

高红移 Lyman Break 星系

束成钢 姜佩芳

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

(中国科学院光学天文联合开放实验室上海基地 上海 200030)

摘 要

总结了到目前为止用所谓 Lyman Break 方法 (亦称为 UV drop 方法) 观测得到的高红移 ($z \approx 3$) Lyman break 星系的观测特征, 包括光度函数、半光度半径分布、空间密度及成团性、恒星速度弥散、超星风及大尺度气体团块运动和金属丰度等。还对其目前的理论工作做了综合介绍, 对当前两种主要模型进行了评述并提出了作者的个人观点。

关键词 星系形成和演化 — 高红移亮星系 — 观测和理论

分类号 P157

1 引 言

先进的观测手段、大量的观测资料以及理论的深入发展使得星系形成和演化成为当今天体物理研究的主攻方向。由于高红移星系直接提供了有关星系形成演化的早期物理特征, 该方面的研究已成为热点。目前有两类高红移亮星系对了解星系的形成和演化起了关键作用。一类是用所谓的 Lyman break 方法通过颜色选所得的高红移 Lyman break 星系; 另一类是河外强的亚毫米源, 如由 JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) 上的 SCUBA 观测得到的亚毫米源。这些高红移亮星系最主要的特征是激烈的恒星形成。目前宇宙中的恒星有相当一部分是在这两类高红移亮星系中形成的。本文将对 Lyman break 星系的观测和研究作一综合评述。

2 Lyman break 星系的观测特征

Steidel、Pettini 和 Hamilton^[1] 在 1995 年用所谓的 Lyman break 方法成功地观测到红移 $z \approx 3$ 的亮星系。图 1 给出了该方法的原理图。图 1(a) 是一个红移 $z = 3$ 的亮星系对于观测者而言的光谱能量分布 (SED)。由于该星系中存在大量的中性氢, 这就使得能量高于 Lyman 极

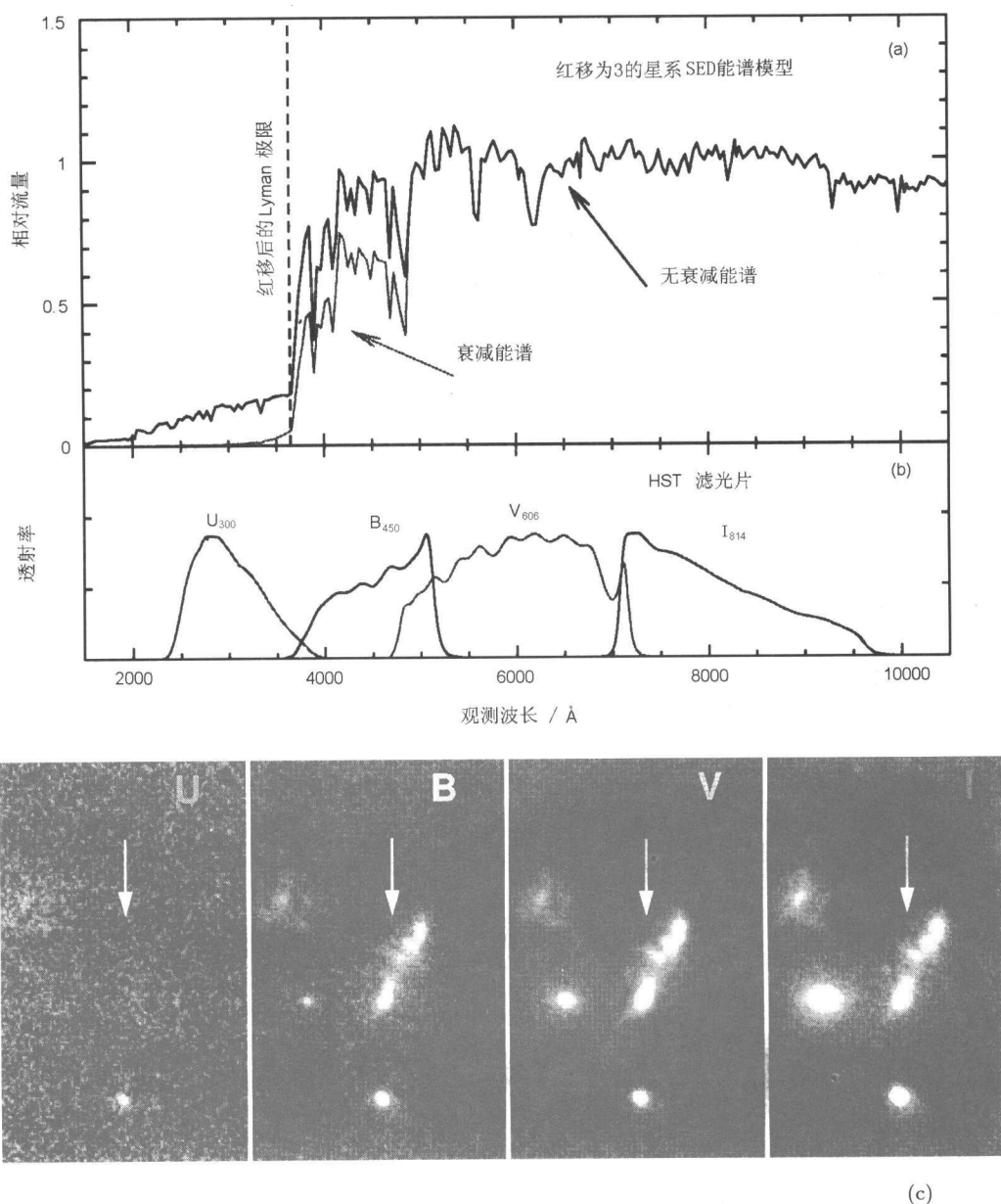
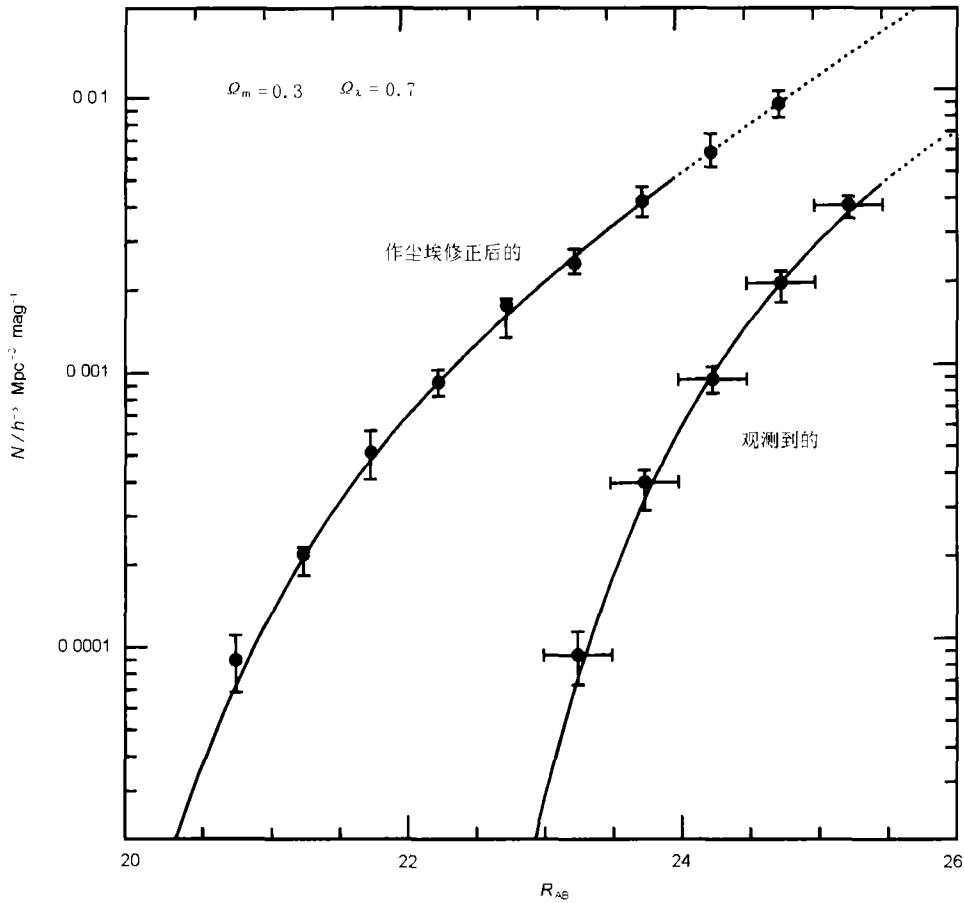


图 1 Lyman break 方法对高红移 ($z \approx 3$) 亮星系观测的原理图 [2]

限 (912\AA) 的光子大量地被吸收, 因而该星系的 SED 在其 Lyman 极限处有一个非常明显的间断。这是称其为 Lyman break 星系 (以下简称 LBG) 的原因。大量的气体使得这类星系有相当高的恒星形成率, 因而它们的 UV 辐射非常强。图 1(b) 给出的是哈勃望远镜 (HST) 的各个滤光片的工作波长以及对应的透射率。由图 1(c) 则可知, 这样一个在红移 $z = 3$ 的 LBG 不可能被 HST 在 U 波段上观测到, 而在 B、V、I 波段则能被观测到。反之, 一个星系如果只能被 HST 在 B、V、I 波段上观测到, 而不能在 U 波段上被观测到, 这个星系的红移 $z \approx 3$ 。这种方法也称为 UV-drop 方法。当然, 星系红移的准确值仍需由地面大望远镜进行光谱观测来确定。

图 2 LBGs 的光度函数^[3]

Lyman break 方法对寻找高红移 ($z \approx 3$) 的亮星系非常有效。到目前为止, 已找到 1000 多个这类星系, 它们的红移值亦被进一步的光谱观测所证实。目前 LBGs 样本的完备视星等在 R 波段大约是 25.5mag。对于红移 $z \approx 3$ 的星系, 本地观测的 R 波段光度对应于该星系的 UV 光度, 而 UV 光度与恒星形成率成正比。但要得到真实的恒星形成率, 必须作尘埃修正。特别是对于 LBGs, 高的恒星形成率伴随着严重的尘埃消光。Adelberger 和 Steidel^[3] 在 2000 年经过复杂的理论工作, 结合 UV、FIR、Sub-mm 以及射电的观测, 得出对于 LBGs, 平均的尘埃修正因子在 UV 波段大约是 5。一般而言星系越亮, 其尘埃修正越大 (修正后的光度函数见图 2)。而事实上作尘埃修正是一项十分困难的工作, 因为尘埃的消光作用随星系的不同而不同, 而且在一个星系内部, 不同的恒星形成区都是不一样的。具体可见文献 [3]。在完成复杂的尘埃修正后, 根据 UV 光度与恒星形成率之间的关系, 可知道一个典型的红移 $z \approx 3$ 的 LBG, 在带宇宙学常数的平直宇宙 ($\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 亦称为 Λ 宇宙学) 中的恒星形成率大约是 $50 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 。图 2 给出了 LBGs 观测及经过尘埃修正后所得的光度函数。实线部分是观测星等 R 亮于 25.5mag 的 LBGs, 这部分亮的 LBGs 主要是

由地面的大望远镜 (如 Keck 和 VLT) 观测所得。目前认为其样本是较为完备的。虚线是暗于 25.5mag 的 LBGs。这部分 LBGs 主要是由 HST 观测所得。由于 HST 的视场过小, 其观测结果则可能由于 LBGs 强的空间成团性而产生选择效应。从光度函数上可见, LBGs 的共动空间密度是很高的, 在通常的 Λ 宇宙学中约可达 $2 \times 10^{-3} h^3 \cdot \text{Mpc}^{-3}$, 与本地亮星系的密度相当 (其中 $h = H_0/100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$)。并且, 从 LBGs 的光度函数可知, 有一部分 LBGs 的恒星形成率可高达 $500 M_{\odot}/\text{yr}$ 以上。

除了激烈的恒星形成外, LBGs 在空间大小上是非常致密的。Giavalisco 等人^[4]和 Lowenthal 等人^[5]用 HST 对 R 波段亮于 25.5mag 的 45 个 LBGs 进行观测, 得到了它们的半光度半径分布, 在 Λ 宇宙学中其中值为 $1.5 h^{-1} \cdot \text{kpc}$ 。该数值比本地通常星系的半光度半径小得多。图 3 给出了目前得到的这 45 个 LBGs 半光度半径对数分布的直方图, 其中的高斯分布是本文作者的拟合^[6]。对半光度半径对数的分布进行高斯拟合的依据是: 反映星系角动量大小的旋转参量可用对数高斯分布很好地进行描述^[7,8]。

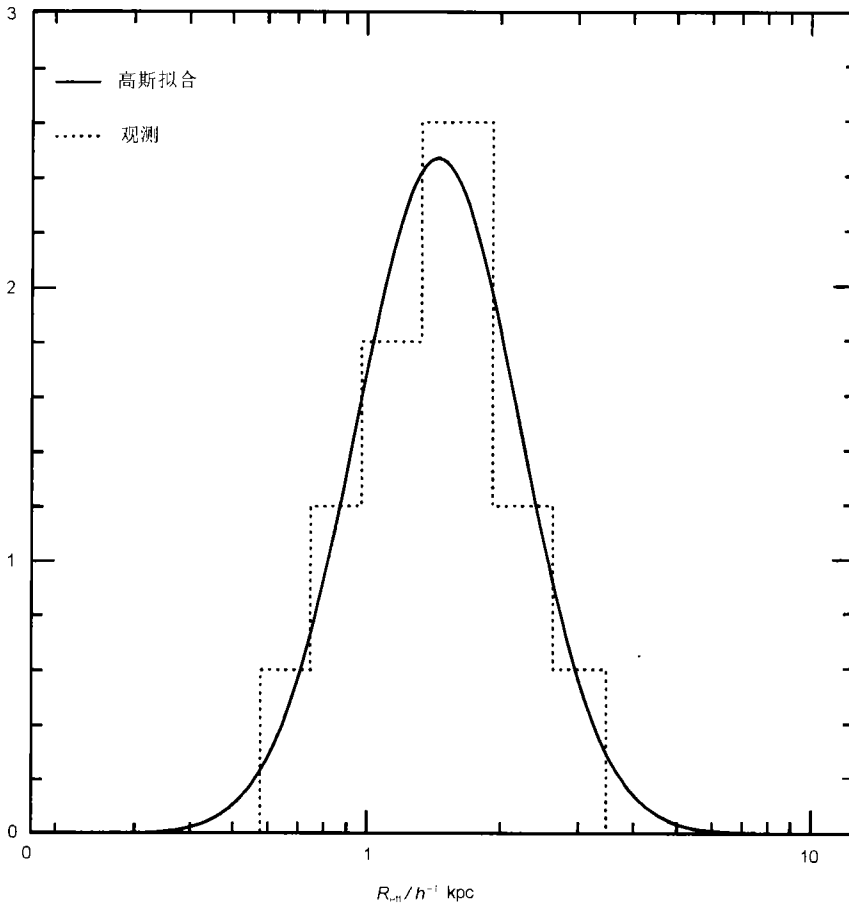


图 3 LBGs 半光度半径分布图^[6]

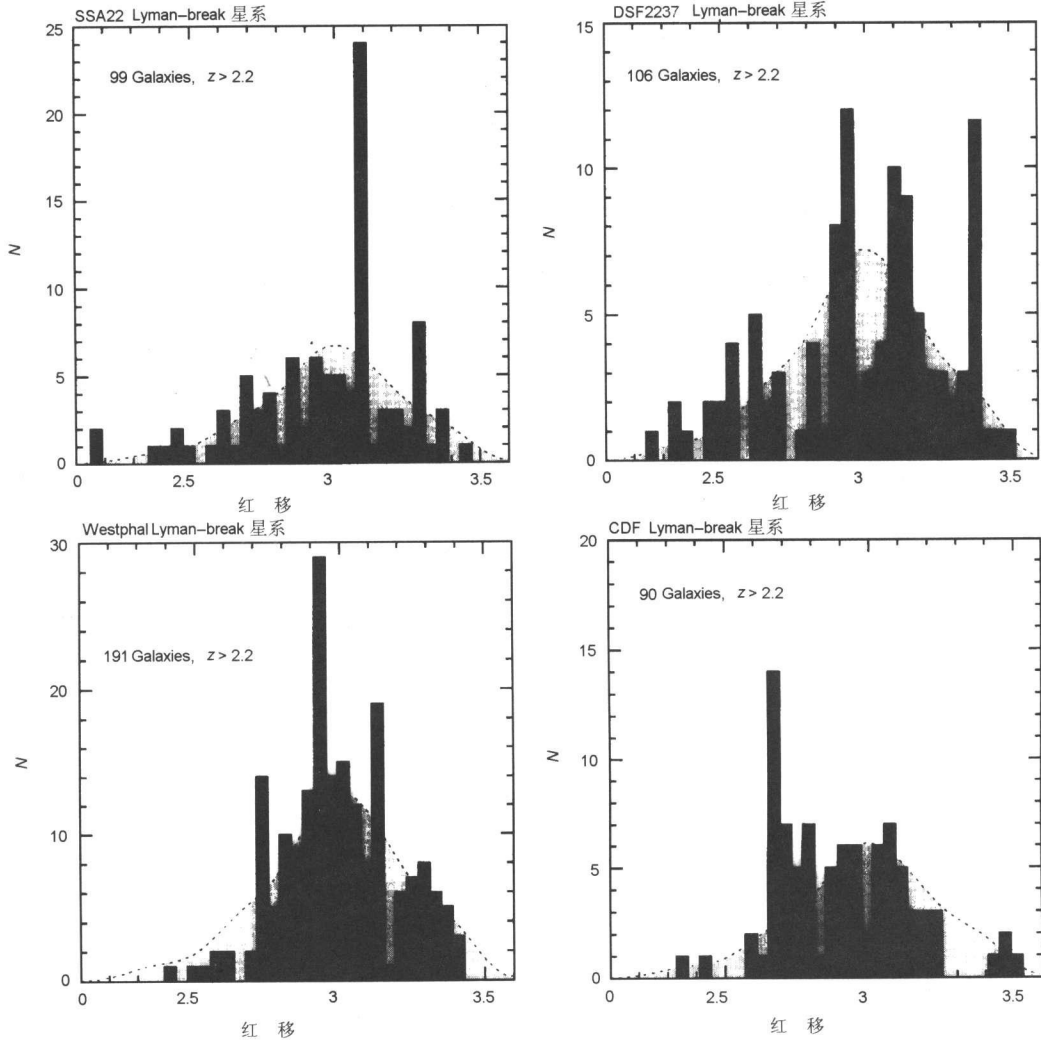


图 4 四个天区 LBGs 的红移分布图^[9]

在空间的分布上, LBGs 亦表现为强的成团性。图 4 显示 4 个观测天区 LBGs 随红移的直方图分布^[9]。Adelberger 等人^[10]用体元计数法 (counts in cell) 在 1998 年得到了 LBGs 在 Λ 宇宙中的空间相关长度为 $5 \sim 6 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 。随着观测样本的增大, Giavalisco 和 Dickinson^[11]重新仔细分析了 LBGs 的空间成团性, 发现他们的相关长度比过去减小了。对于 R 亮于 25.5mag 的 LBGs 样本, 他们得到其空间相关长度应为 $(3.2 \pm 0.7) h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 。由于相关长度是检验理论模型的有效工具, 2000 年前的许多工作在这点上都存在一定的问题。

LBGs 星系中恒星的速度弥散度是了解其结构和动力学的重要物理量, 2001 年 Pettini 等人^[12]用 Keck 和 VLT 对近 20 个 LBGs 作了详尽的观测分析, 利用 $[\text{O III}] \lambda 5007$ 谱线得到恒星形成区 (H II 区) 的投影一维速度弥散度 σ 处于 $50 \sim 120 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 其中值约为 $70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这些新的结果比原来 1998 年他们用星云发射线来估计所得的值小了近一半^[13]。这对理论工

作提出了强的约束。图 5 给出了 σ 与静止坐标 1500Å 星等 M_{1500} 和静止坐标内 M_B 的关系图^[12]。值得注意的是, 观测结果显示速度弥散度 σ 与静止坐标中的 UV 光度和 B 波段光度之间不存在明显的相关性。由于本地静止坐标中的 UV 光度和 B 星等是与恒星形成率相联系的, 因此观测显示, 恒星的速度弥散与恒星形成率并无明显的相关性。结合 LBGs 的典型尺度 ($1.5h^{-1}\cdot\text{kpc}$), 我们立即可以由 Virial 定理估计出 LBGs 典型总质量大约是 $1 \times 10^{10}h^{-1} \cdot M_{\odot}$, 进而可得 LBGs 典型的质光比约为 0.15 太阳单位。与本地星系中央区域的质光比 $2 \sim 10$ 相比, 该值偏小是因为由大量恒星形成而导致的高 UV 及 B 波段光度。同时利用 Starburst 99 模型, 可以进一步从观测的拟合上得知 LBGs 中主要恒星成分年龄应介于 10^8 和 10^9yr 之间^[12]。

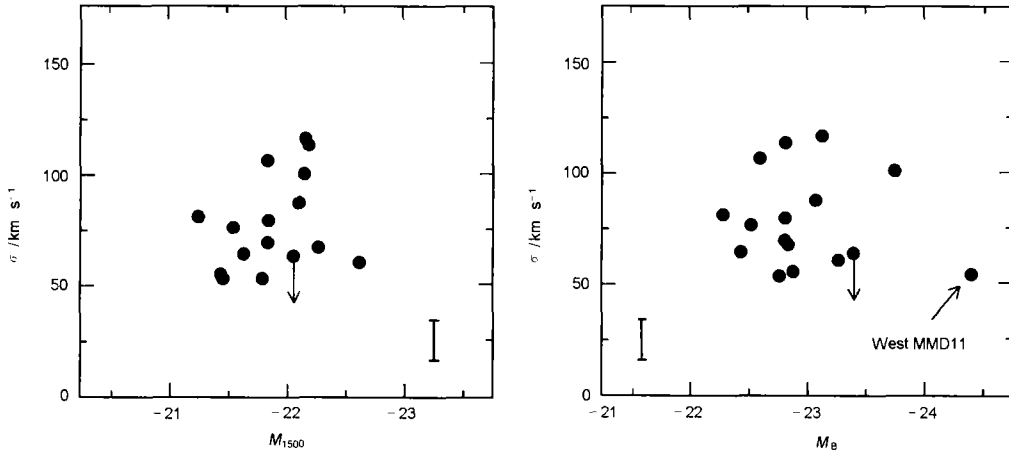


图 5 观测所得的恒星速度弥散与 1500Å 和 B 星等的关系^[12]

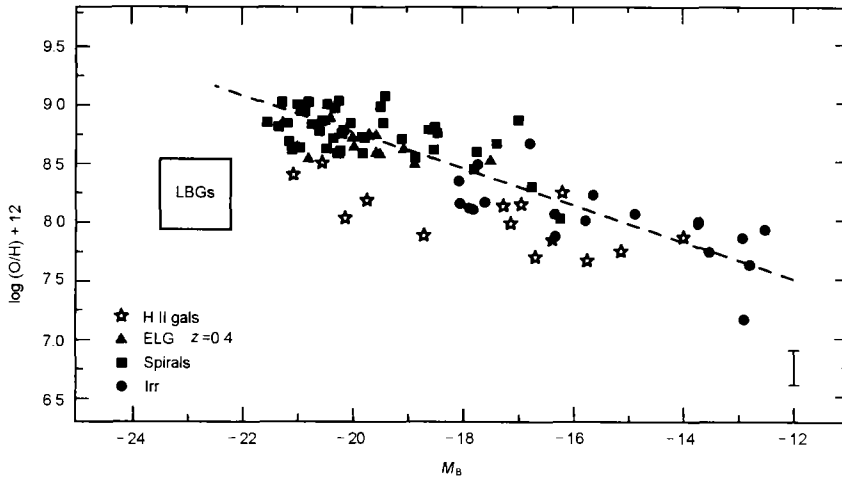


图 6 星系金属丰度 - 光度关系^[12]

LBGs 处于图中所示的方框内

星系金属丰度是表征星系演化的重要物理量。其观测工作对 LBGs 而言较为困难, 迄今为止, 只有 LBG 星系 MS1512-cB58(红移 $z = 2.7290$) 可利用引力透镜效应在 Keck 望远镜上

进行较为详细的观测分析。结果表明该 LBG 星系的年轻恒星、H II 区以及中性 ISM 气体都显示出金属丰度约为 1/3 太阳丰度^[14]。利用 [O II] λ 3727、[O III] λ 4959、5007 和 H β 线, Pettini 等人对近 20 个 LBG 星系的金属丰度进行了估计, 结论是 LBGs 氧丰度大约为 0.1~0.9 太阳丰度, 远比类星体吸收线观测得到的天体 Damped Lyman- α 系统典型金属丰度 (1/30 太阳丰度) 高得多^[43], 证实了束成钢的理论预言^[15]。与本地星系存在的金属丰度-光度关系相比, LBGs 由于其高的恒星形成率而使之偏离了本地星系的这一关系 (见图 6)。

LBGs 在观测上体现出的另一个重要的性质是气体团块的大尺度运动^[12]。对 17 个 LBG 的星云吸收线观测可得到大尺度气体团块运动的速度处于 $-200 \sim -400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 中值大约是 $-300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而对 Ly α 发射线的观测则得到了更大速度范围, 即 $+200 \sim +1100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中值为 $400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 从目前已得的观测样本可知, 在 2 个星等的范围内, 这种气体团块的运动速度与紫外和光学星等 (M_{1500} 和 M_B) 是不相关的 (图 7)。关于这个大尺度气体团块运动的机制可以简单地表述成: 由于 LBGs 是活跃的恒星形成星系, 星系尺度上的气体运动是由超新星的爆发产生的强烈星风导致的。由吸收线和发射线所测得的运动速度的不同方向 (红移或蓝移) 亦可较为简单地得到合理的解释。星云的吸收线是由面向观测者的膨胀壳层产生的。但由于激波扫过的物质是光学厚的, Lyman- α 光子就不能被观测到; 而对于远离观测者而去的壳层, 由于在恒星的后面, 无法产生星云吸收线, 观测到的 Lyman- α 光子却可以由恒星后面的气体反射产生, 即 Lyman- α 反射应表现为红移而非蓝移。这种情况与 H II 区 Lyman- α 的观测非常接近。Tenorio-Tagle 等人^[17] 还对此类观测特征作了较好的理论解释。

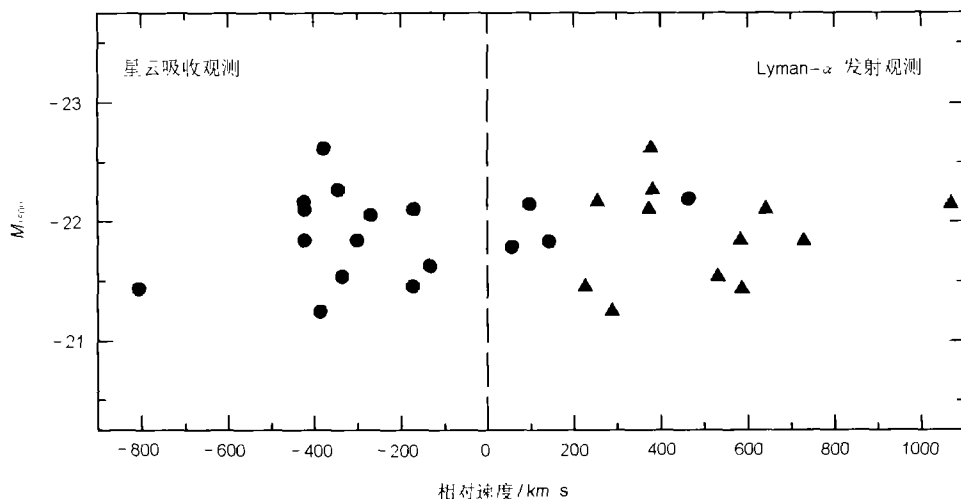


图 7 LBGs 星云吸收线和 Lyman- α 发射所得到的气体运动速度和 1500Å 星等 M_{1500} 的关系^[12]

大尺度的气体团块运动反映了 LBGs 普遍存在物质外流 (outflow), 但确切的观测目前仍十分困难。通过引力透镜的放大作用, Pettini 等人估算了 MS1512-cB58 这个 LBG 星系的气体外流率。他们假设恒星形成区域的典型尺度是 1kpc, 得到气体的外流率大约是 $60 M_{\odot}/\text{yr}$, 与其恒星形成率 ($\approx 20 M_{\odot}/\text{yr}$) 相当。事实上, 外流率估计依赖于恒星形成区尺度大小的估计, 如果该尺度大一倍, 则所得的外流率将大 4 倍。

3 Lyman break 星系的理论研究

对 Lyman break 星系物理本质的研究是了解星系形成和演化的重要环节, 因此该方向目前成为一个热点。当前的理论工作主要可以分为两大类: (1) 认为 LBGs 是宇宙中的大星系。该类星系高的恒星形成率主要是由大星系包含较多的重子物质 (气体) 所决定的^[15,18~29]; (2) LBGs 是由星系间相互作用而导致的星暴星系^[30~32]。由于小星系产生并合的概率较高, 因此, LBGs 应是宇宙中的小星系。由于观测和理论上的诸多不确定性, 目前的理论工作亦仅限于粗线条的描述。许多具体的过程仍存在许多疑问。

仅仅在 LBGs 发现后, Mo 和 Fukugita^[18] 在简单假设该类星系为宇宙中最大的一类星系的条件下, 就能较好地解释当时观测所得的光度函数和相关尺度 ($6h^{-1}\cdot\text{Mpc}$, 在 ΛCDM 中) 等初步结果。基于以上同样的假设, 由 Baugh 等人^[19]、Jing 等人^[20]、Kauffmann 等人^[28] 所作的进一步数值模拟和半解析工作亦给出了当时大多数 LBGs 观测结果的解释, 特别是相关尺度、典型的动力学特征、结构等。基于 Mo、Mao、White^[33] 关于盘状星系形成的经典工作, Mo、Mao、White^[27] 假设 LBGs 是盘状星系, 在进行恒星形成率的计算后, 认为 LBGs 是宇宙中具有最高恒星形成率的一类星系。他们的结果可以合理地在地面及 HST 观测样本所得的相关尺度、光度函数、星系大小等进行描述, 与当时的观测资料符合得很好。基于类似的假设, 2000 年束成钢^[15] 对 LBGs 的恒星形成、动力学和化学演化做了仔细研究, 指出通常意义上的封闭模型不能满足 LBGs 的观测要求, 晕中气体的冷却是提供 LBGs 恒星形成的主要来源, 并预言了 LBGs 的金属丰度为 $0.1\sim 1$ 太阳丰度, 典型值是 0.6 太阳丰度, 远高于 Damped Lyman- α 系统的典型值。随后 Teplitz 等人^[16] 和 Pettini 等人^[12] 用 Keck 和 VLT 望远镜所得的观测结果证实了束成钢的预言。

另一类主要工作是假设 LBGs 是相互作用的小星系, 从事这一类工作的代表是 Somerville 等人^[30~32]。他们同样采用半解析模型。在工作的第一阶段, 他们假设星系间的相互作用是产生 LBGs 高恒星形成率的主要原因。这些 LBGs 晕的圆运动速度典型值为 100km/s 。他们的模型使得相关长度变小, 并且在空间数密度上与观测有一定的出入。在进一步仔细分析模型后, 他们又反过来认为 LBGs 是一种大的星系, 其高恒星形成率则是由一个附近偶遇星系的扰动而触发的。其潮汐作用仅仅触发高的恒星形成率 (以便与观测所得的高恒星形成率一致), 而其他的物理性质 (如角动量, 势能等) 则保持不变。从物理机制上看, 仅仅将潮汐作用当成提高恒星形成率的催化剂而并未导致其他物理现象的图像改变, 看来是不合理的。

最近, 束成钢、毛淑德和莫厚俊 (以下简称 SMM)^[6] 用重新观测处理所得的 LBGs 的恒星形成率 (UV 光度函数) 和它们的观测大小分布, 用半经验方法对 LBGs 是大星系还是小星系这一问题进行了分析, 指出在高红移满足 LBGs 观测光度的星系的恒星形成时标与宇宙当时年龄相比小一个量级, 由此星系观测的轮回效应 (duty cycle) 在理论工作中是十分重要的, 而过去的工作都没有考虑这一点。正是由于过去理论预言所得的相关长度与有偏的观测分析相一致, 很多理论家才没有加以考虑。结合理论上预言的星系密度, 以及宇宙元素核合成所给出的重子数约束, SMM 指出 LBGs 既不可能是如以前所认为的宇宙中最大的一类星系, 也不是那种相互作用小星系。它们晕的圆运动速度典型值为 160km/s 左右。进一步的讨论发现, Lyman break 星系的典型恒星年龄为 $3\times 10^8\text{yr}$, 相关尺度为 $3.2h^{-1}\cdot\text{Mpc}(\Lambda\text{CDM})$ 、恒星典型

的速度弥散值为 70km/s。值得指出的是, SMM 工作的预言立即被资料重新处理后所得的观测结果所证实(见第 2 节)。最近更为仔细的数值模拟也证实了 SMM 的工作^[34,35]。特别是 SMM 指出, 比 Lyman break 星系大的星系应对应于今天 SCUBA 在亚毫米波段上观测到的具有更高恒星形成率的星系。他们关于 SCUBA 星系的一些预言也被观测所证实^[36~41]。

4 总 结

虽然目前已做了许多 LBGs 的观测工作, 但更仔细的观测仍是重要的, 如恒星的速度弥散值、大尺度气体团块运动、以及金属丰度等。而目前的理论工作都还局限于对 LBGs 整体的统计性质进行解释, 如何从单个星系的演化出发, 详细地结合气体、恒星形成、超新星反馈和加热等物理过程进行研究仍是工作的重点。在该方面我们已做了一些工作^[42]。可以预见, 近几年关于 LBGs 物理状况的详细研究仍将是星系形成和演化研究中的热点。

参 考 文 献

- 1 Steidel C C, Pettini M, Hamilton D. A. J., 1995, 110: 2519
- 2 Dickinson M. preprint (astro-ph/9802064) 1998
- 3 Adelberger K L, Steidel C C. *Ap. J.*, 2000, 544: 218
- 4 Giavalisco M, Steidel C C, Macchetto F D. *Ap. J.*, 1996, 470: 189
- 5 Lowenthal J D, Koo D C, Guzman R *et al.* *Ap. J.*, 1997, 481: 673
- 6 Shu C G, Mao S, Mo H J. *M.N.R.A.S.*, 2001, 327: 895
- 7 Warren M S, Quinn P J, Salmon J K *et al.* *Ap. J.*, 1992, 399: 405
- 8 Lemson G, Kauffmann G. *M.N.R.A.S.*, 1999, 302: L111
- 9 Steidel C C, Adelberger K, Giavalisco M. preprint (astro-ph/9805267), 1998
- 10 Adelberger K L, Steidel C C, Giavalisco M *et al.* *Ap. J.*, 1998, 505: 18
- 11 Giavalisco M, Dickinson M. *Ap. J.*, 2001, 550: 177
- 12 Pettini M, Shapley A E, Steidel C C *et al.* *Ap. J.*, 2001, 554: 981
- 13 Pettini M, Steidel C C, Dickinson M. preprint (astro-ph/9707200), 1998.
- 14 Teplitz H I, Malkan M A, Steidel C C *et al.* *Ap. J.*, 2000, 542: 18
- 15 Shu C G. *Astron. Astrophys.*, 2000, 354: 815
- 16 Tenorio-Tagle G, Silich S A, Kunth D *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1999, 312: 442
- 17 Pettini M, Steidel C C, Adelberger K L *et al.* *Ap. J.*, 2000, 532: 65
- 18 Mo H J, Fukugita M. *Ap. J.*, 1996, 467: L9
- 19 Baugh C M, Benson A J, Frenk C S *et al.* *Ap. J.*, 1998, 498: 504
- 20 Jing Y P, Suto Y. *Ap. J.*, 1998, 494: L5
- 21 Moscardini L, Coles P, Lucchin F *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1998, 299: 95
- 22 Haehnelt M, Natarajan P, Rees M. *M.N.R.A.S.*, 1998, 300: 817
- 23 Peacock J A, Jimenez R, Dunlop J S *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1998, 296: 1089
- 24 Wechsler R H, Gross M A K, Primack J R *et al.* *Ap. J.*, 1998, 509: 19
- 25 Coles P, Lucchin F, Matarrese S. *M.N.R.A.S.*, 1998, 300: 183
- 26 Arnouts S, Cristiani S, Moscardini L *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1999, 310: 540
- 27 Mo H J, Mao S, White S D M. *M.N.R.A.S.*, 1999, 304: 175
- 28 Kauffmann G, Colberg J M, Diaferio A *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1999, 303: 188
- 29 Katz N, Hernquist L, Weinberg D H. *Ap. J.*, 1999, 523: 463

- 30 Kolatt T S, Bullock J S, Somerville R S *et al.* *Ap. J.*, 1999, 523: L109
31 Somerville R S, Primack J R, Faber S M. *M.N.R.A.S.*, 2001, 320: 504
32 Wechsler R H, Somerville R S, Bullock J S *et al.* *Ap. J.*, 2001, 554: 85
33 Mo H, Mao S, White S D M. *M.N.R.A.S.*, 1998, 295: 319
34 Bullock J S, Wechsler R H, Somerville R S. *M.N.R.A.S.*, 2002, 329: 246
35 Fardal M A, Katz N, Weinberg D H *et al.* preprint (astro-ph/0107290), 2001
36 Blain A W, Jameson A, Smail I *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1999, 309: 715
37 Frayer D T, Ivison R J, Scoville N Z. *Ap. J.*, 1998, 506: L7
38 Frayer D T. *Ap. J.*, 1999, 514: L13
39 Ivison R J, Smail I, Le Borgne J F *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1998, 298: 583
40 Ivison R J, Smail I, Barger A J *et al.* *M.N.R.A.S.*, 2000, 315: 209
41 Dunlop J S. preprint (astro-ph/0011077), 2000
42 Shu C G, Mao S D, Mo H J. *M.N.R.A.S.* submitted, 2002
43 Ma J, Shu C G. *M.N.R.A.S.*, 2001, 322: 927

Recent Studies on Lyman Break Galaxies

Shu Chenggang Jiang Peifang

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

(*Shanghai Section, Joint Lab of Optical Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

Abstract

In the present paper, we review the recent observational results of Lyman break galaxies in detail, including their luminosity function, size distribution, comoving space density, correlation length as well as the superwinds, large scale motion of gas bulks and metallicities. The discussions of the current theoretical work for Lyman break galaxies are also presented.

Key words galaxies: formation and evolution—Lyman break galaxies—methods: observational—methods: theoretical