

§ 1. 类星体与活动星系核

§ 1.1 活动星系核的分类

活动星系(active galaxy)是一类特殊的星系,其上存在着猛烈的活动现象或剧烈的物理过程,如超过恒星内部核反应的产能,相对论性高能粒子的产生,非热辐射,高能 X 和 γ 射线,物质的喷射和爆发现象等。但是,活动星系上的这些现象和过程主要发生在星系的核心,或者是从核心引发出来。活动星系的核心即为活动星系核(active galactic nuclei, 简称 AGN)。在现代一般的文献中,除非特别指明,并不严格地区分活动星系和活动星系核,两者都用 AGN 表示。

严格地定义活动星系核是很难的,至今没有一个统一的量化标准。通常是根

据活动星系核的主要观测特征来判断。AGN 的观测特征主要有:

- (1) 明亮的致密核区。有些 AGN,如类星体,只能观测到致密核区,其巨大的辐射光芒掩盖了星系的其余部分;有些 AGN,虽然可观测到星系,但致密核区的辐射占了星系总辐射的相当大的部分。AGN 的光度在 $10^{43} \sim 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$,比正常星系高得多。但尺度很小,一般认为,小于 0.1 pc。

- (2) 在某些波段,如射电、光学、X 射线等,存在非热致连续辐射。此时,谱呈幂律形式: $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$,且辐射是偏振的。或者,在某些波段的辐射是热致的,或以热辐射为主,但热辐射并不起源于恒星。

- (3) 存在强的原子和离子发射线。

- (4) 连续辐射的强度,发射线的强度和轮廓,偏振等可能随时变化。

- (5) 具有比正常星系更强的发射高能光子(X 和 γ 射线)的能力。

具有以上全部或部分特征的称为活动星系核。有些天体,如类星体,具有以上全部特征,是活动性最强的 AGN。有些天体,只具有部分特征,如蝎虎天体,也是典型的 AGN。有些星系,如银河系,中心有星系核,可能满足上面的(2)~(5),但核的辐射功率小,与整个星系的辐射相比微不足道,这种星系核不称为活动星系核。

活动星系核包含很多品种。但目前没有统一的 AGN 分类标准。它们的名称都是历史上形成的,并沿用至今。主要有:

Quasar	类星体
QSO (Quasi-Stellar Object)	类星体。Quasar 和 QSO 一般情况下通用,但有时 Quasar 指射电噪类星体。
Seyfert Galaxies	赛弗特星系
Radio Galaxies	射电星系

BL Lac Objects	蝎虎座 BL 型天体, 简称蝎虎天体
OVV(Optically Violent Variable)	光学激变天体, 多指大变幅变光类星体
Blazar	布莱扎 (BL Lac 和 OVV 的统称)
LINER(low ionization nuclear emission-line region)	具有低电离核发射线区的星系

此外, 还有一些星系与 AGN 有某些类似, 但并没有纳入 AGN 的范畴, 如:

Starburst Galaxies	星爆星系
Markarian Objects	马卡良天体
Zwicky Galaxies	兹维基星系
N Galaxies	N 星系
Ultraluminous Far-Infrared Galaxies	极亮远红外星系

§ 1.2 类星体

§ 1.2.1 发现简史

类星体的发现与射电天文学密切相关。二次世界大战后, 射电天文学迅速发展。到了 1950 年代, 发现了许多发出强烈射电辐射的射电源。由于当时射电望远镜的空间分辨率很低, 绝大多数射电源得不到证认, 人们不知道这些射电源对应于何种光学天体。

1960 年 Mathews 和 Sandage 在射电源 3C48 附近找到一个约 16 等的恒星状天体, 发现这个天体颜色很蓝, 光谱中有很多条发射线, 但未能证认出这些发射线。随后又发现好几个射电源如 3C147、3C196、3C386 等也有恒星状的光学对应体, 光谱中也有未能证认的发射线。

1963 年是值得纪念的一年。那一年的四月, 著名的英国“自然”(Nature)杂志同时刊出四封短信, 宣告了一类新天体的发现。Hazard et al (1963)^[1] 利用月掩射电源的机会用澳大利亚 Parkes 64 m 射电望远镜准确地测定了射电源 3C 273 的位置, 发现其光学对应体是一个恒星状天体, 而且, 光谱中有发射线。Schmidt (1963)^[2] 用当时世界上口径最大的 Palomar 天文台 5 m 光学望远镜得到了这个天体的光谱, 证认了其中的发射线主要是氢的 Balmer 线, 并求出发射线红移 $z_e = 0.158$ 。图 1.1 是其光谱。Oke (1963)^[3] 则得到了这个天体的近红外光谱, 在同样的红移处找到了 $H\alpha$ 发射线, 从而证实了 Schmidt (1963)^[2] 的研究结果。Greenstein 和 Mathews (1963)^[4] 报告射电源 3C 48 的光学对应体的发射线光谱也得到了证认, 并求得其发射线红移 $z_{em} = 0.367$, 高于 3C 273。以后, 许多天文学家致力于从射电源中搜寻类似的天体, 并把这一类天体取名为类星射电源(Quasi-Stellar Radio Source, 简称 QSRS)。后来, QRS 的名称逐渐转化为另一个词: Quasar。

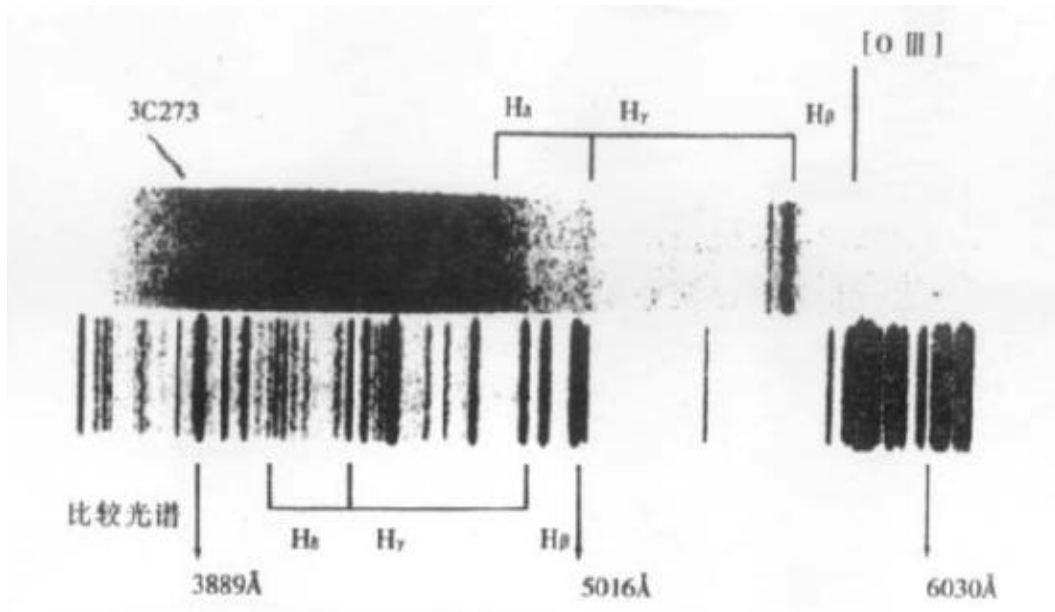


图 1.1 3C273 的光谱。

类星射电源的颜色很蓝，具有紫外超，这使人们想到可以用光学方法去寻找。1965 年 Sandage(1965)^[5]发现了另一类天体，它们呈恒星状，光学波段辐射的性质类似于 3C 273、3C 48 等类星射电源，也就是说有很强的发射线、大红移和紫外超。但是射电辐射非常弱。Sandage 把这些天体称为蓝星体 (Blue Stellar Object, 或 BSO)。以后发现了一大批这种天体，蓝星体的名称逐渐被 QSO(Quasi-Stellar Object)取代。

大量的研究表明，上两类天体除了射电辐射明显不同外，其它方面的统计性质完全相同。因此，它们应该是同一类天体。现统一用 Quasar 或 QSO 表示。中文译为类星体。其中有强烈射电辐射的称为射电噪(radio loud)类星体，射电辐射很弱的则称为射电宁静(radio quiet)类星体。当然，偶尔仍有人用 Quasar 表射电噪类星体。

§ 1.2.2 类星体的基本观测特征

1. 类星

虽然现已确定类星体是活动星系核，哈勃空间望远镜也已观测到某些类星体所在的星系(寄主星系)，但从地面望远镜看去，除极少数外，绝大多数类星体是恒星状天体。这意味着类星体的角直径小于 1"。利用这个特征很容易将类星体与一般的有视面天体(如星系)区分开。图 1.2 是地面望远镜拍到的最早发现的几个类星体的照片,完全是恒星图像。哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)可以将低红移类星体的像分解开，其寄主星系具有各种形态^[6](详见 § 8)。

有些类星体的星像外可以看到喷流。通常喷流出现在射电波段，有些也在光学波段或 X 射线波段。

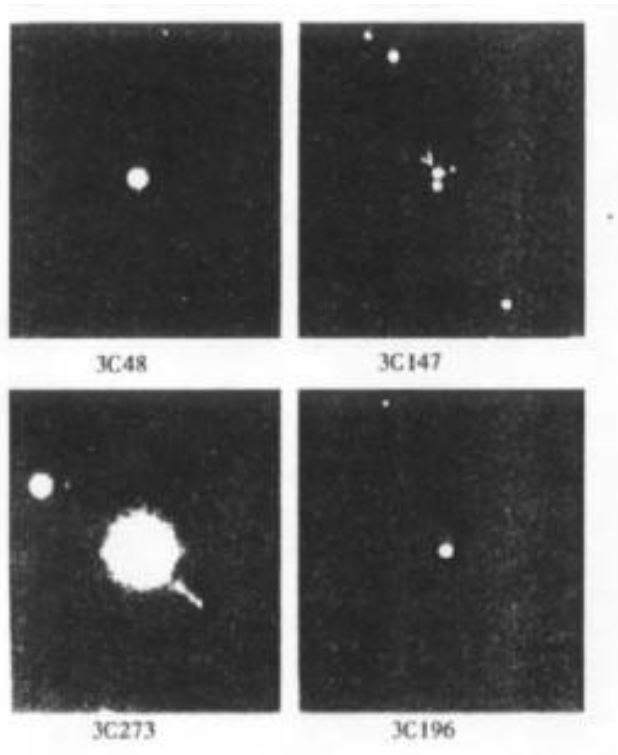


图 1.2 几个类星体的照片。

2. 强的发射线

类星体光谱中有很强的发射线，包括允许线和禁线。常见的谱线除氢线（如 $\text{Ly } \alpha$, $\text{H } \beta$ 等）外，还有 He , Fe II , Mg II , C IV 等允许线和 $[\text{O III}] \lambda\lambda 4959, 5007$, $[\text{O II}] \lambda 3727$, $[\text{N II}] \lambda 6583$ 等禁线。按照线宽，发射线明显可分为两类。宽线，其半峰全宽(FWHM, full width at half maximum)在 $1000 - 15000 \text{ km s}^{-1}$ ，典型值 $4000 - 5000 \text{ km s}^{-1}$ ，只有允许线；窄线，其 FWHM 在 $200 - 2000 \text{ km s}^{-1}$ ，典型值 600 km s^{-1} ，主要是禁线。发射线是区别类星体和恒星、正常星系的最重要的观测特征。图 1.3 是 Vanden Berk (2001)^[7]从 SDSS, LBQS, FBQS 等几个主要的类星体巡天(详见 § 2)得到的大量光谱资料合成的类星体光谱，其上标明了一些常见的发射线。实际上，三个巡天得到的类星体合成光谱几乎没有差别。

类星体光谱中也有许多吸收线。吸收线的情况复杂：有些线很宽，其线宽可与发射线相比，但绝大多数线很窄；有些线产生于类星体本身的气体，因而吸收线红移近似等于发射线红移；有些线则产生于类星体和观测者之间的吸收云，吸收线红移小于发射线红移，两者差别可以很大（详见 § 10）。在某些波段，吸收线密集，对连续光谱有明显的影晌。

3. 连续光谱

类星体的连续辐射谱与绝大多数恒星明显不同。图 1.4 给出类星体各波段的连续辐射。

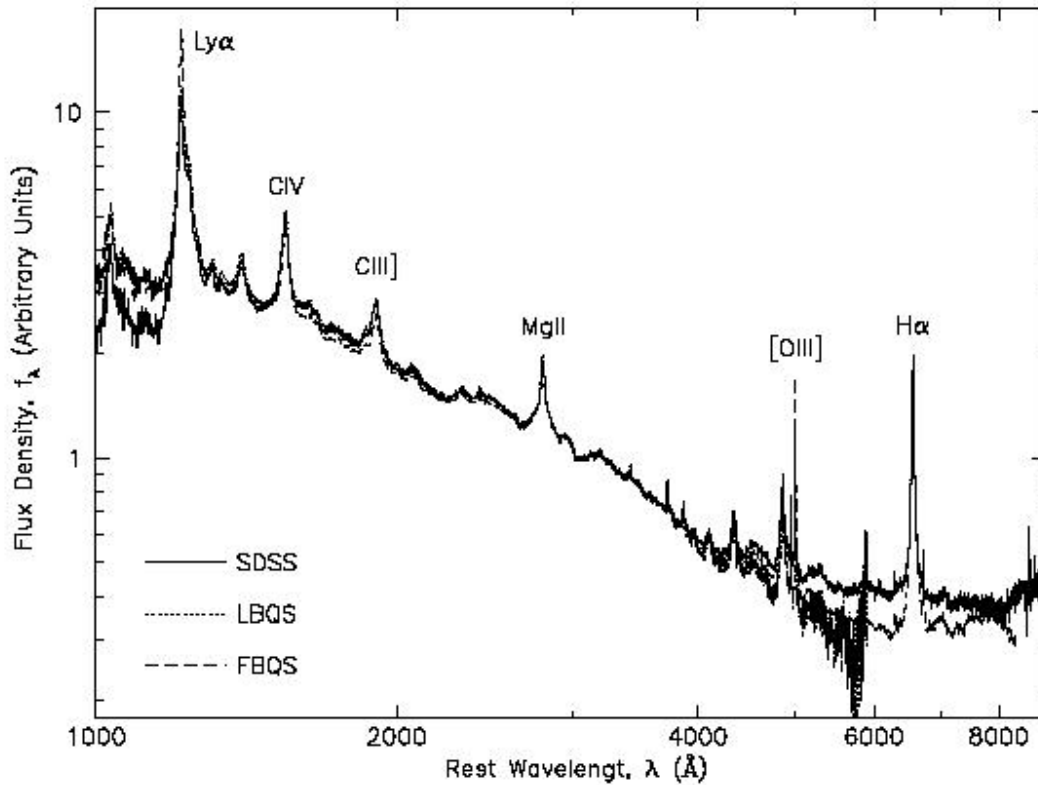


图 1.3 类星体的发射线光谱,取自 Vanden Berk(2001)^[7]。实线、点线和虚线分别为 SDSS、LBQS 和 FBQS 的结果。三个巡天得到的类星体合成光谱几乎没有差别。

3.1 紫外-光学-红外波段

连续辐射谱可近似地表为幂律谱:

$$F_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}, \quad (1.1)$$

平均来说,谱指数 $\alpha \approx 0.5$ 。从合成的类星体光谱(图 1.3)可明显地看出这一点。幂谱意味着辐射可能为非热起源,当然,也不排除热成分。大多数恒星(矮星)的连续谱近似为黑体谱,相对于这些恒星,类星体的连续谱有明显的紫外超和红外超。这给搜寻类星体提供了强有力的手段。在 $100 \sim 1000 \text{Å}$ 的远紫外区,谱向上凸,形成所谓大蓝包。

3.2 射电波段

射电噪类星体,或称为射电类星体(radio quasar),是强射电源。其射电谱为幂谱,射电辐射有偏振,表明是非热起源;谱指数与光学波段的不一定相同。射电形态多为双瓣型,类似于 Fr II 型射电星系(见 § 1.2.4)。

大多数类星体的射电辐射很弱,它们是射电宁静类星体。从图 1.4 可以看到,这两类类星体的射电辐射虽然相差很大,但红外,光学,紫外和 X 射线则几乎一样。

3.3 X 射线和 γ 射线

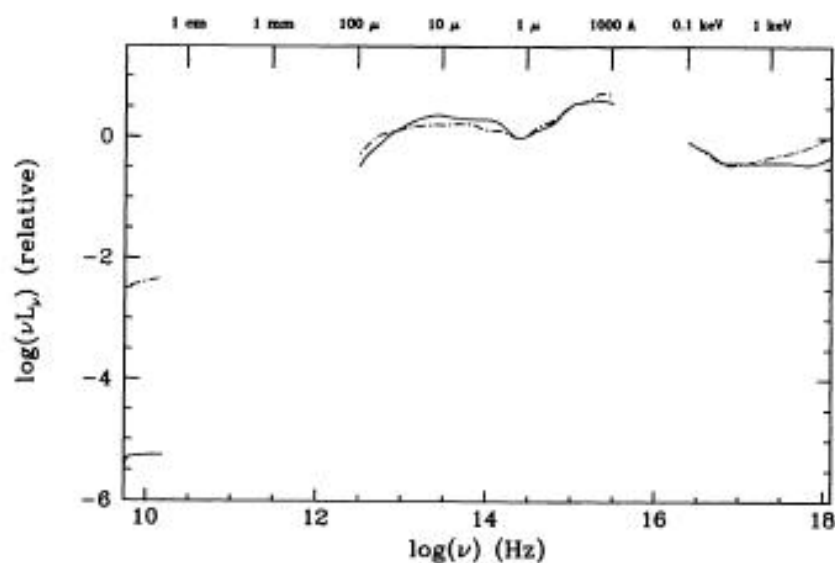


图 1.4 类星体的连续辐射谱, 取自 Elvis et al.(1994)^[8]。实线为射电宁静类星体, 虚线为射电噪类星体。流量归一化到 $1 \mu\text{m}$ 。纵坐标为相对强度。

观测表明, 大部分类星体发出很强的 X 射线, 是 X 射线源; 也探测到一些类星体发出 γ 射线。

从软 X 射线到硬 X 射线, 类星体的 X 射线谱近似为幂律谱, 但谱很陡, 谱指数 $\alpha \approx 1$ 。

图 1.4 表明, 从 X 射线到射电辐射, 不能用一个单一的幂谱或黑体谱来描述。因此, 各波段的辐射可能有不同的起源。

4. 光变

观测表明, 类星体的光学辐射常有变化, 光变是类星体的普遍特征。类星体的光变没有发现明显的周期性。光变时标一般为几年, 但也观测到时标更短 (如几天) 的微小变化。从光变时标推断, 类星体的尺度只有几光日。光变幅度一般在 0.1-0.2 星等以下, 但也有少数类星体 (如光学激变类星体, 或 OVV) 的光变幅超过 $0^m.5$ 。另外, 发射线的强度和轮廓也经常发生变化。

射电噪类星体的射电辐射常有变化; 类星体的 X 射线也观测到变化, 而且, 时标非常短。

5. 大红移

所有类星体的发射线都朝光谱的红端移动, 但每个类星体的各条发射线的红移量 (即 $z_{\text{em}} = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$, λ 为观测波长, λ_0 为静止波长) 相同, 就是说, 每个类星体只有一个发射线红移。

红移是类星体的基本特征之一。河外天体的光谱都有红移, 但类星体的红移是最大的。

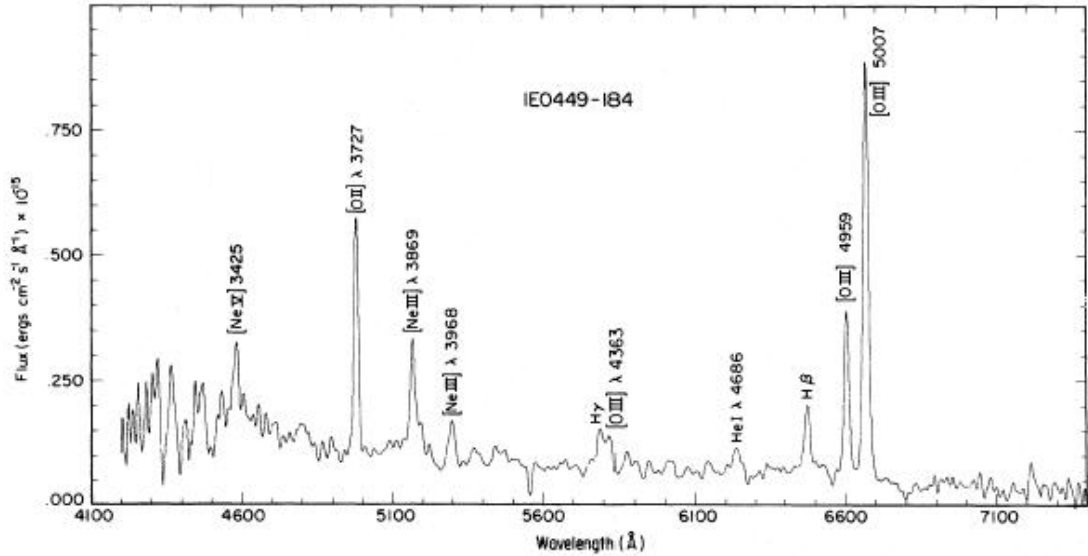


图 1.5 : II 型类星体 1E 0449-184 的光谱, 取自 Stocke et al.(1982)^[9]。

6. 高光度

类星体的光度很大。类星体与赛弗特星系各方面的性质极为相似, 实际上, 赛弗特星系在光度上是类星体的暗端。为了区别两者, 通常给类星体的光度定一个下限, 即要求绝对星等 $M < -23$ 等(也有人取为 $M < -24$ 等)。

作为本节的结束, 简单介绍 II 型类星体(type 2 Quasar)。所谓 II 型类星体实际上是指窄(发射)线类星体。第一例是 Stocke et al.(1982)^[9]证认的 X 射线源 1E 0449-184($z_{em} = 0.338$)。图 1.5 是它的低分辨率($\sim 15\text{\AA}$)光谱。允许线(氢线)的 FWHM 约 600 km s^{-1} , 虽然比 [O III] 禁线的 FWHM($\sim 400 \text{ km s}^{-1}$)略大, 但远窄于通常的类星体。从图 1.5 可以看出, $H\gamma$ 和 [O III] $\lambda 4363$ 已经分解开了, 高分辨率光谱也证实了这一点。而在通常的宽线类星体光谱里, 这两条线总是混合在一起的。它的绝对目视星等 $M_v = -23.5$, 确是类星体无疑。

Almaini et al. (1995)^[10]也是通过 X 射线巡天证认了一个高红移($z_{em} = 2.35$)窄线类星体 RXJ 13434+0001。图 1.6 是它的低分辨率($\sim 12\text{\AA}$)光谱。可以看到, $Ly\alpha$ 和 C IV $\lambda 1549$ 线很窄, 它们的 FWHM 分别约为 900 km s^{-1} 和 700 km s^{-1} , 远小于正常的类星体。绝对星等 $M_v = -23.7$, 无疑地也是类星体。

II 型类星体很难探测。通常类星体巡天采用的方法, 如紫外超、无缝光谱、软 X 射线等, 对这种天体都不敏感(Stocke et al.(1982)^[9], Chartas et al.(2001)^[11])。因此, 目前发现的 II 型类星体非常少。II 型类星体都是射电宁静类星体。与通常的类星体相比, 除了谱线很窄外, II 型类星体光学波段的连续谱较陡, 颜色偏红; 软 X 射线不强, 使得 X 射线波段的谱变平。按照统一模型, II 型类星体很可能是被屏蔽的类星体(见 § 7.4)。

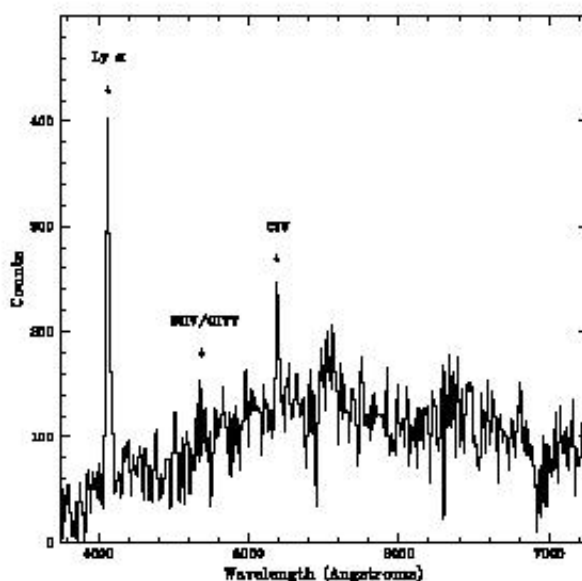


图 1.6: 高红移 II 型类星体 RXJ 13434+0001 的低分辨率光谱, 取自 Almaini et al.(1995)^[10]。

§ 1.3 其它活动星系核和相关天体

§ 1.3.1 Seyfert 星系

1908 年, 美国天文学家 Fath 在 Lick 天文台得到了 NGC 1068 的光谱, 首先注意到 NGC 1068 的光谱中有许多发射线^[12]; 1918 年, 美国 Lowell 天文台的 Slipher 得到了 NGC 1068 的高质量光谱, 指出其发射线光谱类似于行星状星云的光谱^[13]。

NGC 1068 是一个有恒星状明亮核心的星系。还有一些星系与它类似。Seyfert 认为, 这些有明亮核心的星系可能组成特别的类型。1943 年, Seyfert 得到了包括 NGC 1068 在内的六个这样的星系(NGC 1068, NGC 1275, NGC 3516, NGC 4051, NGC 4151 和 NGC 7469)的光谱^[14]。他发现, 光谱中有许多很宽的发射线, 线宽可达几千 km s^{-1} 。

Seyfert 的研究并未引起人们足够的重视。1955 年, NGC 1068 和 NGC 1275 被发现是射电源。此后, 人们才广泛地开展对这类星系的研究, 并以先驱者 Seyfert 的名字来命名这类星系。特别是, 类星体被发现后, 人们注意到, Seyfert 星系与类星体极为相似。

Seyfert 星系的主要观测特征为:

1. 明亮的核, 核很小, 不可分解。与类星体不同的是, 地面望远镜可以观测到寄主星系, 一般是 Sa 型或 Sb 型旋涡星系。
2. 光谱中有大量的高电离发射线, 包括允许线和禁线。发射线的宽度明显

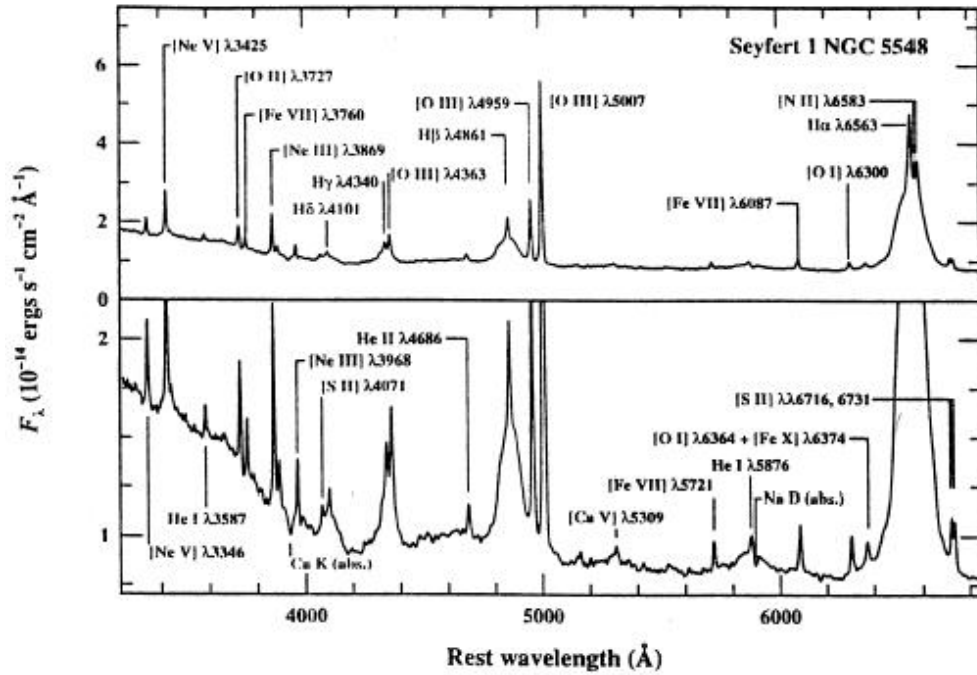


图 1.7(a) 地面望远镜得到的 Seyfert 1 星系 NGC 5548 的光谱^[15]。下图是上图沿纵坐标的放大。可以清楚地看到许多发射线。宽线的 FWHM 约 5900 km s^{-1} ，窄线的约 400 km s^{-1} 。从 4000\AA 往短波方向连续谱的上升是所谓小蓝包(见 § 3. 2)。横坐标为静止波长。

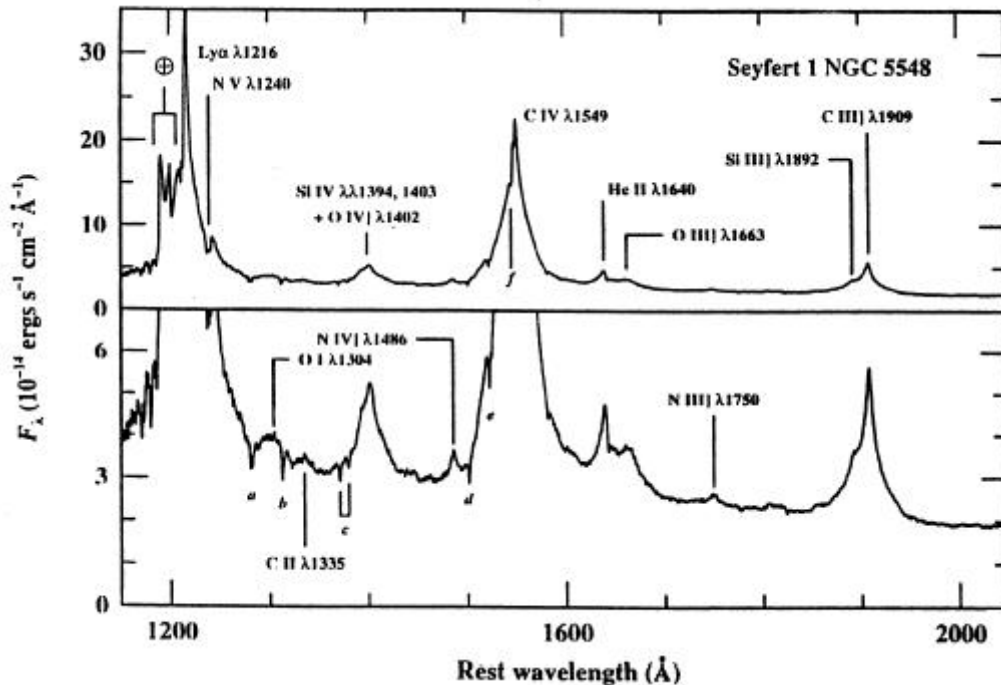


图 1.7(b) HST 得到的 Seyfert 1 星系 NGC 5548 的紫外光谱^[16]。下图是上图沿纵坐标的放大。可以清楚地看到很多发射线。a,b,c,d,e 等特征是银河系的物质产生的吸收线。上图左上角的地球符号指的是地球高层大气产生的发射。横坐标为静止波长。

分为两类：宽线(几千 km s^{-1})和窄线(几百 km s^{-1})。允许线可以是宽线，也可以是窄线，通常是在宽线上叠加了窄线。而禁线总是窄线。氢线往往是最宽的，可达 10^4 km s^{-1} 。光谱中也能看到寄主星系恒星的吸收线。

2. 光学连续光谱很蓝，有明显的紫外超。红外辐射很强，有明显的红外超。从紫外到红外，连续光谱近似为幂谱，辐射既有热成分，也有非热成分。有些 Seyfert 星系是射电源，但射电辐射不如射电噪类星体或射电星系强。Seyfert 星系也是 X 射线源。相对于其它 AGN，Seyfert 星系的软 X 射线似乎更强。Seyfert 星系的 X 射线谱大体上是幂律谱。

Seyfert 星系的光学、红外、X 射线等都观测到光变。

3. Seyfert 星系是低光度星系， $M > -23$ 。

1970 年代，Weedman 根据 Seyfert 星系的观测特征将 Seyfert 星系分为两类，即 Seyfert 1 星系和 Seyfert 2 星系，两者的差别主要在于线宽。Seyfert 1 星系的光谱中既有宽线又有窄线，但宽线只有允许线， $H\alpha$ 发射线的全宽总是大于 3000 km s^{-1} ，而禁线都是窄线，宽度为几百 km s^{-1} ；Seyfert 2 星系的光谱中只有窄线，允许线的宽度与禁线差不多，都在 $500 \sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ 。从发射线的光致电离模型 (§ 6.2)知道，这种分类与谱线的强度比对应。因此，可用谱线强度比更准确地判断 Seyfert 1 和 Seyfert 2。下面是典型值：

$$H\beta/[O\text{ III}]\lambda 5007 \approx 1, \quad \text{对 Seyfert 1;}$$

$$H\beta/[O\text{ III}]\lambda 5007 \approx 0.1, \quad \text{对 Seyfert 2.}$$

图 1.7 是 Seyfert 1 星系 NGC 5548 的光谱，(a)是地面望远镜得到的目视区光谱^[15]，(b)是 HST 得到的紫外光谱^[16]。图 1.8(上)是 Seyfert 2 星系 NGC 1667 的光谱。注意图 1.7 中允许线如 $H\beta$ 和 $H\gamma$ 明显比禁线宽，而图 1.8(上)中允许线如 $H\alpha$ 和禁线的宽度差不多。

从 Seyfert 1 到 Seyfert 2，Seyfert 星系还可细分为更多的次型，如 Seyfert 1.2, Seyfert 1.5, Seyfert 1.8 等。分类的标准就是允许线的宽度或者相对强度，数字越大，允许线越窄或者越弱。

窄线 Seyfert 1 星系：1985 年，Osterbrock 和 Pogge(1985)^[18] 在对 Seyfert 星系进行分类时提出了窄线 Seyfert 1 星系 (narrow line Seyfert 1, 即 NLS1) 的概念。按照 Goodrich(1989)^[19]的测量，NLS1 的允许线相对较窄，其 FWHM $< 2000 \text{ km s}^{-1}$ 。以后的大量研究表明，NLS1 有许多特别的性质。Mathur(2000)^[20]指出，NLS1 的 Fe II 线相对于 $H\beta$ 来说较强，而 [O III] 线则较弱。Brandt et al. (1997)^[21]，Boller et al.(1996)^[22]则指出，相对于正常的宽线 Seyfert 1 星系，NLS1 的 X 射线(特别是在 $\leq 1 \text{ keV}$ 的软 X 射线波段)谱更陡，而且有快速光变。Wills et al.(1999)^[23]，Shemmer & Netzer(2002)^[24]发现，NLS1 有特别强的 N V $\lambda 1240/\text{C IV } \lambda 1550$ 流量比，表明其氮丰度很高，与星暴造成的金属丰度一致。另外，NLS1 的近红外很亮，说明其

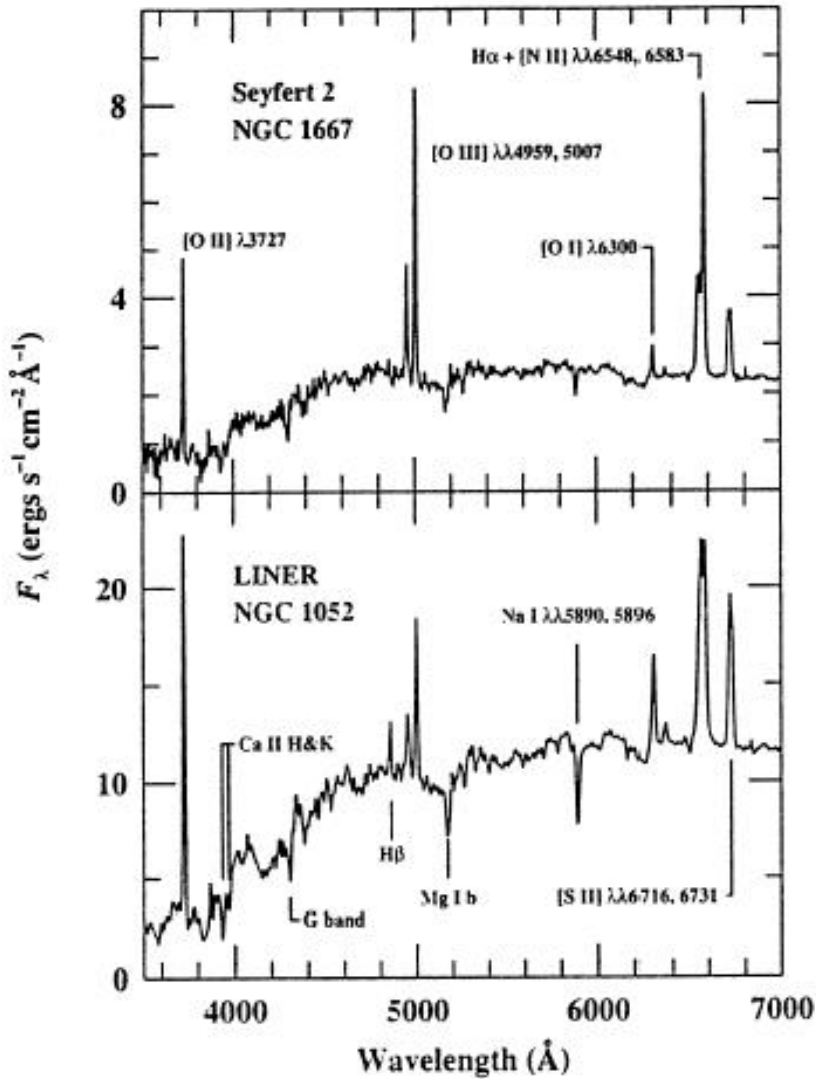


图 1.8 (上)Seyfert 2 星系 NGC 1667 的光谱; (下)LINER NGC 1052 的光谱。取自 Ho et al.(1993)^[17]。

上正进行着快速恒星形成^[25]。NLS1 的其它特征与通常的 Seyfert 星系类似。现普遍认为，窄线 Seyfert 1 星系是 AGN 的极端情况。正因为如此，近年来窄线 Seyfert 1 星系受到广泛的关注。

至 2000 年为止，已发现的 Seyfert 星系共约 2000 个，其中，Seyfert 1 约占 60%，Seyfert 2 约占 40%，而窄线 Seyfert 1 星系约 200 个。最近，Williams et al.(2002)^[26]从 SDSS 巡天资料探测到约 150 个窄线 Seyfert 1 星系，图 1.9 给出了其中几个的光谱。

窄线 X 射线星系：早期的 X 射线巡天发现某些 X 射线星系的光谱是 Seyfert 星系或与 Seyfert 星系类似，但光度比典型的 Seyfert 星系低。这些星系有时称为窄线 X 射线星系(Narrow-Line X-ray Galaxies, NLXGs)。它们本质上是 Seyfert 星系，但尘埃消光和红化严重。

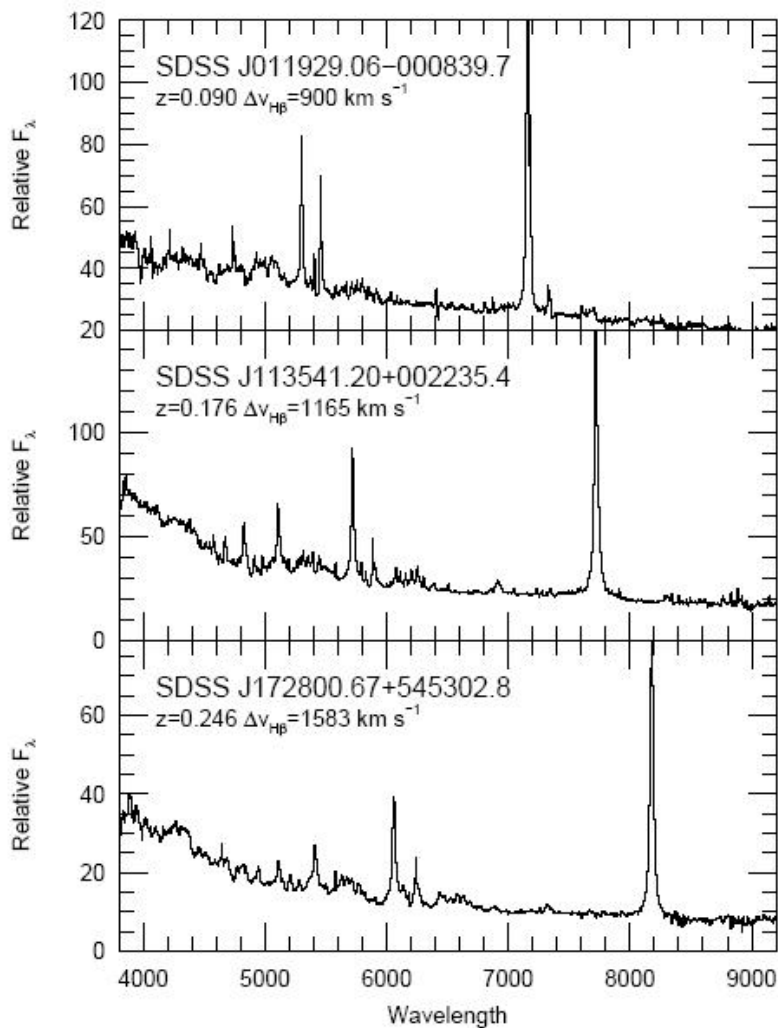


图 1.9 三个窄线 Seyfert 1 光谱，取自 Williams et al. (2002)^[26]。

§ 1.3.2 射电星系

一般的星系大多有射电辐射。射电星系通常指射电光度大于 $10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ 的星系。射电星系的射电形态大体上可分三类。

(1) 致密型。大部分射电辐射来源于星系光学像中心的一个很小的核，也称为“核占优”(core-dominated)型。许多射电星系的致密射电核分解不开。如巨椭圆星系 M87 中心的致密核就分解不开，估计其直径不到 3 光月。有些致密源外还可以看到喷流。有些致密源经 VLBI(甚长基线干涉仪)观测后被分解为两个很小的源，两个源在分离，其速度甚至超过光速，此即所谓视超光速分离现象(详见 § 5.3)。3C 273 是一个很有趣的例子(图 1.10)。中心核外有一个喷流，既发出光学辐射，又发出射电辐射。而中心核经 VLBI 观测后被分解为两个源，两源超光速分离。

(2) 双瓣型。射电辐射主要产生于在星系光学像两边的两个巨大的射电辐射区-射电瓣，也称为“瓣占优”(lobe-dominated)型。射电瓣的直径可达几百 kpc。射

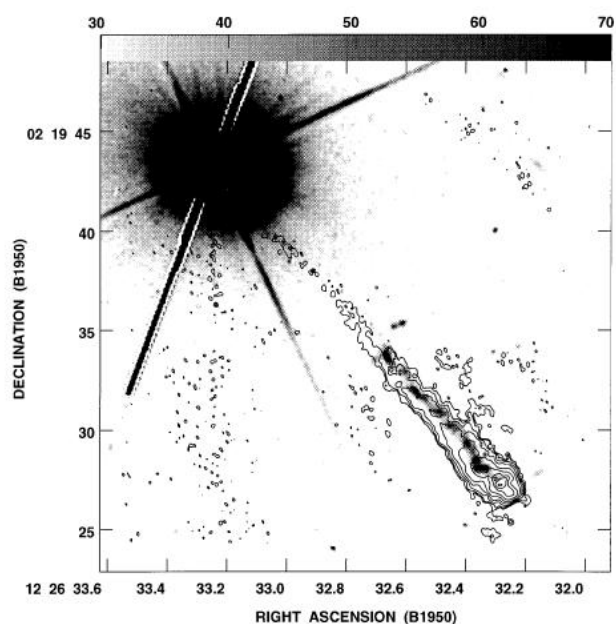


图 1.10 3C 273, 取自 Bahcall et al.(1995)^[27]

电瓣与光学星系位于一条直线上。经常可以看到喷流从光学星系中心连接到射电瓣。最早发现的河外射电源天鹅 A 是这类射电源的典型(图 1.11)。

Fararoff 和 Riley(1974)^[28] 仔细地研究了双瓣型射电源, 并提出按形态可以把它们分成两类。一类是边缘昏暗 (edge-darkened) 型, 即射电瓣的亮度在最靠近光学星系处最亮, 向外逐渐减弱, 称为 FR-I 型; 另一类是边缘增亮 (edge-brightened) 型, 即射电瓣最远离光学星系处最亮, 向里逐渐减弱, 在外边缘可以看到明亮的热斑, 称为 FR-II 型。有些 FR-II 型射电星系的热斑非常亮, 不仅发出强烈的射电辐射, 甚至在红外和光学波段都可以看见。图 1.12 是这两类双瓣型射电源的典型。

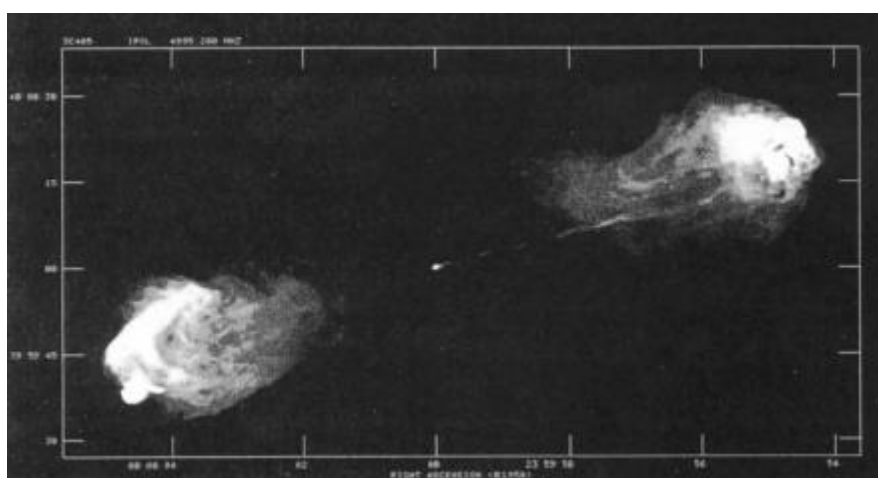


图 1.11 天鹅 A

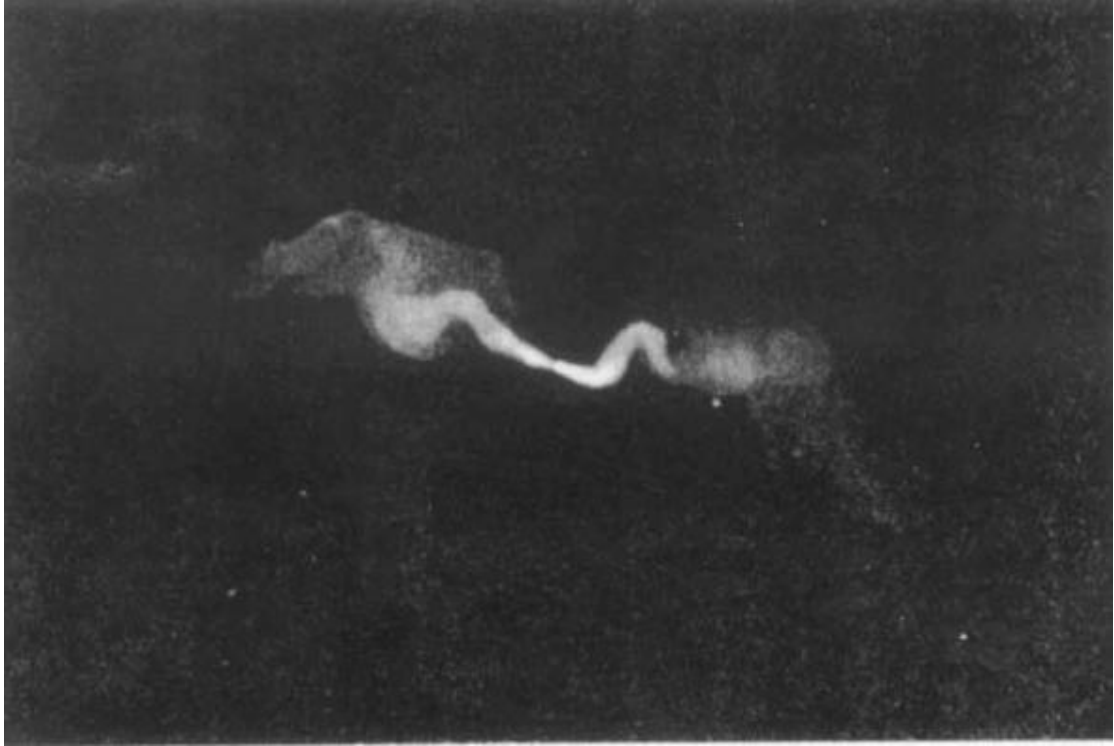


图 1.12(a) FR-I 射电星系 3C 31 在 1.4 GHz 的像。表面亮度随到核心距离的增加而减小。

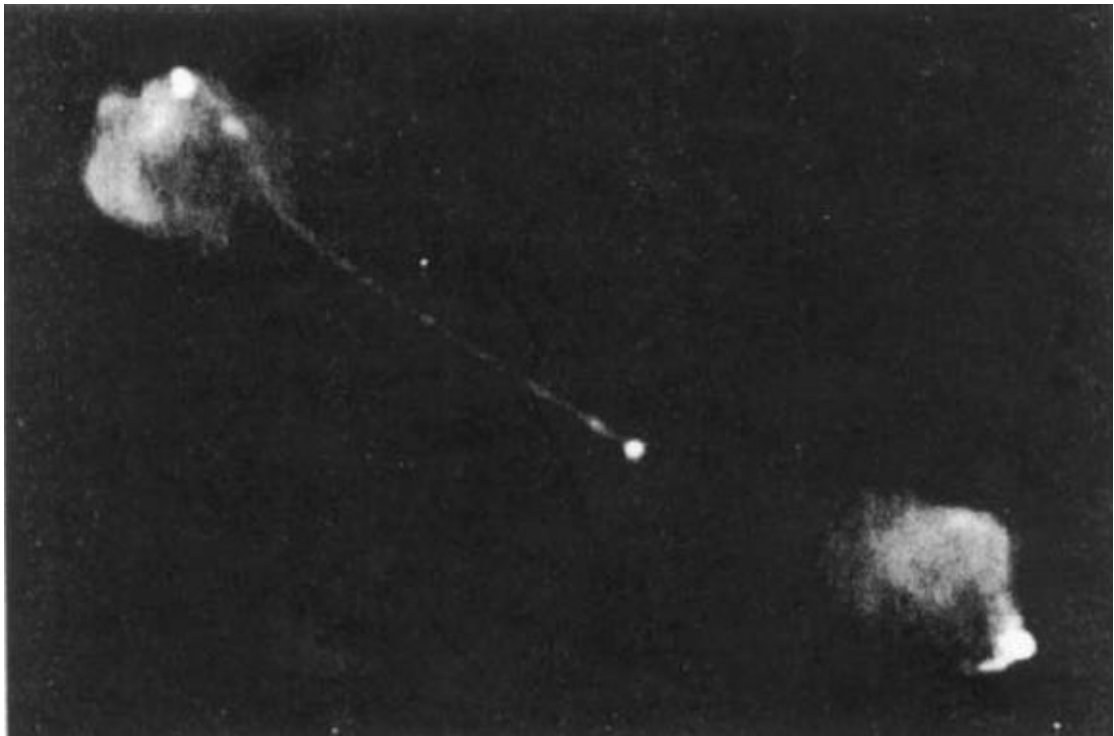


图 1.12(b) FR-II 射电星系 3C 175 在 4.9 GHz 的像。热斑在射电瓣的外边缘。取自 Bridle et al.(1994)^[29]

(3) 头尾型。射电辐射区呈头尾状，辐射最强的“头”位于星系的光学像，而“尾”则向光学星系的一边延伸。图 1.13 是这类射电星系的典型。NGC 1265 有两条尾巴，延伸到几百 kpc。头尾型射电星系常出现在星系团中。一般认为，当快速运动的星系喷出的高能电子与星系团内的星系际物质作用时就会形成这种射电形态。

射电星系的射电辐射为幂谱，谱指数一般在 0.5 到 1 之间，有偏振，意味着是非热起源。

射电星系的光学形态是椭圆星系，其绝对星等约为 $-20^m.8 \pm 0.6$ ，弥散不大。两类射电星系具有 AGN 的光学光谱：宽线射电星系 (Broad Line Radio Galaxies, BLRG_s) 和窄线射电星系 (Narrow Line Radio Galaxies, NLRG_s)。BLRG_s 和 NLRG_s 的光学光谱分别类似于 Seyfert 1 星系和 Seyfert 2 星系。因此，它们也可看成是强射电 Seyfert 星系。



图 1.13 头尾型射电星系 NGC1265。

§ 1.3.3 Blazar

Blazar 是蝎虎天体和光学激变天体的总称。

1. 蝎虎天体

BL Lac 是这类天体的典型。BL Lac 的形态类似于恒星，有快速而不规则的光变，在 1960 年代以前一直被认为是一颗不规则变星。1966 年，BL Lac 被证认为射电源，以后又被确认为河外天体。现在，与 BL Lac 具有相同特征的天体称为蝎虎天体，或 BL Lac Objects.

蝎虎天体的主要特征是：

(1) 快速光变。光学波段的光变幅一般大于 $0^m.1$ 。在 AGN 中，蝎虎天体是变化最快、变幅最大的一类。Xie et al.(1988)^[30,31]曾观测到 14 个 BL Lac 天体在几小时内有幅度大于 $0^m.5$ 的光变。当然，BL Lac 天体也有较长时标(如年)的光变。光变未观测到周期性，可能是由于各种时标光变叠加在一起的原因。除光学波段外，其它波段的辐射也经常变化。射电波段辐射变化的时标略长，变化最快最剧烈的是 X 射线波段。

(2) 高偏振。BL Lac 天体各波段的辐射都有偏振。偏振度可达百分之几或更高，而其它 AGN 辐射的偏振度一般不到 1%。一般来说，波长越长，偏振越大。光变时偏振度也变化。

(3) 非热连续光谱。

BL Lac 天体都是强射电源。射电谱为平谱或倒转谱，谱指数 $\alpha \leq 0.5$ 。BL Lac 天体的射电形态属致密型，大部分辐射来自高度致密的核。洲际 VLBI 的分辨率可达 $0''.0001$ ，仍未能将其分解开。部分 BL Lac 天体的射电有较弱的非对称延展结构，其射电谱为陡谱。部分 BL Lac 天体可观测到喷流，但都是单边的。

BL Lac 天体都是 X 射线源。大部分 BL Lac 天体的 X 射线谱可用双幂律谱描述，硬 X 射线端的谱比低能部分陡。小部分 X 射线谱可用单一的幂律谱或更复杂的谱描述。

BL Lac 天体的紫外-光学-红外与类星体、Seyfert 星系等 AGN 不同。它没有紫外超，也没有明显的大蓝包。大体上可用一幂谱来描述。紫外-光学-红外辐射中也可能有部分热成分。

总的来说，BL Lac 天体的连续辐射与类星体、Seyfert 星系等 AGN 明显不同。图 1.14 是它们的比较。

BL Lac 天体光变时连续谱的形状或谱指数也有变化。最近，Vagnetti 和 Nesci(2003)^[33]得到了 BL Lac 天体的 BVRI 多色测光资料，发现天体变亮时颜色变蓝，与类星体的光变行为不同。

(4) BL Lac 天体的光谱中没有或只有很弱的发射线，也只有很弱的吸收线。这也是 BL Lac 天体独有的特点。近年来高信噪比光谱研究表明，实际上 BL Lac

天体都有发射线，但很弱，例如， $[O III] \lambda 5007$ 的强度比类星体要弱 10 倍以上。发射线的强度可能与射电、X 射线等连续辐射有关。对吸收线的证认表明，它们是河外天体。

2. OVV_s

OVV_s 指具有大幅度快速光变的类星体。OVV_s 主要是射电噪类星体。除了快速光变外，OVV_s 的其它观测特性与 BL Lac 天体的不同。因此，OVV_s 和 BL Lac 天体可能不属于 AGN 的同一子类。

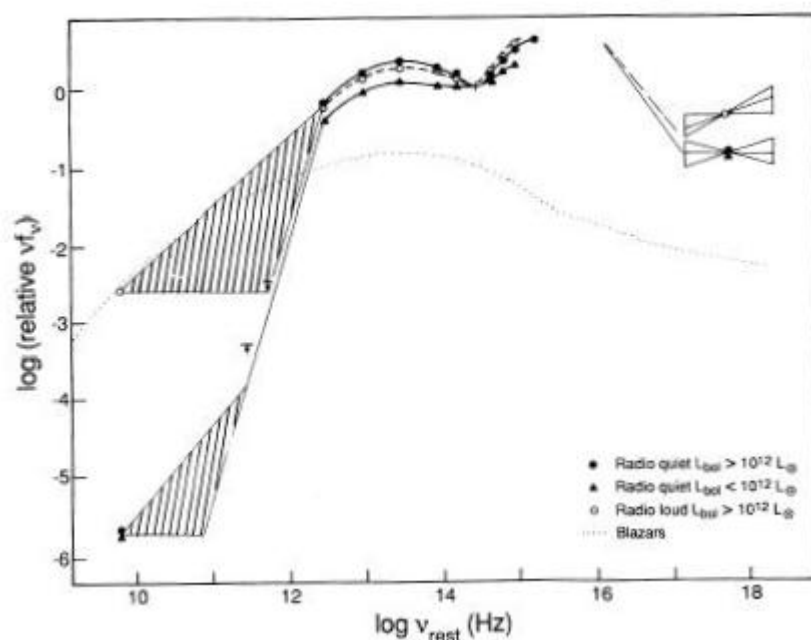


图 1.14 QSO 与 BL Lac 连续辐射的比较。取自 Sanders et al.(1989)^[32]。横坐标为静止频率，纵坐标为相对强度。 L_{bol} 为热光度。黑点和三角形分别代表 L_{bol} 大于或小于 $10^{12}L_{\odot}$ 的射电宁静类星体，圆圈代表 L_{bol} 大于 $10^{12}L_{\odot}$ 的射电噪类星体，点线代表 Blazar。

§ 1.3.4 LINER

Heckman(1980)^[34] 证认了第一个具有低电离核发射线区的星系，即 LINER。这类星系的特点是星系中心有一个低光度的核，光谱中低电离线如 $[O I] \lambda 6300$ ， $[N II] \lambda \lambda 6548, 6583$ 等很强，而高电离线如 $[Ne V]$ 则观测不到。LINER 的发射线光谱类似于 Seyfert 2 星系。图 1.8(下)是 NGC1052 的 LINER 光谱^[17]。注意与图 1.8(上)(Seyfert 2 光谱)的比较。

前面已经提到，利用 $H\beta/[O III] \lambda 5007$ 可以区分 Seyfert 1 星系和 Seyfert 2 星系。同样，利用谱线强度比也可以区分 LINER 和 Seyfert 2 以及其它发射线星系。但仅用 $H\beta/[O III] \lambda 5007$ 是不够的。Baldwin et al.(1981)^[35]用 $[O III] \lambda 5007/H\beta \lambda 4861$ 、 $[N III] \lambda 6583/H\alpha \lambda 6563$ 等，得到了很好的效果(见图 1.15)。满足下面两组判据的可以定义为 LINER：

$$[\text{O II}]3727/[\text{O III}]5007 \geq 1,$$

$$[\text{O I}]6300/[\text{O III}]5007 \geq 1/3 ;$$

或者,

$$[\text{O III}]5007/ \text{H}\beta < 3,$$

$$[\text{O I}]6300/ \text{H}\alpha > 0.05,$$

$$[\text{S II}]6716,6731/ \text{H}\alpha > 0.4,$$

$$[\text{N II}] 6583/ \text{H}\alpha > 0.5 .$$

第二组判据似乎更好。

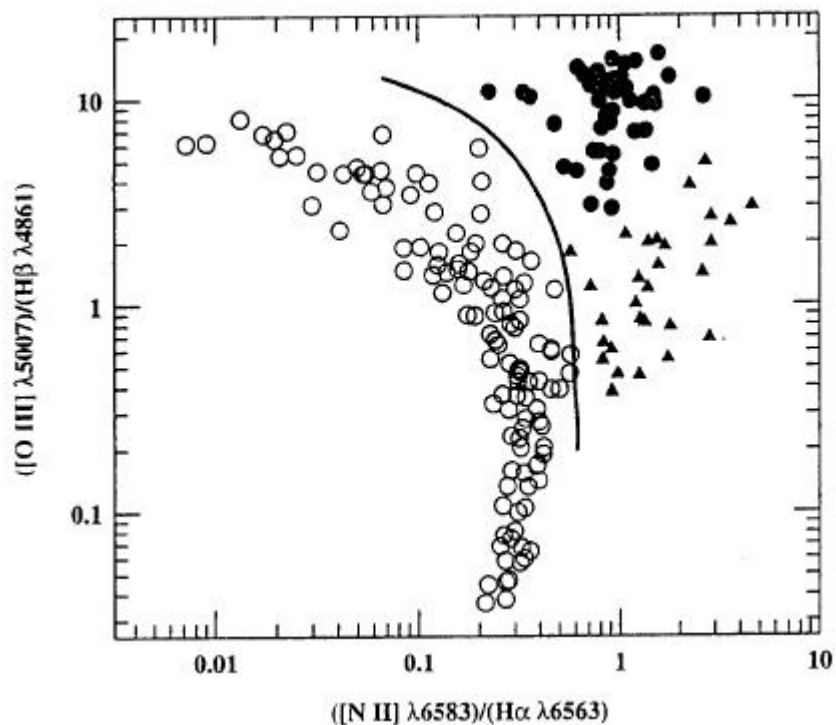


图 1.15 发射线星系诊断图。圆圈是 H II 区，黑点是 Seyfert 2 和 NLRGs，三角形是 LINER。曲线将 AGN 与 H II 区区分开。

我们看到，类星体、Seyfert 星系、射电星系的光学光谱按谱线宽度都可分为两类：宽线和窄线。相应地，文献中常出现两类活动星系核一词：I 型活动星系核(type 1 AGN)和 II 型活动星系核(type 2 AGN)。

§ 1.3.5 相关天体

星爆星系：星爆星系指正处在快速恒星形成阶段的星系。星爆星系的红外光度很高。虽然星爆星系的恒星形成区常位于星系中心，看上去星爆星系有明亮的核，寄主星系又是旋涡星系，与 Seyfert 星系类似，但核的尺度为 kpc 量级，光谱为典型的 H II 区光谱，与通常的 AGN 不同。一般不认为星爆星系是 AGN。星爆星系和 AGN 可能有关。有人推测 AGN 可能由星爆星系演化而来。但两者

间的真实联系目前尚不清楚。

马卡良天体：马卡良天体指马卡良及其合作者在亚美尼亚(Armenia)比拉干(Byuragan)天文台进行的巡天发现的具有紫外超的天体。马卡良天体中有一些赛弗特星系、低红移类星体、BL Lac 天体等 AGN，还有一些恒星（如白矮星）和具有紫外超的星系（见 Lipovetsky(1989)^[36]）。因此，马卡良天体并不构成特定的一类天体。

兹维基星系：兹维基发现的具有明亮核心的蓝致密星系。有些兹维基星系已被证认为高光度赛弗特星系。但兹维基星系也不构成特定的一类天体。

N 星系：摩根提出的具有明亮核心的星系。虽然它们当中证认有 Seyfert 星系、宽线射电星系等，但它们也不构成特定的天体类型。目前，N 星系这个名称已很少使用。

极亮远红外星系：这种星系的辐射大部分集中在远红外波段($\lambda > 10 \mu\text{m}$)。红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS)的观测发现了一批这样的星系^[37]。它们的远红外光度 $L(8-1000 \mu\text{m}) \geq 10^{12}L_{\odot}$ ，比光学光度要大 10 倍以上。极亮远红外星系的红外辐射是尘埃的热辐射。它们在某些方面类似于星暴星系，同样，不是 AGN。

§ 1.4 红移论争

大红移是类星体的主要特征之一。如何解释类星体的红移曾引发了天文学上的一场大争论，至今尚未完全停止。大多数天文学家认为，类星体的红移是宇宙学红移，即红移是宇宙膨胀的结果，因此，按照哈勃定律，红移反映了距离。以 Arp, Burbidge, Hoyle, Narlikar 等为代表的少数天文学家则持不同观点，他们认为，类星体红移中至少有一部分具有非宇宙学红移起源^[38]。

争论的主要方面为：

1. 哈勃图。

在膨胀宇宙模型里，红移-视星等关系成立：

$$m = 5 \log z + 1.086 (1 - q_0)z + M - 5 - \log H_0,$$

式中， m 和 M 分别为视星等和绝对星等， z 为红移， H_0 和 q_0 分别为现在的哈勃常数和减速因子。显然，只要 M 近似为常数，在 z 很小时， $m - \log z$ 图(即哈勃图)上应得到一条斜率为 5 的直线。对星系，统计结果的确如此。但对类星体，情况复杂。

图 1.16 是 Hewitt 和 Burbidge (1993)^[39]利用 7000 多个类星体资料得到的哈勃图。图上的代表点非常弥散， m 和 $\log z$ 完全不相关。可能的原因有两个。持非宇宙学红移观点的人认为，类星体红移中有非宇宙学成分，红移-视星等关系

图 1.16 从 7031 个类星体绘制的哈勃图，取自 Hewitt & Burbidge(1993)^[39]

不成立。持宇宙学红移观点的人则认为 m 和 $\log z$ 不相关的原因是类星体的绝对星等很弥散,不能当作常数。为了说明这种看法的正确,他们企图寻找具有相同光度的类星体,即所谓“标准烛光”。他们根据类星体的某些特征,将类星体分类,假定某种子类的类星体具有相近的绝对星等。例如, Fang et al.(1976)^[40]将具有双瓣结构的射电噪类星体取为一类,假定在各个红移处双瓣间距最大的类星体具有相同的绝对星等。用这些类星体的资料绘制的哈勃图的确比图 1.16 有很大的改进。

不过,这种做法也受到批评:

(1)首先,观测上没有直接证据证明这样选出的类星体具有相同光度,可以作为标准烛光。同时,也缺乏理论上强有力的支持。

(2)类星体的光度可能演化,也就是说,与红移有关。在选择标准烛光时未考虑这种效应。

(3)虽然绘制的哈勃图有很大的改进,但不同作者得到的结果常有差异,并不完全满足红移-视星等关系。例如, Fang et al.(1976)^[40]的统计结果为:

$$m = 17.64 + 4.6 \log (z - 0.19 z^2).$$

虽然相关系数高达 0.95，但 $m - \log z$ 的斜率并不严格的等于 5。

2. 类星体同亮星系的“成协”

观测上发现，某些类星体在天球上的位置很靠近亮星系，两者似乎有联系，但两者的红移却相差很大。图 1.17 是 Arp(1987)^[41]给出的一个例子。图中，红移为 0.335，0.946 和 2.205 的三个类星体很靠近亮椭圆星系 NGC 3842。图 1.18 是 Chu et al.(1998)^[42]给出的另一个例子。在 Seyfert 星系 NGC 3516 周围有六个类星体，其中的五个是 X 射线源。非常有趣的是，这 5 个 X 射线类星体都在 NGC 3516 的短轴延线附近。从图 1.18 中给出的每个类星体的红移可以看出，越靠近 NGC 3516，类星体的红移越大。因此，他们认为，类星体可能是从 NGC 3516 抛射出去的。另外，他们还指出，这 5 个类星体的红移很接近红移峰值(见下面)。类似的例子还很多。

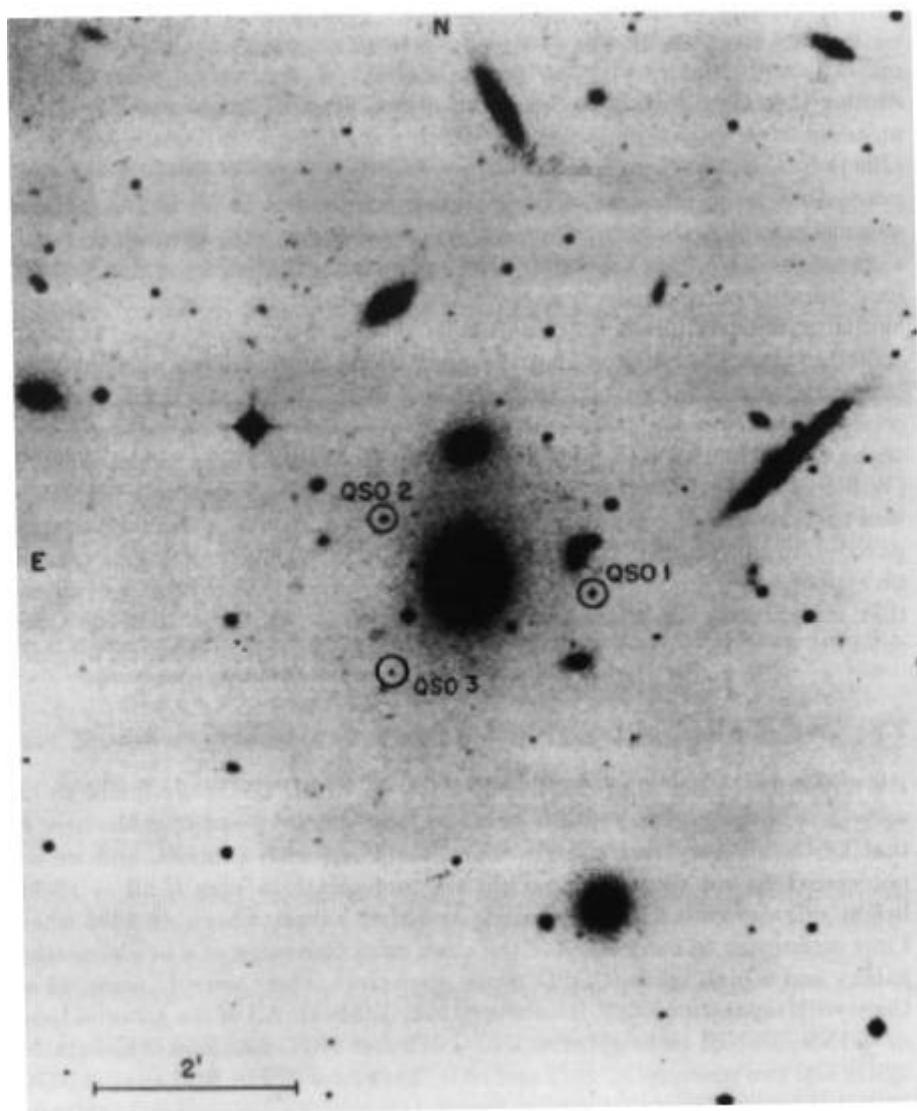


图 1.17 红移为 0.335, 0.946 和 2.205 的三个类星体非常靠近椭圆星系 NGC 3842。取自 Arp(1987)^[41]。

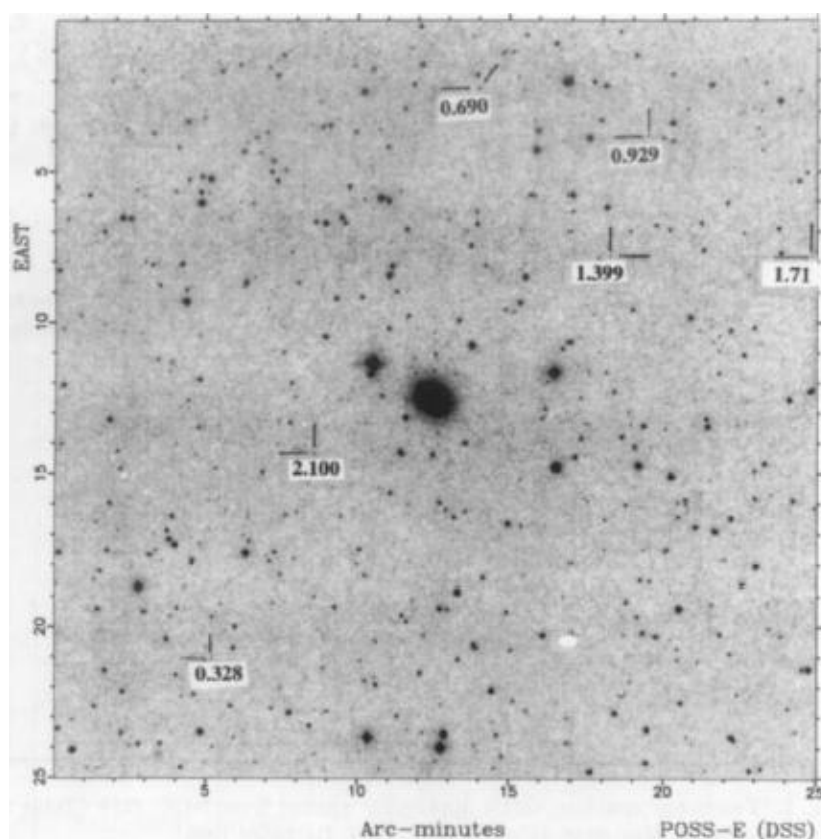


图 1.18 6 个类星体, 其中 5 个是 X 射线源, 与 NGC 3516 成协。取自 Chu et al.(1998)^[42]。5 个 X 射线类星体都在 NGC 3516 的短轴延线附近, 而且, 越靠近 NGC 3516, 类星体的红移越大。

如何看待类星体同亮星系的这种成协现象呢? 持非宇宙学红移观点的人认为, 成协是真实的。他们指出, 从类星体的面密度(见 § 2.4)和亮星系表可以计算类星体落在亮星系周围某个角距离以内的概率。结果表明, 出现上述情况的概率非常小。既然已经观测到了这种小概率事件, 这说明类星体和亮星系之间有某种联系。两者的红移不同, 表明类星体红移中一定有非宇宙学红移成分。他们还指出, 类星体 Mrk 205 位于旋涡星系 NGC 4319 的旋臂间, 从底片上看去, 两者似乎有物质联系, 更支持了非宇宙学红移观点。

但是, 持宇宙学红移观点的人则认为, 类星体出现在亮星系周围仅是投影的结果, 是偶然现象, 因而, 类星体和星系只是视成协, 两者间并没有真实的物理联系。为了证实这一点, 人们设计了各种实验, 例如, 按照统计研究的要求建立一个星系样本并在每个星系周围一定角距内寻找类星体。结果表明, 确实在某些星系周围找到了类星体, 而且, 找到类星体的概率与统计学算出的一致。典型的研究如 Stockton (1978)^[43]。至于 Mrk 205 和 NGC 4319 的联系, 则完全缺乏观测上的直接证据。

3. 统计研究

许多统计研究表明，类星体和星系之间似乎存在着某种联系。例如：

3CR, Molongo, Parks 和 4C 巡天(见 § 2.3)发现的射电噪类星体样本和 de Vaucouleurs 星系表或 Shapley-Ames 星系表中的亮星系明显相关^[44-46]；

高红移类星体同 IRAS 表(见 § 2.3)中的星系强烈相关，同 Lick 表中的星系强烈相关^[47]；

LBQS 巡天(见 § 2.2)在室女星系团天区发现的 178 个类星体同室女团星系强烈相关^[48]；

Stoche et al.(1987)^[49]发现，X 射线类星体同中等红移的星系明显相关，而 Radecke(1997)^[50]利用 ROSAT 巡天(见 § 2.4)资料发现，致密 X 射线源(大部分是类星体)倾向于成团地聚集在活动星系周围；

Arp et al.(1984)^[51]对著名的有喷流的旋涡星系 NGC 1097 周围 $2^{\circ}.85 \times 2^{\circ}.85$ 天区进行了巡天，图 1.19 是巡天结果。他们发现，类星体的面密度从天区边缘的面密度平均值往 NGC 1097 方向增加，而且类星体倾向于高度聚集在 NGC 1097 的喷流方向；

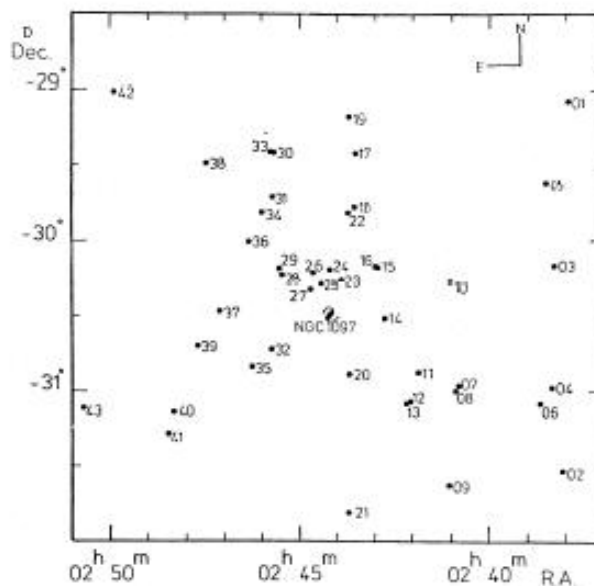


图 1.19 NGC 1097 周围的类星体。左上角和右下角的连线方向大体是星系喷流的方向。类星体倾向于高度聚集在喷流方向。取自 Arp et al.(1984)^[51]。

另外，对某些类星体样本的统计研究表明，类星体数按红移的分布很奇特，呈现峰和周期性。早年，Burbidge 等人就提出，类星体数按红移的分布在 $z = 0.3, 0.6, 0.96, 1.41, 1.96$ 处达峰值。对于低红移类星体，红移分布具有周期性，周期为 $\Delta \log(1+z) = 0.089$ 。图 1.20 是 Burbidge & Napier(2001)^[52]从两个独立的巡天样本得到的类星体数按红移的分布图，似乎证实了这些结果。

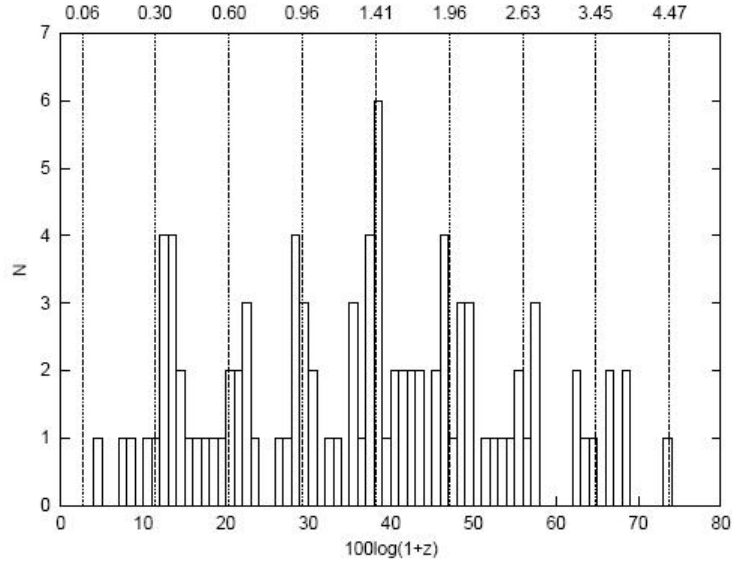


图 1.20 联合两个独立的样本得到的类星体按红移分布的直方图，取自 Burbidge & Napier (2001)^[52]。红移分布中有许多峰。

持非宇宙学红移观点的人认为，上述关于类星体和星系的统计工作是有意义的，表明类星体和星系之间存在联系。由于类星体的红移大于星系的红移，类星体红移中一定有非宇宙学成分。而类星体红移分布的峰和周期性与膨胀宇宙的概念不一致，也说明红移的非宇宙学起源。

统计研究在天文学中是一种重要的研究方法。但统计研究有其局限性。由于样本和统计方法的限制，统计研究的结果常有不确定性，需要更多更好的样本、更有效的统计方法来验证。持宇宙学红移观点的人认为，上述统计研究中有一些就是这种情况。例如，关于类星体数按红移的分布，Green & Richstone(1976)^[53]，Scott(19915)^[54]以及其他人用了不同的样本进行统计，却未得到峰和周期。图 1.21 是 BFSP 和 BJS 巡天样本(见 § 2.3)的红移分布的直方图^[55,56]。BFSP 和 BJS 是紫外超巡天，一般认为，对 $z < 2.2$ ，样本是完备的。但图 1.21 并未显示出图 1.20 上的峰或周期。

当然，上述统计研究中有一些是可信的，但可在宇宙学红移的框架下给予合理的解释，无须引入非宇宙学红移。例如，Wills & Ricklefs(1976)^[57]以及 Zhou et al.(1985)^[58]都指出，类星体数按红移的分布中的峰和周期可用光谱选择效应很好地解释。又如，Norman & Impey(1999)^[59]指出，星系团和超星系团的引力透镜效应可改变背景亮类星体的分布，导致中等红移($z \sim 1.0 - 2.0$)类星体同低红移($z \sim 0.2 - 0.3$)前景星系成协。

4. 吸收线

类星体光谱中有许多吸收线(详见 § 10)。吸收线红移 z_a 总是小于或近似等于发射线红移 z_{em} 。产生吸收线的物质位于什么地方？对于 $z_a \approx z_{em}$ 的吸收线(如宽

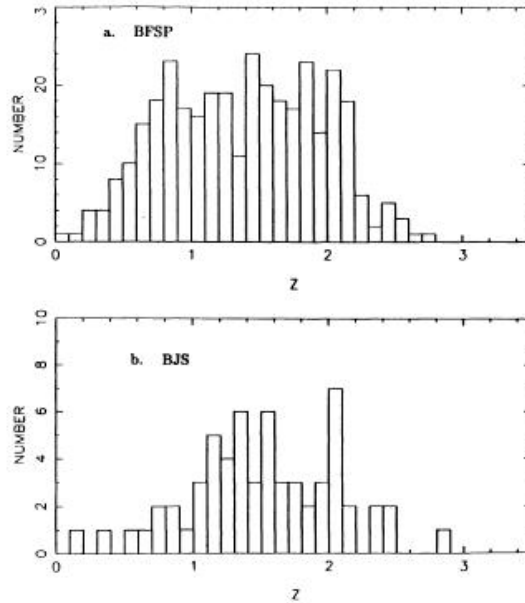


图 1.21 BFSP 和 BJS 巡天样本的红移分布，取自 Boyle et al.(1990,1991)^[55,56]。

吸收线和成协吸收线)，人们的意见一致，即吸收线产生于与类星体联系在一起的吸收云。而对于 $z_a < z_{em}$ 的吸收线，则有两种可能。一种可能是：吸收线产生于从类星体高速抛出的气体云。另一种可能是：吸收线产生于“插入天体”，即介于类星体和观测者之间且与类星体没有联系的吸收云。Burbidge 和其他人找到了一些有利于前一种看法的证据。更多的人对后一种看法进行了广泛而深入的研究。从对赖曼 α 森林和重元素吸收系统的研究表明，这些吸收线都是插入天体产生的。特别是，人们还找到了产生重元素吸收系统的星系(见图 10.5.8)，直接证明了红移是宇宙学红移。(详细的讨论见 § 10)。

5. 类星体“对”(pair)

地球上位置靠得很近的两个类星体称为类星体“对”。1970 年代首次发现，类星体对 0957+561A, B 的两个类星体 A 和 B 的光谱相同、红移相同。以后又发现了许多例。对这些类星体的最合理的解释是：它们是引力透镜类星体。引力透镜理论是建立在宇宙学红移的基础上的。因此，引力透镜类星体的证实无疑地是对宇宙学红移的最有力支持。

有些类星体对的两个类星体的红移相差很大。但在某些类星体对的低红移类星体的光谱中找到了与高红移类星体对应的吸收线。这表明高红移类星体比低红移类星体更远。显然这也是对宇宙学红移的有力支持。

然而，在这些红移相差很大的类星体对中，Burbidge et al.(1996^[60],1997^[61])宣布也找到了统计上的证据支持非宇宙学红移。

6. 类星体与活动星系核

类星体本质的研究一开始就与红移本质的争论联系在一起。持非宇宙学红移

观点的人认为，如果红移是宇宙学红移，类星体的光度将达 $10^{46} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$ ，比一般的星系高几个量级，但类星体的光变又限制了类星体的尺度比星系小好几个量级，这将带来一系列的理论上的困难，如 Compton 佯谬、超 Eddington 光度极限、能量来源等。因此，他们认为，类星体可能是亮星系抛出的，在我们附近，这样一来，理论上的困难就不复存在。

随着研究的深入，人们注意到，类星体的观测特征很像 Seyfert 星系等活动星系核。因此，大多数人认为，类星体是活动星系核。地面光学望远镜的观测找到了许多低红移类星体所在的星系(即寄主星系，见 § 8)，而哈勃空间望远镜则观测到了更多的寄主星系。类星体的红移与其寄主星系的红移相同。毫无疑问，类星体是活动星系核，与星系一样，红移起源于宇宙膨胀。

为了解释观测资料，对类星体和活动星系核，人们提出了黑洞模型：类星体和活动星系核的中心是一个巨型黑洞，其外有一个吸积盘。黑洞模型虽说不够完善，但克服了上面提到的困难，在解释观测资料方面已取得巨大成功。(当然，持非宇宙学红移观点的人反驳：至今尚未真正找到一个黑洞)。

红移论争极大地推动了类星体研究，在历史上起了重要作用。对于绝大多数天文学家来说，红移论争已经结束，现在可以放心地在宇宙学红移的框架下处理与类星体有关的问题。个别天文学家仍坚持非宇宙学红移，他们仍孜孜不倦地寻找支持非宇宙学红移的证据。虽然这些证据对于宇宙学红移的概念并不构成直接的挑战，但确实也提出了一些令人深思的问题，需要进行深入研究，给出合理的解释。