 是该时刻该尺度中的密度反差. 另一方面, 所形成平衡系统的平均密度 ρ_v 也由 δ 决定^[6]. 在消去 δ 后得到, 系统的形成红移与其平均密度成正比. 这就是说, 密度较大的系统必定形成得较早. 如果这种系统的密度在达到维里平衡后不再变化, 我们就可以用它的实测密度来估算它的形成时间.

以星系群的密度作估计, 它们的形成红移 $z_v < 1$, 即它们是很晚近形成的客体. 致密星系群的平均密度显著超过星系团. 按其穿行时间短至 0.1 Ga 估算, 它们的形成红移高达 $z_v \approx 10$, 即它们形成时的回顾时间为 $t_v \approx 10$ Ga. 这比上面的估计高出了一个量级. 这就构成了我们要重新讨论致密星系群起源的动机.

本文将从冷暗物质为主的宇宙模型来讨论. 在这种图景下, 星系群形成的第一步发生在冷暗物质与重子物质分离之前, 所形成的是由冷暗物质为主的团块构成的前身星系群. 此后有 2 种过程的竞争. 一是各团块中重子物质的再收缩和恒星的形成, 冷暗物质成了明亮星系的暗晕. 二是团块间的碰撞并合. 对前一个过程, 人们还难以做认真的讨论. 无论如何, 对于今天实际存在的星系群讲, 恒星形成应发生在其冷暗物质暗晕的并合之前. 而后, 暗晕的碰撞并合是不可避免的. 由于明亮星系的尺度比相应的冷暗物质团块小很多, 所以冷暗物质晕并合几率比星系大很多. 因此, 不管在暗晕并合前或后, 这系统的可观测部分都将表现为星系群.

对某些形成较早的前身星系群, 系统中的冷暗物质团块在时间允许的情况下, 将在今天以前已并合成一个大团块, 即较密星系群已具有公共的冷暗物质暗晕. 在暗晕的并合过程中, 星系将随之靠近. 并合后, 星系群将在公共暗晕的引力作用下重新维里化. 群的表现密度还会进一步加大. 因此, 有公共暗晕的星系群的致密程度比暗晕并合前会有显著的提高.

在宇宙演化的意义上, 今天只是演化过程中的一个特定时刻. 在这时刻, 有的星系群的暗晕已公共化, 而有的却还来不及完成暗晕的并合. 这样使我们看到了致密度不同的两类星系群. 暗晕未及并合的应是多数, 它被当作正常的星系群. 而具有公共暗晕的, 即被看成是特殊的致密星系群.

按上面的描述, 致密星系群的形成时刻, 应理解为它在公共暗晕中重新达到维里平衡的时刻. 这形成时间比简单描述所示的显然要晚. 我们期望, 这样能自然地解决前面指出的矛盾. 定量的模型计算表明, 若相应的原初扰动幅度合理地较大, 星系的暗晕来得及并合, 所形成的星系群将会达到观测到的致密星系群的密度; 而其形成时间也会足够晚, 以致其中的星系多次并合正是今天在进行中的过程, 而不是已完成的过程.

1 多次并合的数学模型

我们曾讨论过自引力系统中的多次并合问题^[7]. 现在把它推广到有公共暗晕的情形. 设成员星系的个数为 N , 总质量为 M , 总动能为 K 及其维里半径为 R . 作为简化, 假定暗晕物质是均匀分布的. 这样, 相应的动力学演化方程有形式

$$\frac{1}{4} \frac{d^2(R^2)}{dt^2} = \frac{K}{M} - \frac{1}{2} \frac{a_1 GM}{R} - \frac{1}{2} \frac{GM_h}{R_0} \left(\frac{R}{R_0} \right)^2, \quad (1)$$

式中的 R_0 是星系系统的初始维里半径, M_h 是 R_0 内暗晕的总质量. a_1 是自引力位能的形状因子. 在文献[7]的附录中已证明, 并合阶段的耗散力对维里的贡献可不计入. 令每一次并合的机械能损失与星系平均动能之比为 a_2 , 由能量守恒方程给出

$$\frac{dK}{dt} = a_2 \frac{K}{N} \frac{dN}{dt} - \frac{d}{dt} \left(-\frac{a_1 GM^2}{R} + \frac{GM_h M}{2R_0} \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \right), \quad (2)$$

因并合而导致星系数变化的方程是

$$\frac{dN}{dt} = - \left(\frac{1}{2} \right) \frac{N^2}{a_3 R^3} a_4 \sigma \left(\frac{2K}{M} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中的 σ 是星系的并合截面, $a_3 R^3$ 代表系统的总体积, a_4 是星系的相对速度与平均速度之比. (1)~(3)式就是我们求解星系多次并合中 $R(t)$ 和 $N(t)$ 演化的方程组. 如果把暗晕的贡

献(即(1)和(2)式右边最后一项)略去, 他们即可被用来处理早期的冷暗物质团块的并合过程.

上述方程组中涉及很多输入参量. 为此, 我们用与文献[7]同样的方法作无量纲变换. 引入时间尺度 t_0 , 相应的无量纲变量定义为

$$\tau = t/t_0, \quad (4)$$

$$y_1 = (R/R_0)^2, \quad (5)$$

$$y_2 = dy_1/d\tau, \quad (6)$$

$$y_3 = N/N_0, \quad (7)$$

$$y_4 = 4(K/M)(t_0/R_0)^2, \quad (8)$$

其中的 N_0 为并合开始时的星系个数. 在引用无量纲变量后, 上述方程组改写为

$$dy_1/d\tau = y_2, \quad (9)$$

$$dy_2/d\tau = y_4 - \beta y_1^{-1/2} - y_1 \quad (10)$$

$$dy_3/d\tau = -\Sigma_0 y_3^2 y_1^{-3/2} y_4^{1/2}, \quad (11)$$

$$dy_4/d\tau = -a_2 \Sigma_0 y_3 y_4^{3/2} y_1^{-3/2} - \beta y_1^{-3/2} y_2 - y_2. \quad (12)$$

在导出(10)式时, 为使右边第 2 项的系数为 1, 要求 R_0 和 t_0 满足关系

$$2t_0^2 a_1 GM_h = R_0^3. \quad (13)$$

这样定义的 t_0 相当于星系在系统中的穿行时间. 式中的待定参量为 β , a_2 , Σ_0 , 其中

$$\beta = a_1 M/M_h. \quad (14)$$

它大体上是发光物质与冷暗物质的质量比. 其中的 Σ_0 定义为

$$\Sigma_0 = (2^{-3/2} a_4/a_3)(N_0 \sigma/R_0^2). \quad (15)$$

它相当于各星系的并合反应截面之和与系统截面积之比. a_2 的数值是各种并合情况中动能损失的统计平均. 以平均速度正面对碰而并合时, $a_2 = 2.0$, 以相近速度尾追并合时, a_2 会较小.

我们将把并合发生前的系统看成已达到维里平衡, 这样, 初条件都是自然的, 用无量纲量表示, 它们是

$$y_1(0) = y_3(0) = y_4(0) = 1,$$

$$y_2(0) = 0. \quad (16)$$

当讨论早期冷暗物质团块系统中的并合过程时, 上述方程组(1)~(3)仍适用, 只需令 $M_h=0$ 即可. 在无量纲化时, 我们将保留定义(4)~(8)及(14)式, 而令 t_0 满足

$$2t_0^2 a_1 GM = R_0^3. \quad (17)$$

这里 t_0 仍保持穿行时间的意义. 相应的无量纲方程不再重新写出.

2 并合的时间尺度及致密度的变化

我们首先感兴趣的是 N 个冷暗物质团块构成的平衡系统并合成一个公共暗晕所需的时间. 但上述方程组的近似性, 使它不适用于 N 接近于 1 的情形. 为此我们计算从 $N=N_0$ 到 $N_0/5$ (即 $y_3=1$ 到 $1/5$) 所需的时间 $\tau_{1/5}$.

计算前需要先输入参量 Σ_0 和 a_2 的值. 由于难以现实地估算他们的大小, 只能把它们当

任意参量处理, 并在较宽的范围内试算.

图 1 示出 $\tau_{1/5}$ 对 Σ_0 依赖并系, 相应的 a_2 值取了 0.25, 0.5, 1.0 和 1.5. 粗略地说, 当 $a_2 \geq 0.5$ 和 Σ_0 不小於 0.2 时, 这样的并合需要的时间是原初穿行时间的 6 倍以下. a_2 小至 0.25 且 Σ_0 也取值较小时, 并合时间随 Σ_0 的下降而迅速增大. 其次, 我们想知道在充分并合后, 系统的平均密度增大了多少. 为此我们计算了从 $N=N_0$ 到 $N_0/5$ 时系统平均尺度 $(R/R_0)_{1/5}$ 的大小. 图 2 在同样参量下示出了平均密度 $(R_0/R)_{1/5}^3$ 对 Σ_0 依赖关系. 从这里看出, 当 a_2 较大时, 冷暗物质团块系统并合成一个公共暗晕后, 它的平均密度将增大数 10 倍以上. 当 a_2 较小时, 平均密度的变化只有几倍至一个量级左右.

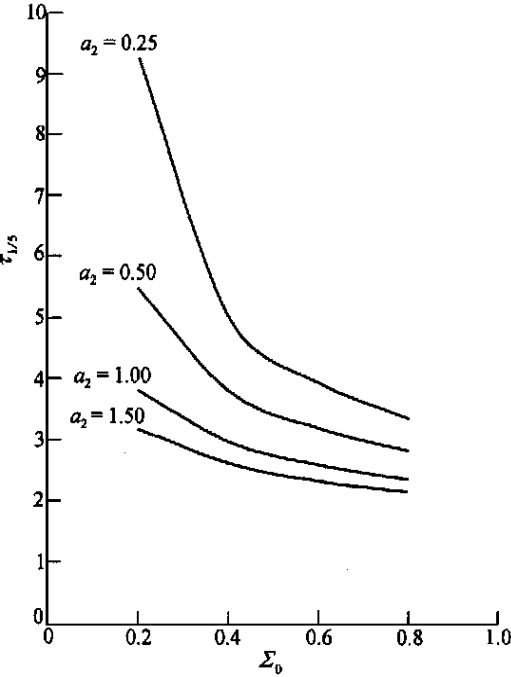


图 1 星系数目减至 1/5 的时间 $\tau_{1/5}$ 与 Σ_0 的关系

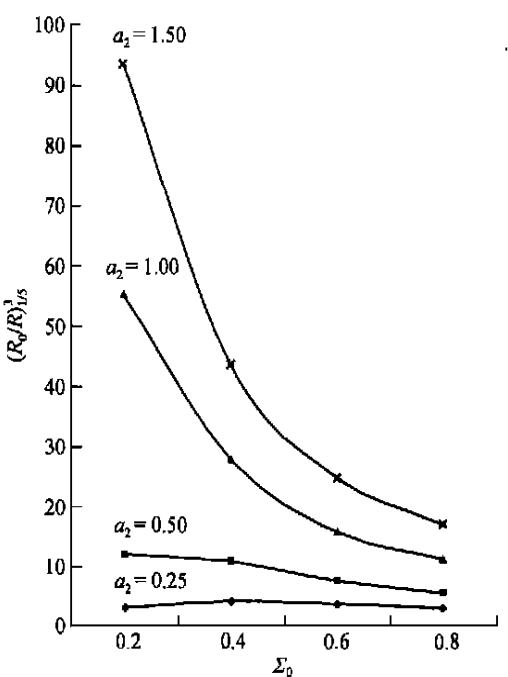


图 2 星系数目减至 1/5 时系统平均密度的无量纲数值 $(R_0/R)_{1/5}^3$ 与 Σ_0 的关系

在公共暗晕形成后, 星系将在暗晕的引力场中重新维里化, 并继续开始星系的并合. 对这阶段我们感兴趣于明亮星系发生多次并合所需的时间尺度, 及星系群致密度的演化幅度.

在冷暗物质为主的标准模型下, 人们假定宇宙密度 $\Omega_0 = 1$, 而重子物质的贡献为 $\Omega_b \approx 0.1$. 因此在我们的计算中采用 $\beta = 0.1$. a_2 则只取 0.5, 1.0 两种情况. 图 3 中示出星系数目减少一半所需的时间 $\tau_{1/2}$ 随 Σ_0 的变化. 图 4 中画的是星系系统的尺度 R/R_0 在并合过程中的收缩. 从计算结果看到, 多次并合时间仍是穿行时间的几倍, 而系统的尺度收缩则较数目的减少要缓慢. 这是公共暗晕的引力比星系间的自引力更重要的后果. 对我们的问题讲, 这意味着星系群致密度的提高主要在暗晕的并合阶段, 而不是由于星系本身的并合. 同时我们注意到, 在并合过程中, 星系群并不保持维里平衡, 因此穿行时间的缩短也变缓慢了.

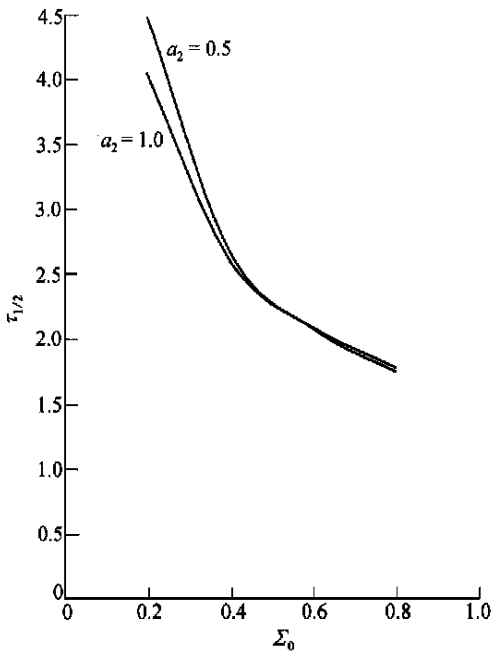


图 3 公共暗晕中星系数目减半时间 $\tau_{1/2}$ 与 Σ_0 的关系

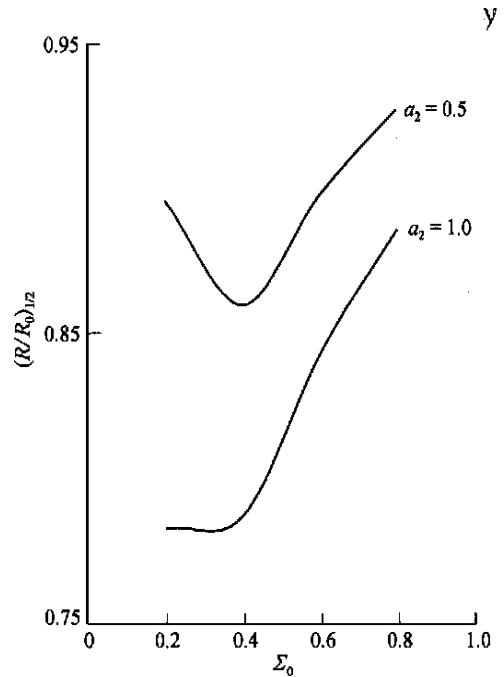


图 4 公共暗晕中星系数目减半时的系统尺度 $(R/R_0)_{1/2}$ 与 Σ_0 的关系

3 致密星系群与正常星系群的区别

由上面的模型计算看到, 对今天的星系集团, 其暗晕尚来不及充分并合或已并合成公共暗晕, 它们的可观测量会有显著的差别. 后者的平均密度比前者会高出数倍至数十倍. 与现实存在的天体相对照, 我们认为, 已形成公共暗晕的较密星系集团应被认证为致密星系群, 而暗晕尚未充分并合的集团则表现为正常星系群或星系团. 下面我们按这样的图景来讨论致密星系群的形成过程及其应具有的性质.

星系群最初无疑起源于原初均匀介质中相应尺度的小扰动. 如已指出, 当扰动处于线性增长阶段, 扰动强度可用 $\delta = (\Phi/\rho)_1(1+z_1)$ 来描述. 设这扰动发展到 t_v 时, 系统达到了自引力下的维里平衡. 这就应是前身星系群的形成. 它的成员是星系的冷暗物质晕. 这平衡系统的形成红移 Z_v , 形成时的回顾时间 t_{lb} 都由扰动强度 δ 决定. 暗晕块在系统中的穿行时间 t_0 (由(17)式定义) 取决于系统的密度, 因此也被扰动强度 δ 决定. 按球对称扰动演化模型, 对我们有用的关系为^[6]

$$1 + Z_v = \delta^{-1.69}, \quad (18)$$

$$t_0 = 3.19 / \delta^{1.5}. \quad (19)$$

$$t_{lb} = 13.5 * (1 - 2.20 / \delta^{1.5}), \quad (20)$$

(19)与(20)式中的时间均以 Ga 为单位.

随后, 星系暗晕将在无序运动下发生并合. 并合成公共暗晕所需的时间取决于 Σ_0 及 a_2 ,

这是两个无法确切知道的参量. 若取 $\Sigma_0 = 0.2 \sim 0.8$, $a_2 = 0.5 \sim 1.0$ 的范围内, 并由星系数目减至 $1/5$ 的时间 $\tau_{1/5}$ 为充分并合所需的时间的下限. 那么由上节计算的图 1 看, 并合时间的下限是穿行时间的 $2.5 \sim 5.5$ 倍. 为了使这样的并合发生在今天之前, 就要求 $t_b/t_0 \geq (2.5 \sim 5.5)$. 图 5 中示出 t_b/t_0 随 δ 的变化.

由此看出, 要求 $t_b/t_0 \geq 2.5 \sim 5.5$ 意味着 $\delta \geq 2.1 \sim 2.6$. 按标准冷暗物质模型来估算, 取 Bardeen 等人对原初扰动谱的计算公式^[8], 并取扰动谱偏袒因子 $b_8 = 1.68$, 设星系群平均质量为大星系的 100 倍, 形成致密星系群所需的扰动幅度与平均扰动幅度之比为 $v \equiv \delta/\sigma \geq 1.6 \sim 2.0$. 这表明致密星系群是较高峰扰动形成的天体, 因而它们显著地少于正常的星系群.

从图 2 看, 当 a_2 较大时, 冷暗物质团块系统并合成一个公共暗晕后, 它的平均密度将增大数 10 倍以上. 由于穿行时间反比于密度开根, 成员星系在暗晕中的穿行时间将缩短 $6 \sim 10$ 倍. 并合前原来的穿行时间由扰动幅度决定. 由 $\delta = 2.1 \sim 2.6$ 代入 (19) 式算出, 这穿行时间约为 $1 \sim 0.76$ Ga, 因此, 公共暗晕形成后的致密星系群的穿行时间可达 0.1 Ga 左右. 由上面对具有公共暗晕的系统中的并合计算 (见图 3), 多次并合的时间仍为穿行时间的几倍, 即几亿年. 这些结果都能与观测事实相洽. 这对我们所描绘的关于致密星系群的形成图景是一个支持.

当 a_2 取值偏小时, 晕并合过程中动能损失较小, 由图 1 和图 2 可以看出, 当 Σ_0 也取值较小时, 并合时间下限随 Σ_0 的下降而迅速增大, 只有幅度更高的原初扰动才来得及并合. 即使 Σ_0 较大, 并合时间下限不长, 但公共暗晕形成时密度的增大也有限. 看来, 形成公共暗晕的星系群在 a_2 取值较小时不一定都非常致密.

对于正常星系群和星系团, 我们认为他们的平均密度较低是他们的暗晕尚未充分并合的反映. 而这又是它们的原初扰动较小的后果. 例如看星系群或更大尺度的系统. 若原初扰动幅度 $\delta \leq 1.9$ (相应的星系群扰动幅度为平均扰动幅度的倍数为 $v \leq 1.5$) 的情形. 这种系统中的成员晕块达到维里平衡时的回顾时间约为 2 Ga, 它仅是穿行时间的 1.8 倍. 因此在这种系统中暗晕来不及公共化, 星系的多次并合也会是难以观测到的.

4 讨论和评注

虽然我们今天还没有一个可靠的宇宙结构形成理论, 但是近 20 年来的进展十分显著. 人们意识到, 为了使理论上形成的结构能与从星系到星系团尺度上的观测事实相符, 非重子暗物质, 特别是冷暗物质的存在是需要的. 本文对星系群起源的研究, 实际上是进一步支持了这一观点. 但是, 当采用冷暗物质为主要组分的模型时, 理论上出现的物质结团如何与观测事实相对应? 这是一个至今并不清楚的问题.

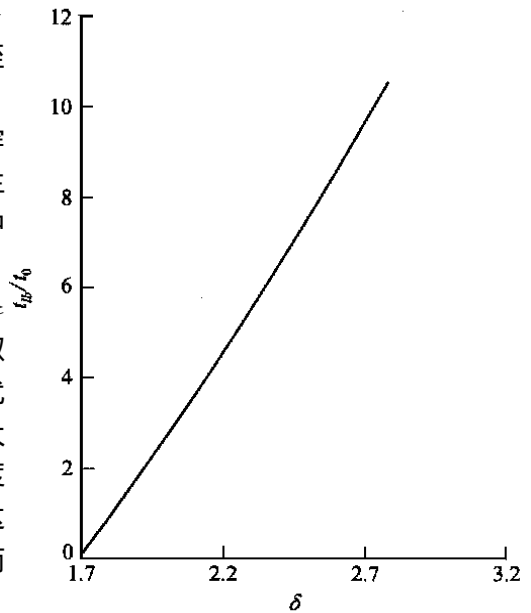


图 5 t_b/t_0 与 δ 的关系

无论如何, 首先由原初扰动演化而成的系统是冷暗物质和重子物质尚未分离的团块, 而不是可观测的星系或星系集团. 我们在本文中想强调的是: 团块不可避免地要并合; 虽然这种并合并不直接可观测, 但它对系统的可观测性质会有显著的影响.

这里的关键是时间问题, 即并合是否能在今天之前发生的问题. 由于从星系群尺度原初扰动发展到结团是晚近的事, 所以暗晕的并合是正在或将要发生的过程. 因此, 对星系团及星系团以上的尺度, 今天观测到的现象应接近理论上的原初扰动的直接产物. 而星系群尺度的结团正好是体现并合效果的合适的对象. 由于定量的处理涉及若干不确定的因素, 我们的工作只具有半定量的意义. 无论如何, 它说明了观测到的星系群有可能不是原初扰动的直接产物. 如在引言中已提到, 若把它当作原初扰动的直接产物, 理论与实际是有矛盾的.

我们所研究的是星系集团而不是星系本身. 要是并合过程对实际星系群的形成有效果, 那么它对星系本身的形成也会有不可避免的影响. 但是从原初扰动的直接产物到实际的物质结团, 有许多可能的中间过程. 对星系以上的尺度, 并合应是主要的. 而对星系本身, 重子物质与冷暗物质的分离及恒星的形成可能是更重要的过程. 因此星系形成问题是越出了本文的视野的.

参 考 文 献

- 1 Hickson P, De Oliveira C M, Huchra J P, et al. Dynamical properties of compact groups of galaxies. *Ap J*, 1992, 399: 353
- 2 Zepf S E. The frequency of mergers in compact groups. *Ap J*, 1993, 407: 448
- 3 Xia X Y, Boller T, Deng Z G, et al. Soft X-ray properties of Ultra-luminous TRAS Galaxies. *Astrophysics Reports*, 1997, (2): 166
- 4 Zou Z L, Xia X Y, Deng Z G, et al. IRAS 23532+2513: a compact group including a seyfert 1 and a starburst galaxy. *A&A*, 1995, 304: 369
- 5 Bames J. Evolution of compact groups and the formation of elliptical galaxies. *Nature*, 1989, 338: 123
- 6 Evrard A E. Testing origins of hubble sequence. *Ap J*, 1989, 341: 26
- 7 马 , 陈 时, 俞允强. 星系多次并合的解析模型. *天体物理学报*, 1998, 18: 361
- 8 Bardeen J M, Bond J R, Kaiser N, et al. The statistics of peaks of Gaussian Random fields. *Ap J*, 1986, 304: 15