§2．类星体巡天

§2.1 类星体巡天的一般原则

§2.1.1 巡天的意义和原则

所谓类星体巡天就是利用类星体的特征在某个天区搜寻类星体。自 1960 年代发现第一个类星体以来已经过去了 40 年。至今已发现了几万个类星体，已经积累了许多资料，对类星体的认识也有了很大进展。虽然如此，类星体巡天仍是重要的研究工作。当然，巡天不仅是单纯地为了发现几个类星体，其最主要的目的是得到一个好的类星体样本。

类星体是迄今为止人们发现的最遥远的一类天体，它们提供了最大的时间和空间跨度。因此，通过对类星体的研究可以研究宇宙的发展史。例如，通过对类星体的空间分布、光度函数、类星体吸收线等的研究可以了解类星体本身及有关天体的特征是怎样随红移演化的，也为宇宙大尺度结构和星系的形成和演化提供线索。类星体被视为“宇宙探针”，对宇宙学研究具有重要意义。但是，要开展这方面的研究，必须要有大量的无偏的类星体样本。

另一方面，任何一个类星体样本都可能包含一些人们特别感兴趣的类星体，因此有助于研究类星体的本质。

由于类星体形态上类星，搜寻类星体是相当困难的。主要的困难是：

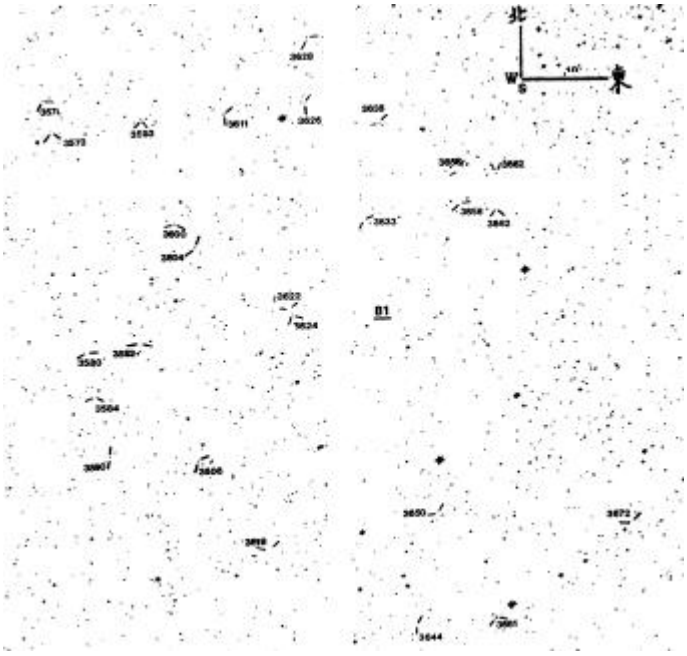

图 2.1 寻星图。

1. 类星体的面密度很低。图 2.1 是笔者进行过巡天的一个天区的寻星图。图中标有数字的为类星体候选者，未标号的为普通恒星。从图可见，相对于恒星而言，类星体是相当少的。对类星体面密度的统计研究(见表 2.2)表明，亮于 18 等的类星体每平方度平均不到一个，亮于 21 等的类星体每平方度大约有 40 个。但恒星的面密度很高，在恒星数相对较少的银极方向，每平方度亮于 21 等的恒星总数在 1600 个以上(见图 2.2)。由于望远镜时间有限,不可能对每一个恒星状天体都进行光谱观测。因此, 类星体巡天的基本任务就是利用某种方法把类星体从众多的恒星中分离出来。

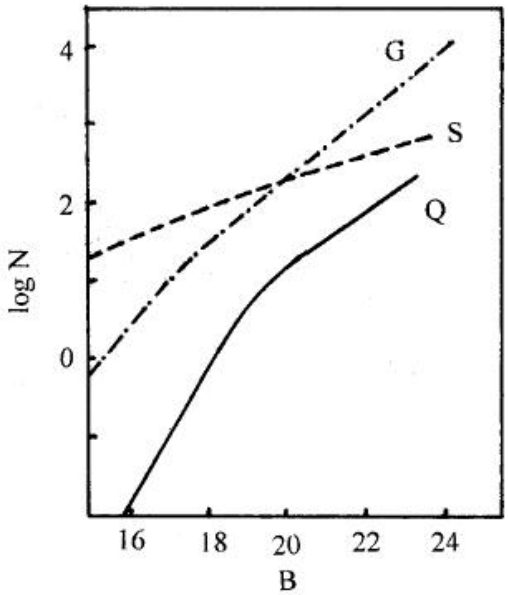

图 2.2 类星体和恒星的面密度的比较，取自[1]。实线为类星体，虚线为恒星，点虚线为星系。

类星体巡天实际上是分两步进行。首先，根据类星体的观测特征采用某种方法从众多的恒星状天体中选取类星体候选者。然后再对类星体候选者逐个进行分光观测，确定其中的类星体。

2. 选取类星体候选者的方法不完善。一方面，无论采用何种方法，候选者中仍不可避免地混入许多恒星。因此，巡天的要求是尽可能地减少混入候选者的恒星。这样，证认类星体时才会达到较高的效率。另一方面，任何一种方法都有选择效应，偏爱具有某些特征的类星体，拒绝另外一些类星体。例如，有些方法倾向于选取强源（或高光度源）而忽视弱源（或低光度源）；有些方法倾向于选取低红移类星体而忽视高红移类星体，另一些方法则倾向于选取高红移类星体而忽视低红移类星体，等等。因此，候选者中可能漏掉一些真正的类星体。巡天又要求漏选的类星体越少越好。

显然，类星体巡天碰到的是一个两难的问题。如果我们加强选取类星体候选

者的选择条件，我们就会在类星体候选者中排除掉更多的恒星，从而提高证认类星体的效率。但不可避免地会漏选某些类星体，降低样本的完备性。如果我们放宽选取类星体候选者的选择条件，漏选的类星体肯定将会减少，样本的完备性将会得到改善。但不可避免地又会引起更多的恒星污染，降低证认类星体的效率。

类星体巡天的基本原则就是尽可能地做到两全。由于实际上任何巡天都不可能是完全无偏的，巡天工作优先考虑的是得到大量的可供研究的类星体样本。同时，也应给出选择效应的详细说明。

§2.1.2 巡天的依据

巡天的依据就是利用类星体的有别于其它天体的观测特征。§1.2 中已介绍了类星体的一般观测特征，下面列出与巡天有关的特征。

类星；

强的发射线光谱；

从γ射线到射电波段的连续光谱；

连续辐射的光变。

除了类星这一点是必须的外，其它特征在巡天工作中都是有选择地利用。正因为如此，才产生了各种各样的巡天。

§2.2 光学波段巡天

光学波段是类星体巡天中最重要的一个波段。一方面，光学波段是类星体巡天中最有效的一个波段；另一方面，由其它波段巡天选取的类星体候选者必须经过光学波段的光谱证认。光学波段巡天主要利用类星体的发射线和连续光谱方面的特性。

§2.2.1 颜色巡天

1．紫外超巡天（两色巡天）

低红移（$z_{em} < 2.2$）类星体的幂律连续谱表明它们有明显的紫外超（UV Excess, 或 UVX）。一个典型的类星体的 U – B ≈-1 等, 而最热的主序星的 U – B ≈ 0.4 – 0.5 等。利用这个特点可将类星体与大部分恒星区分开。许多人做了这种巡天，选择类星体候选者的标准一般取为 U-B < - 0.4. 少数低红移类星体不满足这个条件，它们将被漏选。而某些热的亚矮星和白矮星却满足这个条件，它们将会被包含在候选者中，成为最主要的“污染”源。

紫外超巡天只需测量天体的 U, B 星等，简单易行。但由于选择候选者的条件比较宽松，恒星的污染比较严重。例如，著名的亮类星体巡天(BQS)中，类星体候选者大约有 1700 个, 而证认的类星体只有 114 个, 证认成功率约 7%。因此，证认工作的量很大，效率不高。

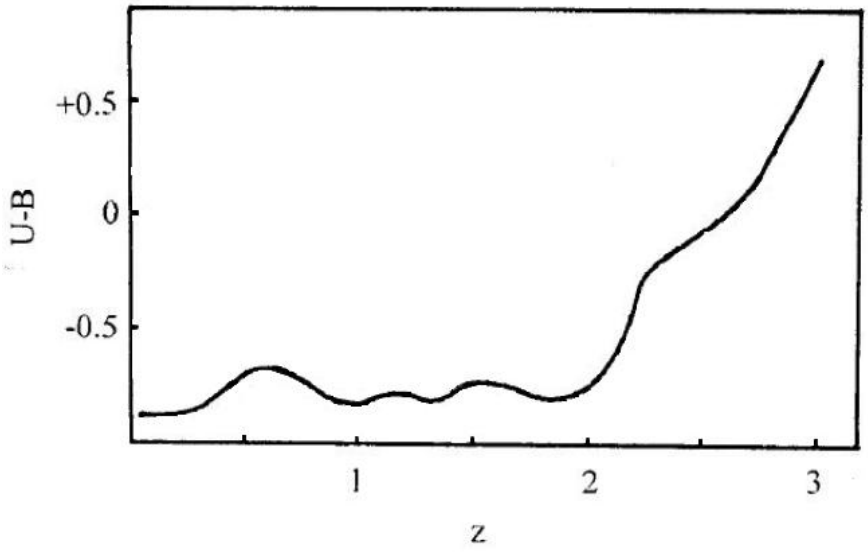

图 2.3 类星体的 U-B 颜色与红移的关系，取自[1]。（AGN 书 P.17,Fig.5）

由于类星体光谱中的 Lyα 等强发射线的影响，其 U-B 依赖于红移。图 2.3 给出一个“平均的”类星体的 U-B 随 z_{em} 的变化。当 z_{em}> 2.2 时，由于 Lyα 发射线的影响使 U-B < -0.4 的条件不再满足。因此，紫外超巡天不适用于 z_{em}> 2.2 的高红移类星体。

最早的紫外超巡天当属上世纪 60 年代原苏联比拉干（Byurakan）天文台（现属亚美尼亚共和国）的 Markarian 等人进行的巡天。当然，这个巡天并不是为了发现类星体。为了避开热矮星，Markarian 的巡天实际上是搜寻有紫外超的有视面天体。Markarian 巡天共发现了约 1500 个紫外超星系，其中，约 10%是 Seyfert 星系。当然， Markarian 巡天也发现了一些低红移类星体。Markarian 巡天发现的紫外超天体称为 Markarian(Mrk)天体，其中的许多是非常有趣的。

第一个紫外超类星体完备样本是 1970 年 Braccesi(1970)[2]得到的。当然，这个样本包含的类星体很少。1980 年代，Schmidt 和 Green(1983)[3]完成了著名的亮类星体巡天(BQS，Bright Quasar Survey)或 PG (Palomar Green)巡天。这个巡天覆盖了银纬 30º 以北的 10714 平方度天空，选择候选者的判据是 U – B < - 0.44, 样本的极限星等平均为约 16 等(不同天区的样本极限星等略有差异)。BQS 发现的 114 个类星体中有一些的光度很低，实际上是 Seyfert 星系，而满足判据 M_B < -23.0 的类星体只有 92 个，满足 M_B < -24.0 的只有 46 个。BQS 在历史上曾起重要作用，它所发现的类星体常称为 PG 类星体。

与 BQS 类似的有 Boyle et al.(1987)[4], Boyle et al.(1990)[5], Goldschmidt et al.(1993)[6], Marshall et al.(1984)[7], Cristiani et al.(1995)[8]等进行的巡天。Boyle 等人的巡天选择候选者的判据是 U – B < - 0.35 , 比 BQS 更宽松；巡天只覆盖了 245 平方度天空, 但比 BQS 更深，其样本极限星等 m_B = 20.9 。巡天共发现了 1440

个具有紫外超的候选者，其中 420 个被确认为类星体。

紫外超巡天用了 U 和 B，是一种两色巡天。当然也可用其它的颜色。为了发现高红移类星体，Irwin et al.(1991)[9], Storrie-Lombardi et al.(2001)[10]开展的 APM(Automated Plate Measuring) UKST(UK Schmidt Telescope)颜色巡天用 B_J 和红区的 R。图 2.4 是典型的颜色-星等图。从图可见，类星体和恒星有明显的界限。当然，在选择类星体候选者时也要像紫外超巡天一样给出具体的判据。这个巡天已搜寻了南天约 8000 平方度天空，发现了 59 个红移在 3.85- 4.78 之间的光学选类星体, 其中，49 个的 $z_{em} > 4.0$。

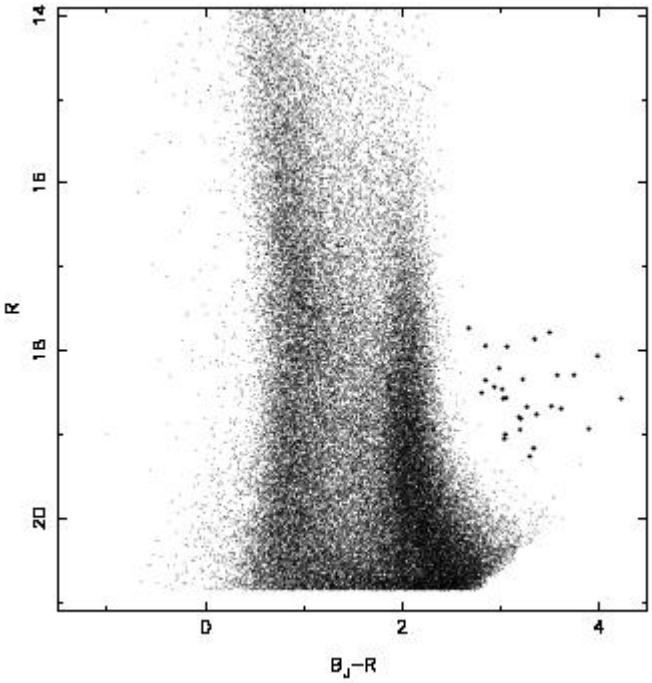

图 2.4 一个 UKST 星场的典型的(B_J – R) - R 颜色-星等图。右边的黑点为类星体，中部大量的小黑点为恒星。

2. 多色巡天

紫外超巡天只利用了连续光谱很少的信息，漏选的类星体较多且不能用来搜寻高红移类星体。更好的方法是利用多色测光资料。从多色测光资料可以得到颜色图，而类星体和大多数恒星在这种多维颜色空间中占据不同的位置。采用一定的判据选取候选者，可将类星体与大多数恒星分开。

多色巡天中最简单的是 U、B、V 三色测光。图 2.5 是 U、B、V 三色测光得到的（U-B）-（B-V）双色图。从图可见，类星体和大部分主序星占据了不同的位置，因此，不难把它们分开。当然，恒星的污染，少数类星体因颜色与恒星相同而被漏选，仍是不可避免的。不过，从图还可见，漏选的类星体数肯定会比仅用紫外超判据时少。

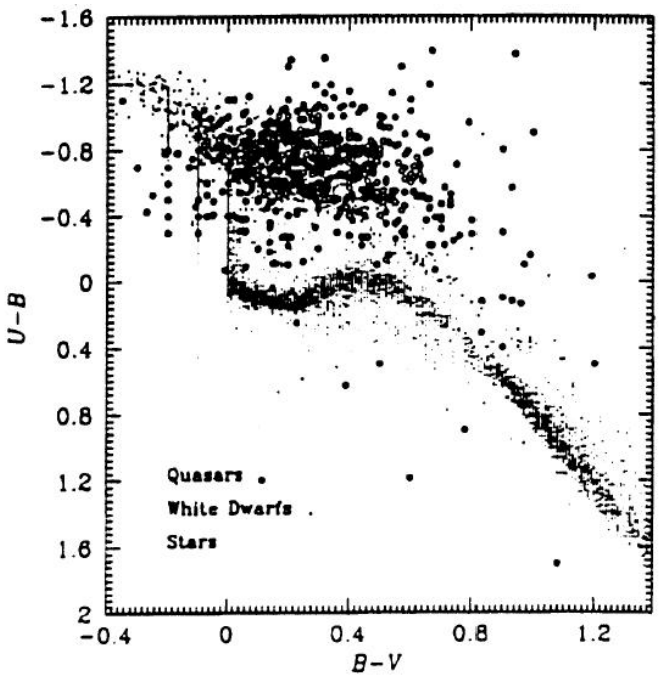

图 2.5　类星体和恒星的(U-B)-(B-V)两色图。大黑点为类星体。

以 US 巡天为例[11,12]。US 巡天利用 Palomar Schmidt 三色底片搜寻了中银纬的选区 SA28, 29, 55, 71, 82 和 94（SA，即 Selected Areas, 是 Kapteyn 选定用来研究恒星空间密度的天区）。三种颜色的像被拍在同一张底片上。在（U-B）-（B-V）两色图上选取类星体候选者。

图 2.6 两色图中画出主序，U-V = 0 的线和黑体线。标记为 1（包括 1A，1B，1C，1BS）的区域，即在 U-V = 0 和黑体线以上的区域，是类星体、白矮星、热星等所在区域。标记为 3 的则是 F 和 G 型亚矮星所在区域。两者之间的区域记为 2。U-V = 0 的线和黑体线距亚矮星大约 0.2 等。如果亚矮星所在区域能够确定，

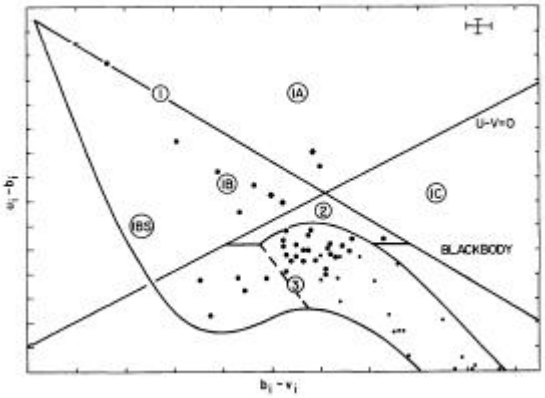

图 2.6　(u-b) – (b-v) 两色图，取自 Usher(1981)[11]。

类星体所在区域自然也就确定。由于亚矮星非常多，很容易在三色底片上找到。利用它们未经较准的(u – b)和(b – v)，就可确定两色图上亚矮星所在区域，即区

域 3。从而确定 U-V = 0 的线和黑体线。这样就无须测量天体的 UBV 星等，避免了进行流量定标，从而节省了大量时间。在选取候选者时，位于区域 2 的天体也入选。这是因为，一方面测量星等时有误差，一些原本落在区域 1 的天体因未测准其星等而落到区域 2；另一方面，少数类星体本身的颜色就落在区域 2。

US 巡天的初步结果是得到了一个包括 32 个类星体的中等亮类星体样本（the Medium Bright Quasar Sample, 即 MBQS），样本的极限星等与选区有关，最深的约 17.6 等(见 Mitchell et al. (1984)[13])。

U、B、V 的波长较短。UBV 三色巡天有利于探测低红移类星体。如果要探测高红移类星体，仍可用三色巡天，但必须用其它颜色的滤光片。如 Monier et al.(2002)[14] 进行的 BAC40 巡天是一个很好的例子。该巡天利用位于智利 La Serena 的 CTIO(Cerro Tololo Inter-American Observatory)4 米镜进行，极限星等可以很暗。该巡天的目的主要是探索发现高红移类星体的方法，用了 V，I，z(中心波长 8932Å)滤光片，在(V-I) - (I-z)两色图(见图 2.7)上选取类星体候选者。BAC40 巡天发现了两个高红移类星体(z_{em}= 4.6, 4.8)。

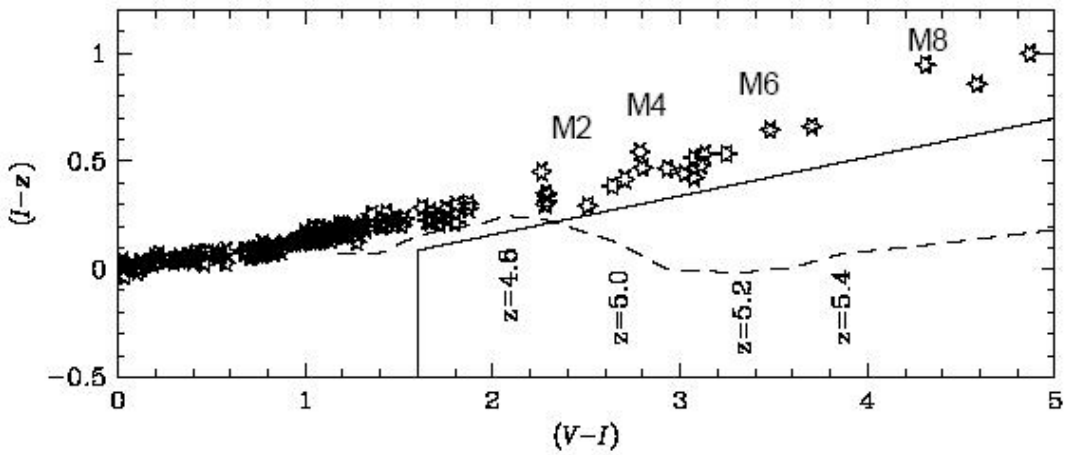

图 2.7 (V-I) – (I-z) 两色图。虚线为从 10 个类星体光谱计算的红移在 4 到 6 的类星体的平均位置。因此，右下的两条实线包围的区域就是类星体所在的位置。图中还列出几个红移数字。取自 Monier et al.(2002)[14]。

另一个例子是著名的 2dF(2-degree Field)类星体红移巡天(2QZ)。这个巡天利用 UKST 的 U、B_J 、R 三色底片，通过 APM 测量天体的星等，在(U - B_J)-(B_J – R)两色图(见图 2.8)上选取侯选者。由于用了 U - B_J ，可以寻找紫外超类星体，加上 R 后，可以寻找 z_{em}> 2.2 的高红移类星体。从图 2.8 可以明显看出，这种方法比单纯的紫外超巡天能选出更多的类星体。2dF 类星体红移巡天计划发现 25000-30000 个类星体，现已全部完成，发现的类星体超过 26000 个(见 Smith et al.(1998)[15], Boyle et al.(2000)[16])。

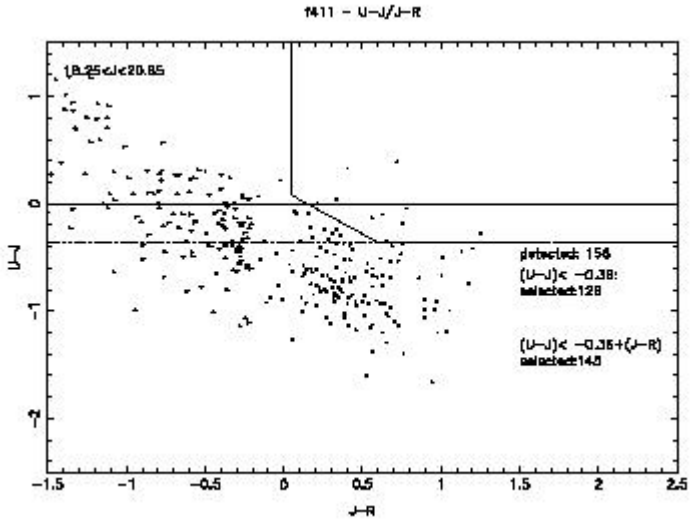

图 2.8　$(U-B_J) – (B_J-R)$ 两色图。小黑点为恒星，大黑点为类星体，箭头指只有 R 星等上限的天体。点线为选取类星体候选者的界限。虚线为 U-J = -0.36，即 UVX 的选择标准。由图明显可以看出，这种方法比单纯的 UVX 能选出更多的类星体。取自 Boyle et al.(2000)[16]。

还可以用更多的颜色，不同颜色的组合就可得到更多的两色图。例如，早期 Koo 和 Kron(1982)[17]对 SA68 进行了四色（U、J、F、N）巡天。巡天的面积仅 0.29 平方度，但样本的极限星等达 23 等。而 Warren et al.(1991)[18]用了常用的 U、B、V、R、I 五种滤光片。其它的例子还有：Zitelliet al.(1992)[19], Boyle et al.(1991)[20], Koo & Kron(1987)[21], Kennefick et al.(1997)[22]等。

特别需要提到的是近年来开展的 SDSS 巡天（the Sloan Digital Sky Survey）。这个巡天利用位于美国新墨西哥州 Sunspot 的 Apache Point Observatory 口径 2.5 米的改进 Ritchey-Chretien 地平式望远镜进行。该望远镜的视场较大，达 3°。其测光系统由 5 种颜色的宽带滤光片(括号内的数字为中心波长) 组成：

u’ (3551Å),　g’ (4686Å),　r’ (6166Å),　i’ (7480Å),　z’ (8932Å).

波长覆盖 3000-10000 Å。搜寻 b>30° 高银纬区域约 10000 平方度天空及南银帽部分天空。各波段测光的极限星等分别为 22.3(u’), 23.3(g’), 23.1(r’), 22.3(i’), 20.8(z’)。预计将发现 10^5 个类星体和 10^6 个星系。

由 SDSS 巡天 5 种颜色的测光资料可以组成多个两色图。在每一张两色图上怎样确定具体的判据是多色巡天成败的关键。简单的方法是用肉眼直接察看恒星在两色图上的位置，并指定一个边界。在此边界以外的就是类星体候选者。更好的方法是计算每个天体在多维颜色空间中的轨迹，并与与恒星的轨迹比较。当两者的距离大于某个值时，该天体就被选为类星体候选者。

图 2.9 是 SDSS 巡天中一个 20 平方度天区的测光资料构成的部分两色图，取自 Fan et al.(1999) [23]。图中的小黑点代表恒星，实线代表模拟类星体颜色的平

均轨迹。(b)和(c)中的阴影部分代表选取类星体候选者的判据。我们看到，类星体和大部分恒星在颜色空间中占据不同的位置，据此可以把类星体同恒星分开。关于 SDSS 巡天的详细介绍可参见 York(2000)[24], Fan et al.(2001)[25], Schneider et al.(2002)[26]等。

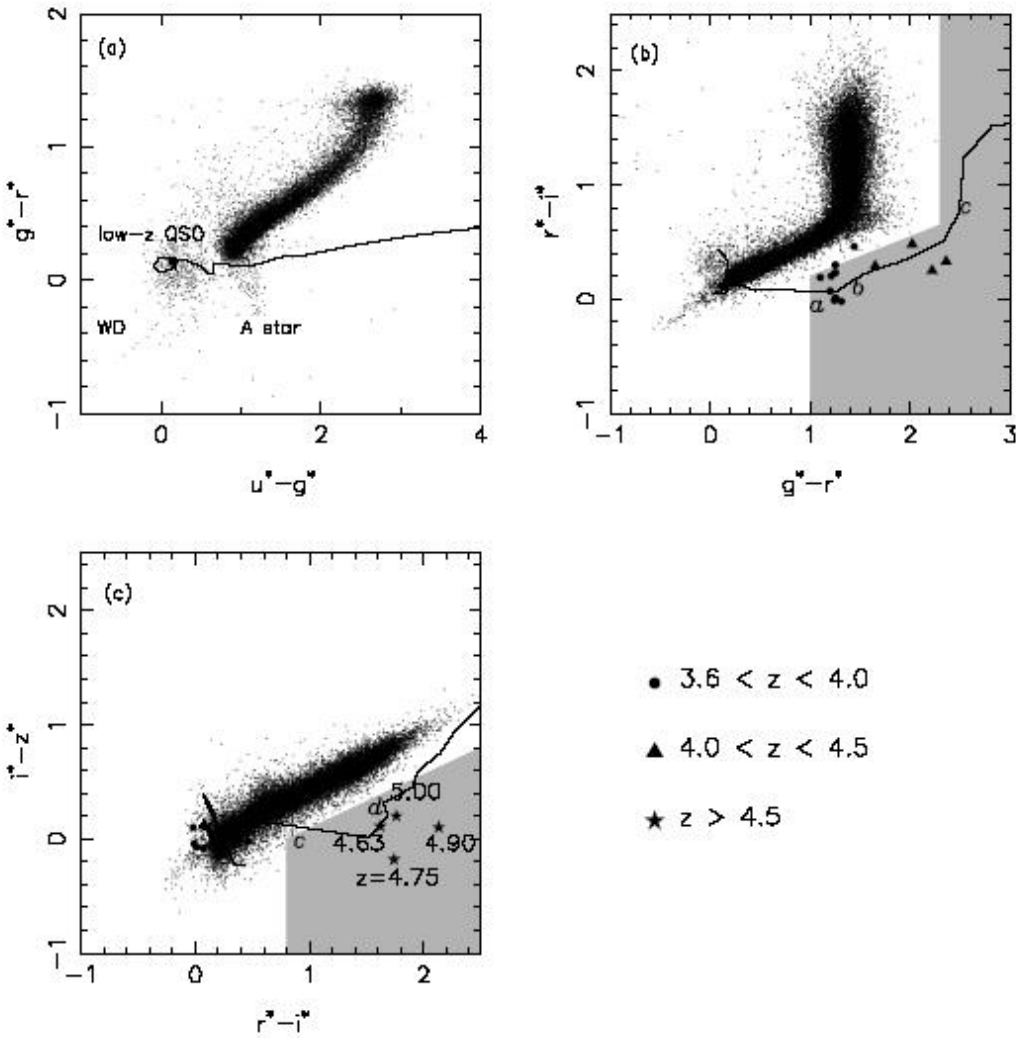

图 2.9 SDSS 的两色图,取自 Fan et al.(1999)[26]。图中的小黑点代表恒星，实线代表模拟类星体颜色的平均轨迹。(b)和(c)中的阴影部分代表选取类星体候选者的判据。字母 a,b,c,d 分别代表 z=3.6,4.0,4.6,5.0 的类星体在两色图上的位置。圆点、三角和五角星为已发现的 17 个高红移类星体，图的右下部给出相应的红移值。

与紫外超巡天相比，多色巡天的工作量更大。不过，由于选择候选者的判据只是天体在两色图上的相对位置，对测光精度的要求并不高。但多色巡天的效率很高，得到的类星体样本也更完备。特别是，只要波长覆盖范围足够大，它可以发现高红移类星体。截至 2001 年止，SDSS 巡天已经发现了几千个类星体，其中 200 多个的红移大于 3.5, 而且有 4 个类星体的红移大于 6 (z_{em} 分别为 6.43,

6.28, 6.23, 6.05)。SDSS 巡天由于用了 z 滤光片，理论上它可以发现红移高达 6.5 的类星体。

3. 光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED)

紫外超巡天和多色巡天都是利用宽带(FWHM ~ 1000 Å)测光资料。在颜色巡天中也可以用中带(FWHM ~ 200 Å)测光资料。如果有十几个颜色的中带测光资料，就相当于得到了一个低分辨率光谱。如果能够区分不同天体的 SED，自然就可以选出类星体或类星体候选者。

关键的问题是从已有的资料中对所用的测光系统建立各类恒星、星系和类星体的 SED。然后确定具体的判据。由于不可能将恒星、星系和类星体的 SED 截然分开，这种方法一般来说并不能直接发现类星体，同前面一样，也需首先选取类星体候选者。

CADIS 巡天和 BATC 巡天是这类巡天的两个代表。

CADIS 巡天[27](Calar Alto Deep Imaging Survey)用了 13 个中带滤光片和 B、R、J、K’四个宽带滤光片，波长覆盖 4000 – 9300 Å。利用 Calar Alto 天文台的 2.2 米和 3.5 米望远镜对北天 0.25 平方度天区进行观测，获得天体的 SED。这是一个小天区深度巡天，其极限星等 R=23 等。

表 2.1 BATC 巡天的滤光片

滤光片号(代码)	中心波长(Å)	FWHM(Å)
1 (a)	3370.94	260.92
2 (b)	3894.30	220.01
3 (c)	4201.43	217.51
4 (d)	4546.38	261.10
5 (e)	4872.35	264.32
6 (f)	5247.40	248.64
7 (g)	5783.72	207.10
8 (h)	6073.29	223.52
9 (i)	6709.85	367.38
10 (j)	7010.31	142.66
11 (k)	7526.53	147.16
12 (m)	8024.42	210.20
13 (n)	8517.16	178.65
14 (o)	9172.83	228.38
15 (p)	9723.44	220.89

BATC(Beijing – Arizona – Taiwan – Connecticut)巡天利用国家天文台兴隆观测站的 60/90 cm Schmidt 望远镜对北天 500 个天区进行搜寻。与传统的 Schmidt 望远镜使用照相底片不同，BATC 巡天改用高灵敏度的 CCD。因此，虽然望远镜的口径较小，巡天仍能达到一定的深度。BATC 巡天的测光系统由 15 个颜色的中带滤光片组成, 波长覆盖范围为 3100 - 10000Å。表 2.1 给出 BATC 巡天所用滤光片的参数。

利用 15 个颜色的测光资料可以得到天体的 SED。为了搜寻类星体候选者，首先必须利用已有的资料得到恒星、星系和类星体的 SED。然后，确定判据，根据实测得到的 SED 选择候选者。图 2.10 给出 BATC 巡天系统的恒星的 SED。图中的英文字母指光谱型。未标符号的曲线为 z=3.33 的类星体的 SED。

BATC 巡天已搜寻到一大批类星体候选者且已发现了不少类星体，但证认工作尚未全部完成，目前正在进行中。

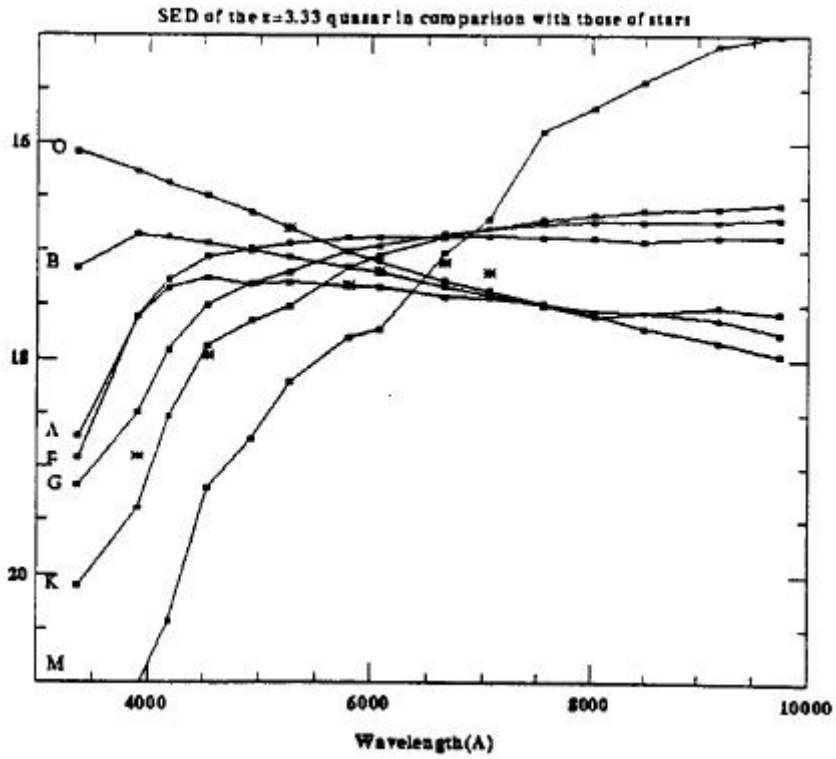

图 2.10 BATC 巡天的各光谱型恒星的 SED。未标符号的曲线为 z=3.33 的类星体的 SED。国家天文台 BATC 小组提供。

§2.2.2 光谱巡天

1．无缝光谱巡天

利用物端棱镜（objective prism），棱栅（Grism）或透镜棱栅（Grens）得到的低分辨率无缝光谱，通过探测光谱中的发射线，可以有效地发现类星体。当 z_{em}> 1.7 时，Lyα 强发射线进入观测窗口，很容易被探测到，无缝光谱方法最有效。

如果 z_{em}< 1.7, 由于光谱中没有强 Lyα 发射线，而弱发射线在无缝光谱中又难以探测，无缝光谱方法虽说仍可使用，但效率很低。红移很高时，无缝光谱方法的效率取决于探测器的极限波长，关键是 Lyα 发射要出现在观测窗口。像过去常用的物端棱镜和照相底片方式得到的无缝光谱，由于照相底片的分光灵敏度在 λ > 5300Å 时急剧下降，z_{em} > 3.5 的类星体的 Lyα 发射已观测不到，因而也不可能被发现。

最早进行无缝光谱巡天的是 Hoag 和 Smith(1977)[28]，他们发现了许多 z_{em} > 2 的类星体。此后许多人利用 UK Schmidt 物端棱镜光谱进行了类似的工作[29-32]。但这些早期的无缝光谱巡天用人眼直接在照相底片上挑选候选者，不同的人有不同的选择标准，因此，人为的选择效应很严重。虽然也能找到许多高红移类星体，但样本的完备性差。以后的无缝光谱巡天都改用仪器自动搜寻候选者，以避免人为的选择效应,可以得到较好的样本。典型的如 LBQS（Large Bright Quasar Sample）[33-38]和 Palomar Grism Survey[39,40]。LBQS 巡天覆盖了 800 平方度天空，从物端棱镜光谱的测量资料中选择有强发射特征(或吸收特征)，或连续光谱明显断裂，或颜色很蓝的天体作为候选者。LBQS 的极限星等 m_B = 18.8 ，包含大约 1000 个类星体。其它的还有[41-44]。

无缝光谱巡天发现类星体的效率很高，但有一些明显的缺点。例如：

(1) 无缝光谱巡天以发射线的强弱为判据，发射线很弱时就可能被漏选。在某些红移区间，落入观测窗口的发射线很弱，即便是用仪器检测也不一定能发现。另外，一般来说，发射线(如 C IV)强的类星体对应的光度也高。因此，无缝光谱巡天倾向性选择高光度类星体。

(2) 发射线的强弱与连续光谱流量没有什么关系。发射线很强但连续辐射低于探测极限的类星体仍可探测到。因此，当以发射线的强弱为判据时，很难准确地决定样本的极限星等。

(3) 由于是光谱，天体的辐射被色散到许多个象元。但天光并不因此而减弱。因此，无缝光谱的信噪比不如宽带测光。也就是说，无缝光谱巡天的观测深度(极限星等)不如颜色巡天。

(4) 对于比较密集的星场，可能会发生光谱的重叠，降低观测效率。

2．其它光谱巡天

光纤技术应用到天文观测极大地提高了观测效率。光纤技术使我们可以同时观测几十到几百个天体，获得它们的光谱，因而成为巡天的重要手段。然而，星场中恒星实在太多，即便用光纤，也不可能观测星场中的全部天体。因此，一般来说，光纤观测的目标仍是候选者。在小天区进行深度巡天时，观测对象集中，应用光纤技术很有利。光纤技术不能算是独立的巡天方法。但在现代的许多巡天工作中，都应用了光纤，如 2dF 和 SDSS 巡天。2dF 巡天的光谱工作利用了

AAT(Anglo-Australian Telescope)上的 2 度视场(2-degree Field)设备，即一个多目标光纤光谱仪。该光谱仪有 400 条光纤，可以同时拍 400 个天体的光谱，极大地提高了观测效率。SDSS 巡天则用了 640 条光纤。

§2.2.3 光变巡天

类星体的光变特征也可用来搜寻类星体。由于类星体的光变时标为年，用来搜寻类星体的测光资料必须间隔一年以上。而且，最好要有时间间隔较长的几个历元的测光资料。类星体光变幅较小，一般小于 $0^m.1 \sim 0^m.2$, 因此，用于巡天的资料应有较高的测光精度。

由于变星相对较少，通过光变选取的候选者中类星体占了相当的比例。因此，光变巡天是搜寻类星体的很有效的方法。例如，Hawkins(1983)[45]研究了一个天区，找到了一批变光天体。去掉其中的变星后，在 B=17 – 18.5 之间还有 11 个变光天体。经光谱观测发现，这 11 个变光天体全部是类星体。其中，10 个具有紫外超，另一个是高红移类星体，z_{em}= 2.94. 可见，光变方法证认类星体的效率很高。Usher et al.(1983)[46]的研究得到类似结果。

在一些特殊的天区，如球状星团和大小麦哲伦云，由于恒星密集，尘埃消光严重，颜色巡天和光谱巡天的效率很低。光变巡天却有很好的效果。Geha et al. (2003)[47]利用一个长达 7 年的测光数据，通过光变在大小麦哲伦云天区选取了 360 个类星体候选者，对其中的 259 个进行光谱观测，发现了 47 个类星体(其红移在 0.2 – 2.8 之间，V 星等在 16.6 – 20.1 之间), 其中，大麦哲伦云天区 38 个，小麦哲伦云天区 9 个，是以前所知类星体(12 个)的 4 倍。证认类星体的效率达 20%。Dobrzycki et al. (2003)[48]在小麦哲伦云天区也做了类似的研究, 发现了不少类星体。

光变巡天的主要缺点是：

(1) 至今我们都不知道变光类星体占全部类星体的比例是多少。因此，难以对样本的完备性进行判断。

(2) 由于测光精度的限制，微小光变的类星体可能被忽略。光变方法更倾向于发现有强烈光变的类星体，如 OVV。

(3) 观测到的光变时标相对于静止坐标的光变时标多了(1+z)因子，因此，光变巡天倾向于探测低红移类星体。但是，类星体光变幅与红移没有明显关系。因此，如果光变资料的时间跨度足够长，光变巡天就没有与红移有关的选择效应，光变巡天的样本对红移而言是无偏的。

(4) 类星体光变与光度反相关：光度大，光变幅小。因此，光变巡天倾向于选择低光度类星体。如果将光变方法同其它倾向于选择高光度类星体的巡天方法联合使用，将有助于改善样本的完备性。

§2.2.4 零自行巡天

类星体是遥远的河外天体，其自行为零。因此，根据自行的测量可以把类星体同银河系内的恒星区别开。有人利用此方法发现过一些类星体。由于测定自行很困难，需要积累很长时间的观测资料，而且精度不高，因此，通过零自行发现类星体的方法效率很低。这个方法不常采用。但是，零自行巡天只用自行，并不涉及到类星体的物理性质和测光、分光等观测特征，因此，零自行巡天得到的类星体样本理论上应该是无偏的。在某些特殊情况，零自行巡天可以作为其它巡天方法的很好的补充。

Meusinger et al.(2002)[49], Brunzendorf et al.(2002)[50]将光变方法和零自行方法结合起来对球状星团 M3 和 M92 周围共约 10 平方度的天区进行了巡天。他们利用时间跨度长达 30 年的大量 Schmidt 底片对这两个天区的天体进行测光和自行测量，从中选出类星体和 Seyfert 1 星系候选者。对 M3 周围星场，得到 175 个候选者。光谱观测的结果发现了 114 个类星体和 10 个 Seyfert 1 星系，是以前光学巡天所发现的类星体和 Seyfert 1 星系的 3 倍。证认的效率高达 70%。在最优先的 80 个类星体候选者中证认了 75 个类星体(Seyfert 1 星系)和两个窄发射线星系，证认的效率高达 95%。这个类星体样本的红移在 0.4 – 3 之间，极限星等 B = 19.7，物理性质与颜色巡天和光谱巡天发现的类星体没有明显差别。对 M92 周围星场，探测到 95 个类星体和 14 个 Seyfert 1 星系，在最优先的 92 个类星体候选者中证认了 70 个类星体和 9 个 Seyfer 1 星系，证认的效率达 86%。Marano et al. (1988)[51]甚至将光变和多色及无缝等多种方法结合起来进行巡天。

§2.3 其它波段巡天

§2.3.1 射电巡天

最早发现的一些类星体都是射电类星体。现已知道，射电类星体只占类星体总数的大约 10%。尽管如此，由于射电类星体是类星体的一大类，通过射电巡天搜寻射电类星体仍是极有意义的工作。特别是，射电巡天不受红移影响，因此，通过射电巡天有可能发现人们特别感兴趣的高红移类星体。

射电巡天本质上就是射电源的光学证认。如果射电源的位置很准确，例如 1″左右，则对北天的源利用 Palomar 天图(Palomar Observatory Sky Survey, POSS)，南天的源利用 ESO/SRC 巡天图就很容易通过射电源的位置找到其光学对应体。余下来的就是对该光学对应体进行光谱观测，以确定其性质。但一般的射电源表，射电源的位置不够准确，在误差框内有多个光学天体(恒星状天体、星系等)，难以直接确定射电源的光学对应体。这时，可采用干涉或其它射电天文方法提高射电源的位置精度。不过，这是非常费时的。但如果是为了发现类星体，常用的方法则是结合光学巡天(例如紫外超)进行，首先在射电源位置误差框内的光学天

体中选取类星体候选者。然后再进行光谱观测，确定候选者的性质，找出其中的类星体。

射电巡天中最具代表性的是 1950 年代就开始的剑桥大学的低频射电巡天。在早期的 3C，3CR，4C 射电源表中证认了许多类星体，如 3C273，3C48，3C279 等等。3C，3CR，4C 巡天的工作频率为 178 MHz. 3C 巡天的极限流量为 9Jy,共探测到约 500 个源。3CR[52]表是 3C 表的修订本，它有更准确的流量测量。但 3CR 表只给出δ >-5°的共 328 个源，极限流量仍为 9Jy。4C 巡天[53,54]要深一些，其极限流量为 2Jy。

早期的剑桥大学射电巡天的位置精度较差，确定射电源的光学对应体很困难；另一方面，灵敏度不高，不能探测弱源。以后进行的巡天在这两方面都有很大改进。例如，5C 巡天[55]的极限流量达到 10 mJy(408 MHz)和 2 mJy(1.4 GHz)。而利用 Cambridge Low Frequency Synthesis Telescope(CLFST)进行的 7C 巡天,在频率 151 MHz, 极限流量约 0.1 Jy, 位置精度可达几角秒。在这种情况下，直接利用 POSS-I 资料就很容易确定射电源的光学对应体。Rileyet al. (1999)[56]对 7C 巡天的一个 0.057 平方度小天区的射电源进行了 VLA(甚大阵)观测，使射电源的位置精度达 0.3 角秒。由此可以准确地确定射电源的光学对应体，并从中证认了 70 个射电噪类星体。

与剑桥大学的低频射电巡天类似，澳大利亚利用 Parkes 射电望远镜进行了巡天。Parkes 巡天[57,58]覆盖全部南天，频率 408 MHz, 略高于剑桥，极限流量为 3 Jy，低于 3C(3CR),与 4C 接近。此外，在 408 MHz 进行巡天的还有 Molonglo 巡天[59]和 Bologna 巡天[60,61]。所有这些巡天发现的射电源都进行了光学证认，搜寻到大量的类星体。

高频方面也开展了巡天。早期最重要的是美国 Green Bank 的 NRAO(National Radio Astronomical Observatory)[62]和澳大利亚 Parkes Radio Observatory[63]开展的巡天。NRAO 巡天用的频率为 1.4 GHz 和 5GHz，极限流量约 0.8 Jy；Parkes 巡天用的频率为 2.7 GHz，极限流量约 0.7 Jy。近期最重要的当数 FIRST(Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters)巡天[64]。这个巡天利用位于美国新墨西哥州的甚大阵(VLA，Very Large Array)进行，工作频率为 1.4 GHz。FIRST 巡天的特点是：(1)深度巡天，极限流量为 1 mJy；(2)巡天面积大，达 10000 平方度；(3)位置精度高，达角秒。还有一些高频射电巡天，但它们巡天的面积比较小。

利用高频射电巡天的结果也开展了类星体巡天。一般来说，高频射电巡天的位置精度较高，确定光学对应体较容易。Becker, Write, Gregg 等人利用 FIRST 巡天结果进行了亮类星体巡天，即 FBQS(FIRST Bright Quasar Survey)[65-67]。现已完成了北银帽区 2682 平方度和南银帽区 589 平方度的巡天。类星体候选者的选取很简单，只有两个条件：(1)射电位置和光学位置符合得很好，两者之差小于 1″.2；

(2) 恒星状天体。北银帽区找到了 1238 个候选者，证认了 636 个类星体，其中，467 个是新发现的，样本的极限星等为 17.8 等；南银帽区找到了 522 个候选者，证认了 321 个类星体，其中，264 个是新发现的，样本的极限星等为 18.9 等。我们看到，FBQS 证认类星体的效率很高，超过 60%。如果选取候选者时增加一些判据，证认效率可提高到 85% 。

还有另一种射电巡天，即探测由其它方法(特别是光学巡天)发现的类星体的射电辐射。

§2.3.2 红外巡天

类星体的红外辐射较强。类星体的这一观测特征也可用来搜寻类星体。同射电巡天一样，红外巡天本质上是红外源的光学证认。由于地面上进行红外观测受天气和环境的影响较大，红外巡天一般是利用卫星。典型的红外巡天如 1980 年代的 IRAS(Infrared Astronomical Satellite) 巡天和 1990 年代的 2MASS(2 Micro All Sky Survey)巡天。

IRAS 巡天[68,69]在如下四个红外波段进行(括号内的数字表平均波长)：8.5μ – 15μ (12μ), 19μ – 30μ (25μ), 40μ – 80μ (60μ), 83μ – 120μ (100μ)，极限流量在 0.3 – 3 Jy。IRAS 巡天共发现了 10^5 个红外源。红外源的定位精度为几角分。通过证认，在 IRAS 红外源的光学对应体中找到了类星体、活动星系核(如 Seyfert 星系)、红外亮的星系等，当然，也有恒星。不同类型的红外源在上述四个波段的辐射性质互不相同。一般来说，红外辐射是尘埃的热辐射。正常星系的尘埃的色温度约 30K, 红外辐射主要在 60μ – 100μ 波段，而类星体和活动星系核的尘埃的色温度在 100-300K，其红外辐射主要在 12 - 25μ 波段。IRAS 巡天探测到一批红外辐射非常强的星系，也探测到许多类星体，但类星体中的绝大多数是以前各类巡天所发现的，只有极少数才是通过红外巡天新发现的。

2MASS 巡天[70]在三个近红外波段：J(1.25μ)，H(1.65μ)，K(2.2μ)进行。虽然这个巡天的主要目的不是搜寻类星体，但利用其结果也发现了许多类星体。

通过对红外巡天结果的分析，现已认识到，红外巡天(特别是观测 12 - 25 μ 波段的红外辐射)是发现类星体和活动星系核的有效手段。特别是，红外巡天有利于发现被尘埃屏幕的类星体。对于 $z_{em} > 5$ 的高红移类星体，Lyα 等发射线进入红外波段，增强了类星体的红外辐射。即便是低红移类星体，由于光学-红外波段的连续谱近似为幂谱，也有别于恒星。因此，在一些光学巡天中加入 J、H、K 等红外颜色的滤光片，可以提高证认类星体的效率，同时，也有助于发现高红移类星体。

一个很好的例子是 Sharp et al.(2002)[71]在 0.7 平方度小天区完成的光学近红外巡天。他们利用 La Palma 天文台的 2.5 米 Issac Newton 望远镜，从(g-z) – (z-H)两色图(见图 2.11)上选取了 68 个类星体候选者，极限星等 $m_H \approx 18$。选取类星体

候选者的判据是(z-H) > 0.59(g-z)-0.06(图 2.11 中的点虚线)。并对其中 32 个候选者进行了光谱观测，找到了 22 个类星体(0.86< z_{em}<2.66)，其中，5 个具有明显的红外超。证认类星体的效率大于 65%。

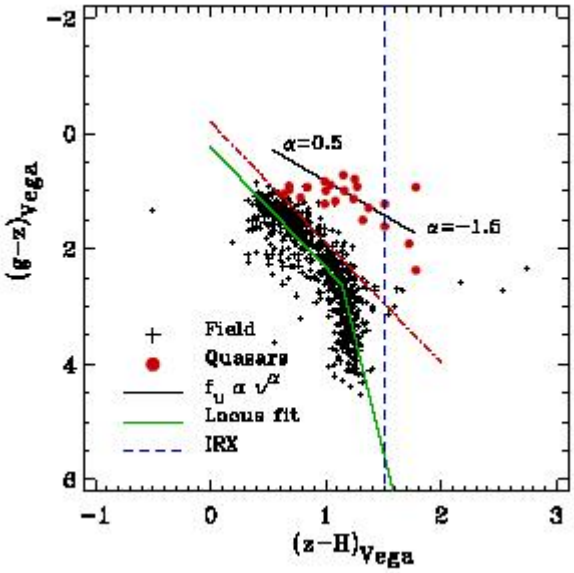

图 2.11 光学-近红外两色图，取自 Sharp et al.(2002)[71]。加号为场星，黑点为证认的类星体，点虚线为选取类星体候选者的界线，虚线表红外超。实线是对已证认类星体拟合的结果，对应于谱指数 α = 0.5(取 $f_\nu \propto \nu^\alpha$)。

§2.3.3 X 射线巡天

X 射线是类星体主要观测特征之一。只有少数恒星和星系的 X 射线-光学流量比与类星体的相当，因此，通过探测天体的 X 射线辐射也是发现类星体的有效手段。

由于地球大气，X 射线巡天只能利用空间设备。已经进行的 X 射线巡天包括硬 X 射线巡天和软 X 射线巡天。前者如 HERO-1(1st High Energy Astrophysical Observatory) All-Sky Survey(见 Piccinotti et al.(1982)[71])： 工作波段 2-10 keV, 极限流量为 (1-3) × 10^{-11} erg cm^{-2} s^{-1}, 巡天面积约 40000 平方度。后者如 EMSS(Einstein Medium Sensitivity Survey)巡天（见 Gioia et al(1990)[73], Stoke et al. (1991)[74]）：工作波段 0.3 – 3.5 keV，极限流量 6×10^{-14} erg cm^{-2} s^{-1}，巡天面积 780 平方度；EXOSAT(European X-ray Observatory)巡天：工作波段 0.05– 2.0 keV，极限流量 3×10^{-13}- 3×10^{-12} erg cm^{-2} s^{-1}, 巡天面积 820 平方度 和 ROSAT(Rontgen Satellite)巡天(Boyle et al.(1993)[75])：工作波段 0.1 – 2.0 keV, 极限流量 5×10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1}（ROSAT 深度巡天的灵敏度要高些，其极限流量在 6.5×10^{-14} - 3×10^{-15} erg cm^{-2} s^{-1} ），巡天面积 40000 平方度 。

X 射线巡天的效率很高。例如，EMSS 巡天探测到的 1400 个源中约 30%是

类星体和活动星系核。观测表明，类星体的硬 X 射线很强。因此，硬 X 射线巡天可能是最无偏的。但软 X 射线有所不同。宽吸收线类星体(详见 § 10.6)的软 X 射线很弱。软 X 射线巡天将难以发现这一部分类星体。这是 X 射线巡天的一种选择效应。

X 射线观测的定位精度不高。一般来说，硬 X 射线源的位置精度大于几角分，而软 X 射线源要高些。如 EMSS 的 X 射线源的位置精度在 35″- 70″，而 ROSAT 全天巡天的位置精度为 0.5 ′ (强源) - 1.5 ′ (弱源)。 无论是哪种情形，在 X 射线源位置的误差框内一般都有多个光学天体。因此，X 射线巡天常需结合光学巡天，以确定 X 射线源的光学对应体。另外，由于 X 射线探测器的灵敏度的限制，X 射线巡天的深度不够，难以发现暗弱的高红移类星体。

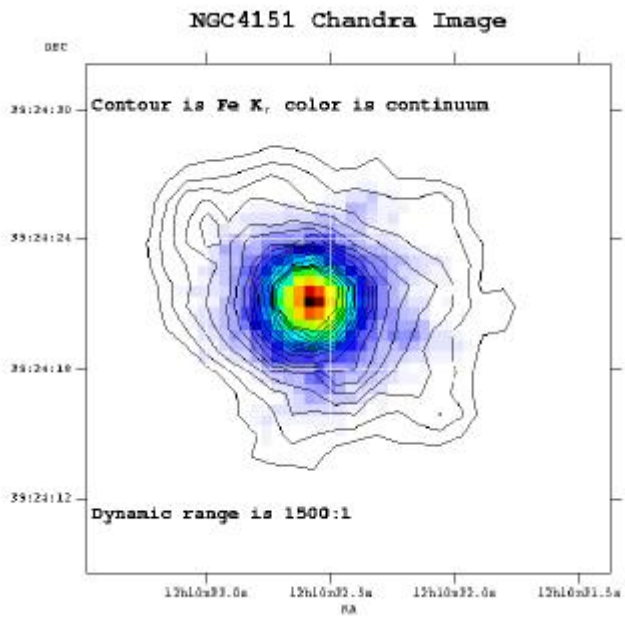

图 2.12 Seyfert 1 星系 NGC 4151 中心区域在 3-5 keV 波段的高分辨率 Chandra 像,取自 Mushotzky(2002)[76]。等强度线代表的是 Fe K 带(6.2-6.8 keV)。

新一代 X 射线探测器在上述两方面都有很大改进。1999 年 7 月 23 日 NASA (美国国家航空和宇宙航行局) 为了庆祝美籍印裔科学家 Subrahmanyan Chandrasekhar 获得诺贝尔物理奖发射了以他的名字命名的 X 射线探测器，即 Chandra X-ray Obsevatory(CXO)。 CXO 以前称为 Advanced X-ray Astrophysics Facility(AXAF), 其工作波段为 0.1-10 keV。1999 年 12 月 10 日 ESA(欧洲航天局) 则发射了 XMM(X-ray Multi Mirror)-Newton Observatory。这两个 X 射线探测器的特点是：(1) 灵敏度比以前的 X 射线探测器高 100 倍；(2) 角分辨率高。例如，Chandra X-ray Obsevatory 的定位精度高达 0.5″. 在这种情况下，不仅很容易确定 X 射线源的光学对应体，而且可对 X 射线源进行成像观测，研究其结构。图 2.12

是 Chandra 得到的 Seyfert 1 星系 NGC 4151 中心区域的高分辨率像：着色部分为 3-5 keV 波段的像，曲线为 Fe K 带(6.2-6.8 keV)辐射的等强度线。可以看出，NGC 4151 中心区域已经被分解开了。XMM- Newton Observatory 的角分辨率略低，约 6″，如要搜寻类星体，需结合光学巡天。(3)具有多波段研究功能。例如，XMM-Newton 在进行 X 射线观测时可以同时进行 UV 光谱观测。(详细的讨论见 Mushotzky(2002)[76], Mushotzky et al. (2000)[77], Hasinger et al.(2001)[78], Hasinger (2003)[79]等)。

Chandra X-ray Obsevatory 和 XMM –Newton Observatory 的高灵敏度和高空间分辨率使其有能力在每平方度天空探测到 1000 个以上的 X 射线源（作为比较，ROSAT 全天巡天的面积约 40000 平方度，可探测 10^5 个 X 射线源，每平方度只有几个 X 射线源），因此，这两个 X 射线探测器无疑地是发现类星体（活动星系核）的强有力的武器。

§2.3.4 γ射线巡天

类星体有γ射线辐射，但普通的恒星没有。显然，通过探测γ射线源来搜寻类星体应该是发现类星体的有力手段。但目前尚未广泛开展γ射线巡天，其原因是技术上的困难很大。一方面，γ射线探测器的灵敏度不高，很难探测流量低的γ射线；另一方面，定位精度不高，很难达到 1º。

已经进行的γ射线巡天是用康普顿γ射线天文台(Compton Gamma-Ray Observatory)上的高能γ射线实验望远镜(Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope, EGRET)进行的。探测的能量范围：30 MeV – 3 GeV；流量极限：10^{-11} erg cm^{-1} s^{-1}．虽然定位精度只有 5º，但仍找到了不少点源，截至 1996 年，在已发现的 157 个点源中，证认出 43 个类星体(活动星系核)和 11 个可能的类星体或活动星系核(见 Thompson et al.(1995)[80]，Thompson et al.(1996)[81]）。

§2.3.5 亚毫米波巡天

亚毫米波是一个重要的观测波段。近年来已开展了亚毫米波巡天。由于对类星体的亚毫米波辐射的性质还不够了解，目前的巡天集中在探测不同红移的类星体的亚毫米波辐射。亚毫米波巡天现在尚未成为发现类星体的独立方法。

最重要的亚毫米波巡天是 SBQS（SCUBA 亮类星体巡天，即 SCUBA Bright Quasar Survey）[82,83]。这个巡天用的设备是 James Clerk Maxwell Telescope 上的 SCUBA(Submillimetre Continuum Bolometer Array)，工作波段 850μm。已探测到许多类星体的亚毫米波辐射。

§2.3.6 多波段巡天

有些天区具有多波段观测资料，利用前面提到的各种巡天方法来搜寻类星体显然可以提高证认类星体的效率，减小样本的不完备性。这就是所谓多波段巡天。例如，He et al.(2001)[84],Chen et al. (2002)[85]对 Coma 星系团和 Leo 星系团所在天

区进行了多波段巡天。他们从 ROSAT 巡天中选取 X 射线源，从 FIRST 巡天中选取射电源，同时，也从 UK Schmidt 望远镜得到这两个天区的物端棱镜光谱。三个波段的资料结合起来选取类星体候选者，极大地提高了证认效率。

多波段巡天能够发现较多的类星体，证认类星体的效率也较高，这是其优点。但由于各波段都有各自的选择类星体侯选者的判据，巡天的深度也可能不同，因而难以统一地定义样本的极限星等。

§2.4 巡天结果

§2.4.1 样本

巡天的结果就是得到一个类星体样本。在很多情况下，人们希望得到的是一个流量限制（flux limited）的完备样本，即流量大于某个极限流量的类星体全部被包含在样本中。这样的样本有利于进行各种统计研究，如类星体的空间分布、光度函数(见§9)等。但是，由于巡天方法的不完善，实际上很难得到真正完备的样本。完备样本只是一个追求的目标。实际工作中通常不会过分严格的要求样本的完备性。

实际工作中如何检验样本的完备性？一般认为，一个完备样本应当满足下列条件：

(1) 在所巡天的天区中以前发现的类星体都已找到，而且，亮于某个极限视星等(或流量大于某个极限流量)的类星体累计面密度比以前的巡天结果大。

(2) 面密度随视星等的增加而增加，而且，斜率(即 d logN/dm）同以前巡天的结果类似。

如何确定完备样本的极限星等（流量）呢？由于面密度随视星等的增加而增加，因此，当面密度-视星等曲线由上升转为下降时，转折点对应的星等即为该流量限制的完备样本的极限星等。如果类星体数量不够，面密度-视星等曲线上不出现转折点，此时可取最暗类星体的星等为样本的极限星等。或者利用类星体侯选者的面密度-视星等曲线来确定样本的极限星等。

一个大天空面积的巡天总是分成若干小天区分别完成的。由于测光时条件的不同，不同天区的样本的极限星等可能会有所不同。

§2.4.2 面密度

类星体的面密度，即每平方度天空的类星体数，除了受样本完备性的影响外还与其它一些因素有关。主要的有：

(1) Eddington Bias.

测光总是有误差的。如果面密度-视星等曲线的斜率不为零，测光误差将改变面密度按星等的分布，这就是 Eddington Bias。

表 2.2(a) 光学选类星体的(微分)面密度（Hartwick & Schade(1990)[86]）

B	0 < z < 2.2		2.2 < z < 3.3	
	Log N	σ	Log N	σ
12.75	-3.7	± 0.7		
13.75	-3.4	± 0.4		
14.25	-3.25	± 0.3		
14.75	-2.65	± 0.15		
15.25	-2.33	± 0.10		
15.75	-1.93	± 0.06		
16.25	-1.70	± 0.10		
16.75	-1.15	± 0.14		
17.25	-0.64	± 0.07	-1.5	± 0.33
17.75	-0.13	± 0.05	-1.3	± 0.24
18.25	0.13	± 0.04	-0.5	± 0.09
18.75	0.77	± 0.04	0.05	± 0.14
19.25	0.95	± 0.04	0.06	± 0.21
19.75	1.20	± 0.04	0.36	± 0.15
20.25	1.32	± 0.07	0.53	± 0.4
20.75	1.36	± 0.08	0.84	± 0.3
21.25	1.6	± 0.03	1.0	± 0.7
21.75	1.6	± 0.03		
22.25	2.0	± 0.02	1.6	± 0.3

N 的单位：平方度$^{-1}$ 星等$^{-1}$。

表 2.2(b) 光学选类星体的(累计)面密度（Hartwick & Schade(1990)[86]）

B	0 < z < 2.2		2.2 < z < 3.3	
	Log N	σ	Log N	σ
13.0	-4.0	± 0.3		
13.5	-3.7	± 0.5		
14.0	-3.55	± 0.4		
14.5	-3.24	± 0.2		
15.0	-2.77	± 0.1		
15.5	-2.39	± 0.07		
16.0	-1.99	± 0.05		
16.5	-1.70	± 0.07		
17.0	-1.23	± 0.09		
17.5	-0.73	± 0.06	-1.8	± 0.4
18.0	-0.23	± 0.04	-1.4	± 0.2
18.5	0.12	± 0.03	-0.69	± 0.08
19.0	0.63	± 0.03	-0.12	± 0.09
19.5	0.93	± 0.03	0.12	± 0.10
20.0	1.21	± 0.02	0.38	± 0.09
20.5	1.40	± 0.03	0.62	± 0.16
21.0	1.52	± 0.03	0.88	± 0.14
21.5	1.73	± 0.10	1.1	± 0.25
22.0	1.87	± 0.10	1.3	± 0.25
22.5	2.11	± 0.09	1.5	± 0.25

(2) 光变。

相当多的类星体有光变。如何确定光变类星体的星等？如果用平均星等，那就需要知道每个类星体的详细的光变资料。如果用“瞬时”星等，由于测光和巡天很可能不是同时进行的，面密度按星等的分布就有可能偏离真实的分布。

(3) 发射线的影响。

宽带测光的星等(常用 B)反映了类星体在测光波段的连续辐射。但类星体有很强的发射线，当发射线进入到测光波段时，就会影响测量的星等。

(4) 红化。

红化显然会影响星等测量。一般都需要做消光改正。

研究表明，上述因素对面密度的影响并不大，只有百分之几。

不同的巡天得到的类星体面密度可能不同。Hartwick 和 Schade(1990)[86]总结了 1990 年以前的光学巡天，给出了光学选类星体的面密度。其结果列于表 2.2 和图 2.13。1990 年以前的巡天很少探测到高红移类星体，因此，表 2.2 中未能列出 $z_{em} > 3.3$ 的类星体。

从图 2.13 可以看到，对于 $z < 2.2$ 的类星体，面密度曲线在 B<19 时迅速上升，d log N(B)/dB ~ 0.8；B>19 后，上升变慢；B~20 时，曲线变平。在 2.2<z<3.3, 没有很亮的类星体。从红移-视星等关系，很容易理解这一点。面密度曲线似乎一直上升。但并不影响总的面密度曲线在 B~20 时变平的趋势。1990 年代的巡天发现了许多 z>3.3 的高红移类星体，但面密度曲线的变化趋势仍一样。

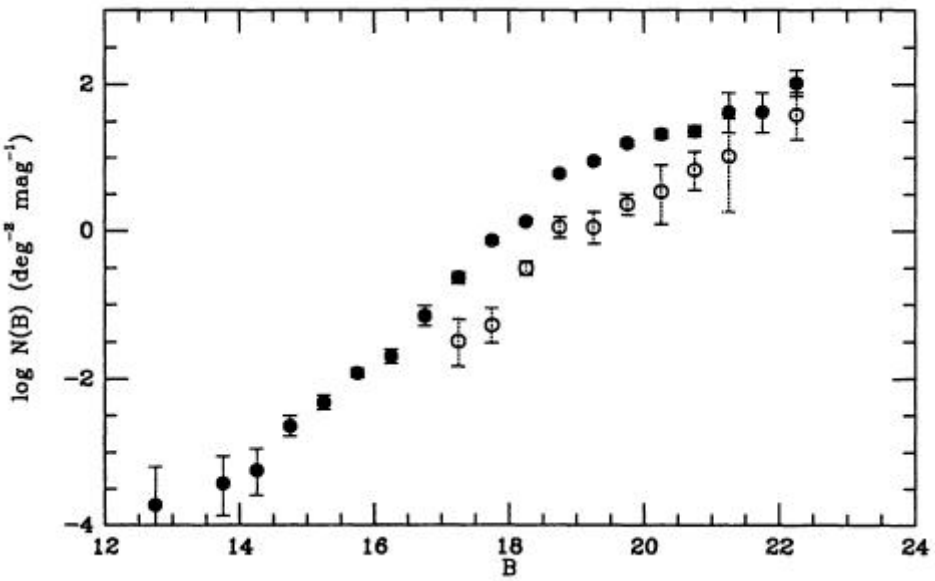

图 2.13 光学选类星体的面密度，取自 Hartwick & Schade(1990)[86]。实心符号代表 $0 < z < 2.2$ 的类星体，空心符号代表 $2.2 < z < 3.3$ 的类星体。