

类星体的光度函数

朱 杏 芬 褚 耀 泉

(中国科学技术大学天体物理中心 合肥 230026)

摘 要

主要讨论了光学选类星体的光度函数及其演化在近几年中的进展。目前在小红移范围已取得比较一致的结论。对 $z > 2.2$ ，由于类星体样品的限制，对类星体光度函数的演化还存在着很大的分歧。在文中还比较了类星体光学、射电、X 射线的光度函数的性质。

关键词 类星体：一般 — 光度函数

1 引 言

近年来随着观测技术的发展，已证认的类星体数目越来越多，在此基础上对类星体光度函数的研究也得到长足的进展。类星体光度函数是研究类星体的最基本的统计结果之一。它不仅与类星体本质的研究密切相关，而且还涉及到河外天文学与宇宙学的许多领域，如宇宙的大尺度结构，星系的形成，X 射线背景辐射，早期宇宙的紫外辐射……。本文中主要总结近年来研究类星体光度函数分布的一些重要进展（早期的工作可参见本刊 1989 年发表的黄克谅的文章^[1]，及 Warren & Hewett^[2] (1990) 和 Hartwick & Schade(1990) 的评述文章）。

研究类星体的光度函数及其随红移的演化，关键要有足够大的无偏的光谱证认的完备样品。近年来在光学波段和 X 射线波段上类星体的证认工作进展甚快，相应的样品数目有了很大的增长。以 Hewitt-Burbidge 类星体总表为例，1993 年最新版包含了 7315 个类星体，比 1987 年版几乎增加了一倍^[4]。图 1 画出了具有完备光谱证认的光学选类星体的绝对星等 M_B 与红移 z 的分布图。在 1985 年前（见图 1a）完备样品的数目少于 200 个。从 M_B-z 分布图上可以看出，类星体分布是极稀疏的，特别是缺乏 $B > 20$ 和 $z > 2.2$ 的样品。对高红移类星体的光度函数基本上只是一种猜测。由于当时的样品限制在 $B < 20$ 范围内，对类星体光度函数及其演化的研究结果极不确定，争论很多。到了 1992 年底，光学选类星体的样品猛增到约 2000 个（图 1b），特别是在暗星等范围 ($B > 20$) 和高红移区域 ($z > 2.2$)。主要的光学巡天样品列于表 1。

国家自然科学基金和攀登计划资助项目

1995 年 2 月 25 日收到

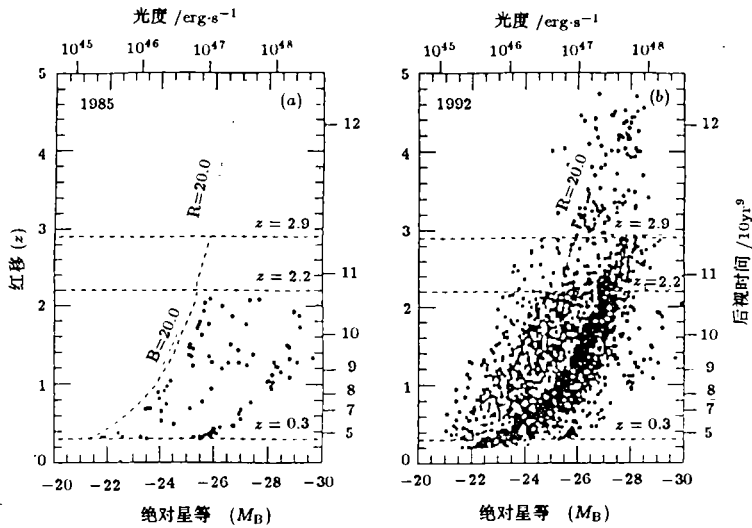


图 1 光学选类星体完整样品的绝对星等—红移分布图

(a) 为截止到 1986 年 7 月的样品。(b) 为截止到 1992 年 7 月的样品。图中除 LBQS 样品外对其他样品删除了 $z < 0.3$ 的类星体，这是考虑到在原始样品中可能存在着 $z < 0.3$ 范围内的不完备性。图中的坐标轴上，同时还标明了相应的热光度和后视时间 ($H_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, $q_0 = 0.5$)。虚线表示对 $z < 2.9$ ，视星等极限 $B = 20$ 以及对 $z > 2.9$ ， $R = 20$

表 1 光学选类星体巡天

巡 天	视星等极限	红移	类星体数目	参考文献
Schmidt and Green 1983	$B < 16.2$	$z < 2.2$	114	[5]
Marshall et al. 1983	$B < 18.5$	$z < 2.2$	18	[6]
Marshall et al. 1984	$B < 19.8$	$z < 2.2$	35	[7]
Mitchell et al. 1984	$B < 17.8$	$z < 2.2$	32	[8]
Crampton et al. 1987	$B < 20.7$	$z < 3$	117	[9]
Koo et al. 1988	$B < 22.5$	$z < 3$	20	[10]
Cristiani et al. 1989	$B < 19.8$	$z < 2.2$	99	[11]
Boyle et al. 1990	$B < 21.0$	$z < 2.2$	420	[12]
Boyle et al. 1991	$B < 22.5$	$z < 3$	66	[13]
Zitelli et al. 1992	$B < 22.5$	$z < 3$	52	[14]
Warren et al. 1991	$R < 20$	$z < 4.5$	130	[15]
Morris et al. 1991	$B < 18.5$	$z < 3$	1031	[16]
Irwin et al. 1991	$I < 18$	$z < 5$	20	[17]
Schmidt et al. 1991	$R < 20.5$	$z < 5$	141	[18]

2 类星体光度函数的演化

对于视星等限制的类星体样品 (magnitude-limited sample) 通常采用 $1/v_a$ 统计方法确定光度函数 (见 Schmidt & Green, 1983^[5])。其优点是直接从观测资料出发而不必先假定光度函数的形式, 而缺点是需要人为地对类星体红移和绝对星等划分间隔, 并且较难确定不同样品的误差对最终结果的影响。另一种方法是采用最大似然法 (maximum-likelihood model fitting procedure) 来拟合预先设定的光度函数模型。这种方法的优点是便于对样品的误差进行处理, 当然其限制在于事先确定了光度函数的形式。

目前对于类星体的光度函数的模型可以从以下几个方面区分:

(1) 光度函数的形式

(i) 单幂律形式; (ii) 双幂律形式; (iii) Schechter 形式。

(2) 光度函数的演化 (具体数学形式请参见文献 [1])

(i) 纯密度演化; (ii) 纯光度演化;

实际观测资料表明, 光度函数的演化要比上述两种单纯的形式更为复杂。目前采用的有:

(iii) 亮度端演化模型; (iv) 依赖于光度的密度演化模型; (v) 混合演化。

(3) 演化的数学形式

(i) $(1+z)$ 的幂律形式; (ii) 后视时间 (look-back time) τ 的指数形式。

对于光度函数随红移 z 的演化形式, 过去由于类星体样品数目较少, 特别是由于限于 $B < 20$ 的范围内, 得到的光度函数基本是无明显特征的曲线 (如图 2 (A) 所示), 因此较难确定随着红移的变化是密度演化为主 (垂直方向移动) 还是光度演化为主 (水平方向移动), 而对于具有明显特征的光度函数, 则相对较容易在各种演化模型中加以区别 (见图 2 (B), (C), (D))。

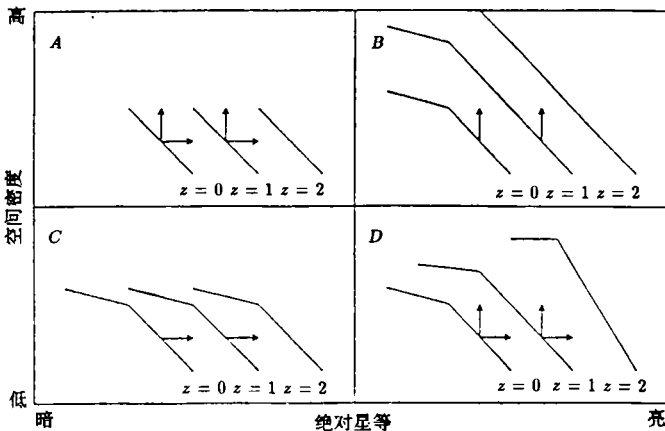


图 2 类星体光度函数随红移 z 的演化草图

(B) 表示纯密度演化 (垂直方向移动); (C) 表示纯光度演化 (水平方向移动); (D) 表示纯密度演化与纯光度演化的结合

3 小红移类星体的光度函数

随着 $B > 20$ 的类星体完备样品的增多, 对小红移时类星体的光度函数的研究结果已经比较确定: 光学选类星体的光度函数在较暗绝对星等端其幂律的斜率出现显著的折断 (break), 折断点与红移的关系表明, 在 $z = 0$ 到 $z \sim 2$ 的范围内类星体的光度函数有强烈的光度演化。目前较为公认的结果首推由 Boyle 等人利用 700 多个类星体样品得到的光度函数, 其结果如图 3 所示。

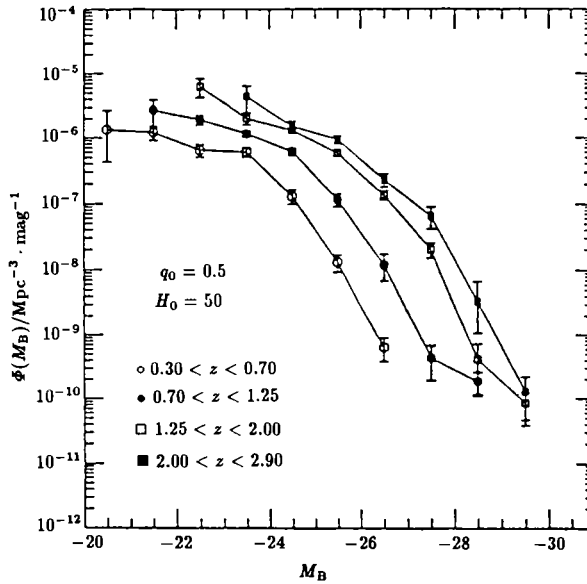


图 3 对 $z < 2.9$ 相应于 $\log(1+z)$ 四个相同的间隔范围内的类星体光度函数 ($q_0 = 0.5$ 的宇宙模型) Boyle 的结果可用双幂律函数表示:

$$\phi(M_B, z) dM_B = \frac{\phi^*}{10^{0.4[M_B - M_B(z)](\alpha+1)} + 10^{0.4[M_B - M_B(z)](\beta+1)}} dM_B$$

其中 α, β 分别表示光度函数在亮端和暗端的斜率。光度函数的演化由折断星等 (break magnitude) $M_B(z)$ 与红移的关系来确定:

$$\begin{aligned} M_B^*(z) &= M_B^* - 2.5k \log(1+z), & z < z_{\max} \\ M_B^*(z) &= M_B^* - 2.5k \log(1+z_{\max}), & z > z_{\max} \end{aligned}$$

相当于在较小红移时 ($z < z_{\max}$) 光度函数以幂律形式演化: $L^*(z) \propto (1+z)^k$, 而在大红移时则保持不变。这些参数的具体数值为: $\alpha = -3.9 \pm 0.1, \beta = -1.5 \pm 0.15, M_B^* = -22.4 \pm 0.2, k = 3.45 \pm 0.1, z_{\max} = 1.9 \pm 0.1, \phi^* = 6.5 \pm 10^{-7} \text{mag}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-3}$ 。

Boyle 的结果显示类星体的光度经历着强烈的变化, 在 $z \sim 0$ 至 $z \sim 2$ 区间内增强近 30 倍。

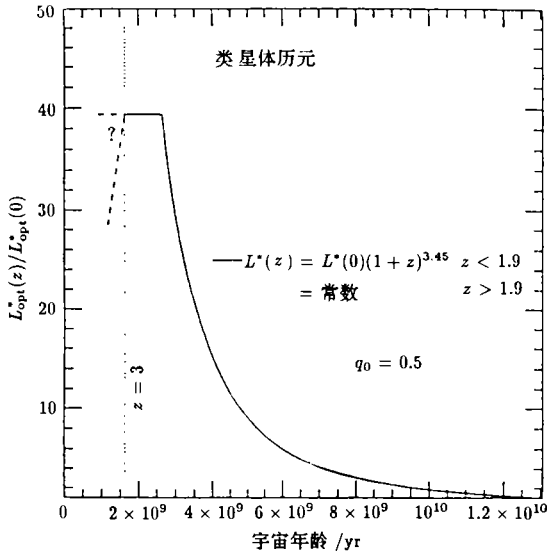


图4 光学选类星体光度函数的演化

图中表示归一化的“折断光度 (break luminosity)” $L_{\text{opt}}^*(z)/L_{\text{opt}}^*(10)$ 随宇宙年龄 ($q_0 = 0.5, H_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$) 的演化。虚线表示对 $z > 3$ 时演化的趋向尚不确定

在 1991 年举行的“类星体的空间分布” (The Space Distribution of Quasars) 专题讨论会上^[19], 全世界从事类星体证认工作的主要研究小组几乎都参加了会议。会上 Boyle, Kron 和 Schmidt 等三个研究小组的结果一致表明: 在 $z \sim 2$ 时类星体的光度演化有一个明显的截止, 在 $2 < z < 3$ 范围内绝对星等 $M_B < -26$ 的类星体的空间密度几乎保持不变。他们的结果可以用图 4 来表示。

其他研究小组得到略为不同的结果。Warren 等人发现在 $z > 2$ 时仍有演化的证据, 并且对 $M_B < -26$ 的类星体而言, 在 $z \sim 3$ 时其空间密度达到极大。Hewett 等人在分析了 LBQS (large bright quasar survey) 巡天样品后也认为, 在 $z > 2$ 时存在着演化, 但演化显然要比 $z < 2$ 时缓慢。

对于 $z > 3$ 的类星体光度函数, 目前的研究结果是明显互相冲突的。Hazard 等人^[20], Mitchell 等人^[21] 和 Irwin 等人 (见文献 [19], p.117) 的研究结果表明, 在 $z \sim 2$ 至 $z \sim 4$ 范围内 $M_B < -27$ 的类星体的空间密度保持不变。而 Warren 等人 (见文献 [19], p.139), Schmidt 等人 (见文献 [19], p.109) 则认为: 对于 $-27 < M_B < -26$ 的类星体在 $z \sim 4$ 时的空间密度要比在 $z \sim 2$ 时至少减小到 1/3 至 1/10。最近 Warren 等人^[22] 发表了新的研究结果。他们利用六个波段的多色测光方法寻找高红移类星体, 在 43 平方度范围内找到 $m_{\text{or}} < 20.0$ 的高红移类星体 86 个, 其红移范围在 $2.2 < z < 4.5$ 。他们分析了这个样品得到的光度函数如图 5 所示, 并且指出在 95% 的置信度水平上, $M_c < -25.6$ 的类星体在 $z \sim 3.3$ 至 $z \sim 4$ 之间, 其空间密度至少减小到约 1/3。

对于 $z > 3$ 的类星体空间密度是否有个显著减少的阶段 (即类星体形成阶段), 这一问题

4 高红移类星体的光度函数

相比之下, 对高红移类星体的光学光度函数目前还没有完全一致的结论。其主要困难在于探测高红移类星体是件很困难的工作。对低红移 ($z < 2.2$) 而言, UVX 方法可得到较完备的样品, 而对高红移, 类星体是较稀少的天体, 尽管无缝光谱法和多色法已发现一批类星体样品, 但样品完整性还存在问题。对探测方法中的各种选择效应至今没有完全充分理解, 仍在深入研究中, 故很难得到一个足够大的完备样品。同时在计算绝对星等等参数过程中, 从观测到的静止波长在 $\lambda \sim 1500 \text{ \AA}$ 处要外推到 $\lambda \sim 4400 \text{ \AA}$, 显然会带来许多不确定的困难。

的争论在 10 余年前就开始了 (见 Osmer, 1982^[23]), 至今仍未有肯定的结论。这个问题的重要在于它与许多涉及到宇宙早期物理状态的问题有关。例如星系形成的时间问题, 如果直到 $z \sim 4$ 的范围内类星体的总数始终保持不变, 则显然对一些预言较晚形成星系的理论是不利的。还有例如宇宙早期 UV 辐射的强度估计, 以及对于星系际介质的影响等问题。由于目前 $z > 3$ 的类星体样品数目还很少, 并且在上述研究工作中对样品的各种修正都存在着许多不确定性, 看来要得到比较确定和一致公认的结果还有许多工作要做。

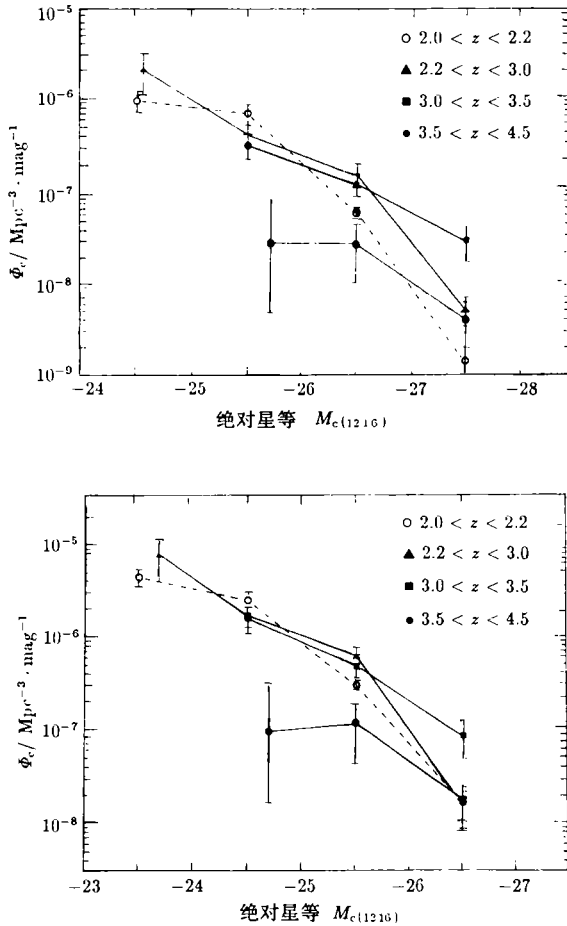


图 5 在 $2.0 \leq z < 4.5$ 四个红移间隔内的类星体光度函数。

上图为 $q_0 = 0.1$ 的情况, 下图为 $q_0 = 0.5$ 的情况

$$q_0 = 0.1: \alpha = -5.18^{+0.5}_{-0.7}, \beta = -2.11^{+0.1}_{-0.1}, m_C^* = -14.65^{+1.8}_{-1.9}, k_L = 10.33^{+1.7}_{-1.8}, \log \phi_C^* = -1.55^{+1.2}_{-1.2}$$

$$q_0 = 0.5: \alpha = -5.05^{+0.5}_{-0.7}, \beta = -2.06^{+0.2}_{-0.2}, M_C^* = -13.21^{+2.3}_{-2.3}, k_L = 10.13^{+2.0}_{-2.0}, \log \phi_C^* = -0.99^{+1.5}_{-1.4}$$

对于类星体光学光度函数, 不断有新的研究成果出现。最近 Yichuan Pei 在 Ap. J.^[28] 上发表一项工作, 他把 Hartwick 和 Schade^[3] 及 Warren, Hewett 和 Osmer^[22] 两组样品结合在一起, 从而使类星体样品数增加到 1200 个, 红移范围 $0 \leq z \leq 4.5$, 其目的是讨论红移在 0—4.5

整个范围内类星体光度函数的形式及演化性质。根据 Pei 的分析, 通常采用的类星体光度演化的幂函数形式 $L(z) \propto (1+z)^r$ 并不适合 $z > 2.2$ 的样品, 他采用了简单高斯型演化函数

$$L(z) = L_*(1+z)^{-(1+\alpha)} \exp[-(z-z_*)^2/2\sigma_*^2]$$

根据这种演化模式推算, 类星体在红移 $2 < z < 3$ 范围内有一个较平坦的极大值, 在 $z > 3$ 时, 类星体数目有明显的下降, 这些都与观测结果符合得较好, 且是单纯的幂函数演化形式无法解释的。Pei 还试探采用 $L^{1/4}$ 的指数形式来替代双幂律的光度函数形式。在减少一个自由参数 (从 6 个减少到 5 个) 情况下, 得到同样令人满意的拟合。显然, 随着类星体巡天技术的发展, 特别是大红移类星体样品越来越趋于完备, 光度函数的研究必将获得更多信息。

5 其他波段的类星体光度函数

在 X 波段, 90 年代以来观测资料有了数量级的增加, 其中最主要的两个完备样品是 EMSS 巡天 (extended medium sensitivity survey)^[24] (0.3—3.5 keV 波段) 和 ROSAT 巡天^[25] (0.2—2 keV 波段)。在射电波段的研究工作也很多。我们以 Dunlop & Peacock^[26] 最近发表的射电光度函数 (RLF) 为例, 他们选择了在 2.7GHz, $S > 0.1$ Jy 的 171 个射电平谱类星体, 其中 90% 有光学光谱的证认资料。分析表明, 类星体的 X 波段与射电波段的光度函数也可以用双幂律形式表示。因此类星体的光度函数可表达为统一的形式:

$$\phi(L, z) = \frac{\phi^*}{\left[\frac{L}{L^*(z)}\right]^{\alpha-1} + \left[\frac{L}{L^*(z)}\right]^{\beta-1}}$$

其中 α 表示 $L \ll L^*$ 时的斜率, β 表示 $L \gg L^*$ 时的斜率。表 2 给出在光学波段 (4400Å), X 波段 (2keV) 和射电波段 (2.7GHz) 类星体光度函数的参数值, 资料分别取自文献 [26] 与 [27]。

表 2 类星体光度函数的参数值 $q_0 = 0.5$

参数	光学波段 (4400Å)	X 波段 (2keV)	射电波段 (2.7GHz)
α	3.6 ± 0.1	3.4 ± 0.1	3.0 ± 0.1
β	1.5 ± 0.2	1.7 ± 0.2	1.8 ± 0.2
L^* ($\text{erg}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$)	4.2×10^{29}	5.2×10^{25}	2.2×10^{33}
ϕ^* ($\log L^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-3}$)	1.6×10^{-6}	2.8×10^{-6}	7×10^{-9}

从表中可以看出, 光学光度函数与 X 波段光度函数的归一化因子 ϕ^* 比较接近, 这与类星体的光学光度与 X 光度之间存在着正比关系 $L_X \propto L_{\text{opt}}^{0.8}$ 的观测事实相一致。而光学光度函数与射电光度函数的归一化因子差别很大, 这说明将近 90% 以上的光学选类星体是射电宁静的 (radio quiet), 相反, 几乎没有 X 射线宁静 (X-ray quiet) 类星体。

参 考 文 献

- [1] 黄克谅. 天文学进展, 1989, 7: 222
- [2] Warren S J, Hewett P C. Rev. Mod. Phys., 1990, 53: 1093
- [3] Hartwick F D A, Schade D. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1990, 28: 437
- [4] Hewitt A, Burbidge G. Ap. J. Suppl., 1993, 87: 451

- [5] Schmidt M, Green R F. *Ap. J.*, 1983, 269: 352
- [6] Marshall H L, Tananbaun H, Zamorani G *et al.* *Ap. J.*, 1983, 269: 442
- [7] Marshall H L, Avni Y, Braccetti A *et al.* *Ap. J.*, 1984, 283: 50
- [8] Mitchell K J, Warnock A, Usher P D. *Ap. J.*, 1984, 287: L3
- [9] Crampton D, Cowley A P, Hartwick F D A. *Ap. J.*, 1987, 314: 219
- [10] Koo D C, Kron R C. *Ap. J.*, 1988, 325: 92
- [11] Cristiani S, Barbieri C, Iovino A *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1989, 89: 77
- [12] Boyie B J, Fong R, Shanks T *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1990, 243: 1
- [13] Boyle B J, Jones L R, Shanks T. *M.N.R.A.S.*, 1991, 251: 482
- [14] Zitelli, Mignoli M, Marano B *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1991, 256: 349
- [15] Warren S J, Hewett P C, Osmer P S. *Ap. J. Suppl.*, 1991, 76: 23
- [16] Morris S L, Weymann R J, Anderson S F *et al.* *A. J.*, 1991, 102: 1627
- [17] Irwin M, McMahon R G, Hazard C. In: Crampton D *et al.* ed. *The space distribution of quasars*, ASP conference series No.21, Victoria, British Columbia, 1991, San Francisco: ASP, 1991: 117
- [18] Schmidt M, Schneider D P, Gunn J M, In: Crampton D *et al.* eds. *The space distribution of quasars*, ASP conference series No.21, Victoria, British Columbia, 1991, San Francisco: ASP, 1991: 109
- [19] Crampton D *et al.* ed. *The space distribution of quasars*, ASP conference series No.21, Victoria, British Columbia, 1991, San Francisco: ASP, 1991
- [20] Hazard C, McMahon R G, Sargent W. *Nature*, 1986, 322: 38
- [21] Mitchell P S, Miller L, Boyle B J. *M.N.R.A.S.*, 1990, 244: 1
- [22] Warren S J, Hewett P C, Osmer P S. *Ap. J.*, 1994, 421: 412
- [23] Osmer P S. *Ap. J.*, 1982, 253: 28
- [24] Stocke J T, Morris S L, Gioia I M *et al.* *Ap. J. Suppl.*, 1991, 76: 813
- [25] Shanks T, Geogantopoulos I, Stewart G C *et al.* *Nature*, 1991, 353: 315
- [26] Dunlop P S, Peacock J A. *M.N.R.A.S.*, 1990, 247: 19
- [27] Boyle B J, Griffiths R E, Shanks T *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1993, 260: 49
- [28] Pei Y. *Ap. J.*, 1995, 438: 623
- [29] Boyle B J. In: Shull T M, Throuson H A eds. *The environment and evolution of galaxies*. Wyoming: [s.n.], 1992

(责任编辑 舒似竹)

Luminosity Function of Quasars

Zhu Xingfen Chu Yaoquan

(Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract

In this paper we give a review on recent progress in luminosity function and evolution of optical quasars. At small redshift it has reached a quite consistent conclusion. At $z > 2.2$, due to the limit of QSO samples, there are still many differences of opinion in evolution of QSO luminosity function. We also compare the properties of optical, radio and X-ray luminosity functions of quasars.

Key words quasars: general—luminosity function