



# 远在天边和近在眼前的天文学前沿

## ——高红移星系和太阳系外行星

邹振隆

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

### 摘 要

介绍了目前人类在探索遥远和近邻宇宙这两个前沿方向上的一些进展, 主要涉及高红移星系, 包括作为活动星系核的类星体和太阳系外行星的发现情况、研究方法、科学意义以及未来的计划和展望。

关 键 词 天体物理学 — 高红移星系 — 太阳系外行星 — 综述

分 类 号 P157

## 1 远在天边的高红移星系<sup>[1,2]</sup>

在过去的—个世纪中, 人类对宇宙的认识发生了自哥白尼以来又一次革命性的变化。20 世纪 20 年代, 哈勃用当时威力最强的威尔逊山 2.54 m 望远镜将仙女座大星云分解为恒星, 并用造父变星周光关系测定了它的距离, 由此结束了关于星云本质的长期争论, 将人类的视野从银河系拓展到远为广阔的星系世界。接着, 他又发现星系光谱线的红移表征的退行速度同距离成正比(现称哈勃定律), 从而动摇了宇宙永恒不变的传统观念, 使人们认识到不仅个别天体, 宇宙本身也在不停地运动着, 也有自己的演化历史。

建立在哈勃发现和爱因斯坦广义相对论基础上的宇宙模型, 后来得到轻元素丰度、球状星团年龄, 特别是微波背景辐射等观测事实的支持, 堪称 20 世纪最伟大的科学成就之一。根据这个模型, 宇宙是在距今约 14 Gyr 前诞生的。开始时处于极高温高密的状态(故称为大爆炸), 后来一边膨胀一边冷却, 在年龄约 3 min、温度约 1 GK 时合成了氦和氦等轻元素, 在年龄约 0.4 Myr、红移约 1000、温度 3000 K 时, 电子同原子核复合成中性原子。此后进一步的膨胀和降温使宇宙进入黑暗时代, 直到早期宇宙的密度涨落由于引力不稳定性增长, 形成第一批恒星以及星系把宇宙重新照亮为止。

考察这一“复兴”究竟发生于何时是天文学当前最紧迫的问题之一。在给定的宇宙模型中, 星系的年龄与其红移有明确的对应关系: 年龄越轻, 红移越大, 距离就越远, 观测起来

也就越困难。帕洛玛天文台 5 m 望远镜运行 10 多年后,至上世纪 60 年代所发现的星系中最大红移只有 0.46 (射电星系 3C 295)。1963 年,马丁·施密特将 3C 273 光谱中的一组发射线证认为红移等于 0.158 的氢巴尔末线,人们认识到如果其红移来自宇宙膨胀,这个貌似恒星的天体(类星体)就不是银河系内,而是遥远宇宙深处光度超过整个星系的东西。不到一年,最大红移的记录就被类星体 3C 147 (红移为 0.55) 打破。以后 30 年中,除 1997 年哈勃空间望远镜 (HST) 发现红移等于 4.92 的引力透镜星系之外,最大红移的记录一直被类星体保持着。在 1982 年 9 月发现 PKS 2000-330 (红移为 3.78) 以前,最大红移的类星体都是用射电方法选出的,以后则交替被无缝光谱和多色测光等方法包揽。无缝光谱巡天是利用红移到可见区的赖曼  $\alpha$  等发射线挑选出类星体,但因受施密特望远镜极限星等的限制,这一方法测到高红移类星体的可能性不大。多色测光法的基础是:恒星在多维颜色空间密集地处于非常狭窄的区域,而高红移类星体则稀疏地落在一个星等之外。由于借助配备 CCD 探测器的大口径望远镜可推进到更暗的星等,这种方法已成为发现高红移类星体的主要方法。1987 年 1 月利用多色测光方法首次发现红移大于 4 的类星体 Q 0046-293,以后这一方法的发现囊括了至 1998 年 7 月底发现的所有红移大于 4 的 60 多颗类星体的 60%。对 X 射线点源进行光学证认是发现类星体的另一有效方法。不过由于受目前仪器灵敏度的限制,除少数例外, X 射线选出的类星体的红移一般都不太高。近年来 Sloan 数字巡天 (SDSS) 项目显示了多色法寻找高红移类星体的巨大威力。它的主望远镜口径为 2.5 m,可进行  $u'$ 、 $g'$ 、 $r'$ 、 $i'$ 、 $z'$  5 色测光巡天,可同时拍摄 640 个目标的光纤光谱。发现的类星体已达 10000 颗以上,超过了过去 30 多年全世界发现的总数,囊括了最高红移的前 5 名: SDSS J1148+5251 ( $z = 6.43$ )、SDSS 1030+0524 ( $z = 6.28$ )、SDSS 1306+0356 ( $z = 5.99$ )、SDSS 0836+0054 ( $z = 5.82$ )、SDSS 1044-0125 ( $z = 5.80$ )。预计 SDSS 巡天计划完成时,可发现 10 万颗类星体,其中红移大于 4 者估计约 1000 颗。若按我国大天区面积多目标光纤光谱巡天望远镜 (LAMOST)<sup>[3]</sup> 计划的设计能力,上述数字有望提高一个量级。

关于类星体红移究竟起源于宇宙学还是引力等局域因素,尽管历史上有过激烈争论,但越来越多令人信服的证据倾向前者,表明它们确实是遥远宇宙中剧烈活动的星系核心,处在宇宙年龄仅为目前值 1/10 的早期。

涉及类星体的研究课题包括:

#### (1) 宇宙学和星系形成模型的约束

存在红移大于 4 的类星体表明,在大爆炸后约 1 Gyr 内就形成了 10 亿倍太阳质量的黑洞,这为宇宙学参数和星系形成模型提供了很强的约束。

#### (2) 类星体的演化

亮类星体的数密度峰值在红移 3 附近,一个合理的类星体光度和(或)数密度演化模型应能说明这一事实。

#### (3) 星系际介质的性质

类星体赖曼  $\alpha$  发射线短波侧存在大量窄吸收线(称为赖曼  $\alpha$  森林<sup>[4]</sup>),它们是处于类星体和我们之间不同距离的中性氢云产生的不同红移的赖曼  $\alpha$  吸收线。对赖曼  $\alpha$  森林的研究是了解原始氢云大小、分布、成团性等性质的重要途径。

#### (4) 元素丰度的演化

类星体连续谱背景上的氧、碳、镁、硅等金属吸收线系统,来源于视线穿过的星系盘(或晕)物质。这些重元素由恒星内部的核合成过程产生,其丰度理应随红移的增加而减少,但观

测值却往往比太阳高一个量级, 为什么?

#### (5) 高红移星系的寻找

几乎没有人怀疑星系红移的宇宙学性质。因此, 曾有人试图用高红移的类星体与低红移的星系成协来论证类星体红移至少存在非宇宙学成分 (这里的困难在于证明成协是真正物理的而非几何上的投影)。反其道而行之, 人们也可以用高红移类星体与红移相近的星系成协来支持类星体红移的宇宙学起源。当然, 由于正常星系是展源, 发射线又很弱甚至根本没有, 同类星体相比, 要发现高红移星系则困难得多。不过, 对于正在形成大量恒星的星暴星系, 其新生的大质量高温恒星会激发很强的赖曼  $\alpha$  发射线, 因此, 人们也可以用多色成像方法在高红移类星体周围去寻找这种赖曼  $\alpha$  发射体 (LAE)。一个由日本和美国天文学家组成的合作组, 在口径 8 m 的 Subaru 望远镜主焦照相机上装了一个中心波长为 800 nm 的窄带滤光片 NB816, 用来观测樊晓晖等人发现的红移为 5.74 的宽吸收线类星体 SDSS J1044-0125 周围一个满月大小的天区。2002 年 2 月一次长达 10 h 的观测发现了一个仅存在 NB816 像的星系, 经 Subaru 的暗天体照相机和摄谱仪 FOCAS 的后随观测证实, 这是一个红移为 5.69 的遥远星系 (LAE J1044-0130), 其光谱中最亮的赖曼  $\alpha$  发射线被红移到了 NB816 能透过的区域。Keck II 望远镜的成像与阶梯光栅谱仪 ESI 更细致的观测进一步支持了上述结果。LAE J1044-0130 谱线轮廓的不对称性还表明超新星爆发正驱动着氢气以每秒数百公里的速度从该星系外流。这意味着大规模的恒星形成在大爆炸后数亿年的宇宙早期就已经开始了。用类似方法发现的 LAE 还有红移高达 5.74 的 SSA22-HCM1<sup>[5]</sup> 和第一个红移大于 6 的星系 HCM6A ( $z = 6.56$ )<sup>[6]</sup>。不过, 由于尘埃消光严重, 大大减少了发现 LAE 的机会。幸运的是尘埃也可以变害为利, 被它吸收的恒星紫外光并未真正失踪, 会在峰值 100  $\mu\text{m}$  的远红外波段再辐射出来。一般高红移星系中恒星形成活动剧烈, 其丰富的尘埃将把这种远红外辐射红移到亚毫米波段。配有亚毫米波通用热阵 SCUBA 的望远镜 JCMT 就是用这一方法将 5 个  $z$  值在 0.9~3.8 之间的高红移星系捕获的<sup>[7]</sup>。

另一种寻找高红移星系的有效方法由 Steidel 等人提出 (例如见文献 [8])。由于高红移星系处于宇宙早期, 恒星形成活动剧烈, 紫外连续辐射很强, 但波长短于 912  $\text{\AA}$  (赖曼系限) 的辐射被视线方向大量的中性氢吸收掉了, 因而该星系的能谱分布 SED 在那里有一个明显的跃变。具有这种性质的星系被称为赖曼跃变星系 (LBG)。哈勃望远镜 4 个滤光片 U、B、V、I 的中心波长分别为 300、450、606、814 nm。这样, 如果一个 LBG 红移为 3, 它将被 HST 在 U 波段观测到, 而能在 B、V、I 波段观测到。反之, 若一个星系能被 HST 在 B、V、I 波段观测到, 而只在 U 波段观测不到 (UV 缺失), 那它就很可能是一个红移约为 3 的 LBG。当然, 准确的红移值尚待大望远镜的光谱观测确定。到目前为止, 用赖曼跃变方法已找到 1000 多个这类高红移星系。与此类似, 如果一个 LBG 星系只有 V、I 像而无 U、B 像 (B 缺失), 其红移应约为 4。若连 V 像也看不见了 (R 缺失), 则红移应约为 5。第一个经 Keck II 分光证实红移大于 5 ( $z = 5.34$ ) 的星系 0140+326 RD1 就是用这种方法找到的<sup>[9]</sup>。目前 LBG 样本的完备视星等在 R 波段约为 25.5 mag, 利用该样本可以初步获得 LBG 的光度函数、尺度分布、成团性、质光比、金属丰度、恒星形成率等重要物理性质。值得指出, 我国学者在这一前沿领域的理论研究方面也取得了可喜的成果<sup>[10]</sup>。

未来几年内, 口径超过 6.5 m、配备高效光学和近红外相机及多目标摄谱仪的大型地面望远镜将达 16 台, 哈勃望远镜由于新装了带有多种滤光片组的大视场 CCD 相机 ACS 而更如虎添翼。例如, 严皓景等人<sup>[11]</sup>用 F775W 波段像缺失而 F850LP 波段像可见的方法, 发现

了约 30 个红移约为 6 的 LBG 候选体。在高红移天体搜寻方面成就卓越的 SDSS 将把接力棒交给能力更强的后继者 LAMOST 等等，都无疑会把人类对宇宙的认识推向更遥远的天际。

## 2 “近在眼前”的太阳系外行星<sup>[12]</sup>

与远在天边距离为 14 Gly 的天区相比，太阳系周围 140 ly 左右的天区可算是“近在眼前”了。搜寻这个区域内的其它行星系统是当代天文学的另一个活跃前沿。“我们在宇宙中是否孤独”，或者“宇宙中是否还有其它地方存在生命（依壁鸠鲁 300 BC）”，都是数千年来人类一直关注的重大问题。对太阳系其它行星或某些大行星的卫星上是否存在生命的研究已进行了相当长的时间，但至今尚未获得确切的答案。与此同时，人们也把目光转向寻找与太阳系相似的其它行星系统。早在 17 世纪末，惠更斯就进行了最初的尝试，但他很快就认识到这个任务的要求超过了当时望远镜的能力。首先，因为行星本身不发光，它的反射光被其母恒星强 100 万倍至几十亿倍的光芒所掩盖。其次，即使离我们最近的恒星也在 1 pc 以外，如果它有一个与之相距 1 a.u. 的行星，两者在天球上的张角将小于  $1''$ ，而且这个张角还将与恒星同我们的距离成反比！在光学天文学家经过 3 个世纪的探索感到山重水复疑无路之时，射电天文学家另辟蹊径实现了柳暗花明又一村的突破。1992 年，Wolszczan 等人通过分析毫秒脉冲星 PSR 1257+12 的脉冲到达时间显示的视向速度变化后发现，PSR 1257+12 周围有一个行星系统<sup>[13]</sup>。尽管脉冲星作为超新星爆发的遗迹如何能保持其行星系统尚待进一步研究，但其方法及结果本身的可靠性无疑重新点燃了人们寻找太阳系外行星的热情。1995 年 Mayor 和 Queloz<sup>[14]</sup> 宣布，他们将类似的视向速度法用于法国上普罗旺斯天文台 1.93 m 望远镜，在太阳型恒星 51 Peg 周围发现了一颗木星质量的行星。自那以后，几乎每月都能听到有新的太阳系外行星被发现的消息，截至到 2002 年 7 月 1 日，已发现的太阳系外行星的总数达 100 颗<sup>[15]</sup>。

一门新兴的行星系统实测学科诞生了。为了理解源源而来的各种观测结果，第一步就是进行太阳系外行星系的统计调查以便回答如下问题：恒星中有多大百分比具有行星系？典型行星系中有多少行星？行星的质量、半径、反照率、自转周期等物理性质如何？它们的轨道半径、偏心率和倾角如何？这些特征与中央恒星的谱型、化学组成、质量、年龄以及是否存在双星伴星有何关系？在这方面，赵刚等人<sup>[16]</sup> 已用我国 2.16 m 望远镜取得了一批太阳系外行星的母恒星精确的化学丰度资料。至于寻找这些行星上可能存在生命的分光特征，则是更大地面和空间望远镜的任务。

探测太阳系外行星的方法包括：

(1) 天体测量学方法，即借助绕转行星的引力使中央恒星的位置产生晃动来推断它们的存在。由于恒星与行星到系统质心的距离反比于各自的质量，这种晃动通常极其微小。例如，太阳的质量约为地球的 100 万倍，因而太阳绕质心转动的半径约为百万分之一天文单位。在离太阳系 3.26 ly (1 pc) 处看，太阳的晃动就只有  $1 \mu\text{as}$ 。这是目前的望远镜无法观测到的。计划发射的空间干涉仪 SIM (The Space Interferometry Mission) 的观测精度达  $2 \mu\text{as}$ ，有可能会发现一批质量较大的行星。

(2) 多普勒位移测量法，即通过行星绕恒星运动引起后者接近和远离我们而产生的多普勒位移来确定它们的存在。根据牛顿运动定律和万有引力定律，恒星与行星绕系统质心的转动速度也与其质量成反比。例如，由地球引力引起的太阳运动速度不足 10 cm/s；51 Peg 视向速度周期变化的幅度为 60 m/s。目前地面大型望远镜可测的恒星多普勒位移幅度低至 3 m/s

(扰动行星的质量相当于土星)。多普勒方法是过去 10 年来一直采用的最主要方法, 它适用于轨道距离很小而质量较大的行星。未来的 GSMT (The Giant Segmented Mirror Telescope) 可能会通过降低测速下限来发现质量较小的行星。

(3) 光度方法, 通过测量行星绕恒星运动而处在观测者与恒星之间时产生的恒星光度的微小下降, 即对恒星的部分掩食 (又称凌) 来确定它们的存在。恒星光度下降的持续时间取决于行星与恒星的距离, 而下降幅度取决于行星与恒星的相对大小。例如地球尺度约为太阳的  $1/100$ , 则在远处观察地球凌日时, 太阳的光度将下降约  $1/10000$ 。目前最好的地面测光精度仅约  $1/1000$ , 故只能发现木星大小的行星。空间光度测量具有十万分之几的精度, 可以发现只有地球尺度的较小行星。由于光度测量法依赖于合适的行星轨道倾角, 为了探查行星系的出现频数, 必须对大量恒星进行类似测量。

(4) 根据引力透镜原理, 也可借助对遥远恒星灵敏的光度测量来揭示它们的行星存在。在视向附近的一颗暗弱恒星的引力场作为透镜将使远方恒星的光强放大, 而围绕该恒星的行星将改变放大率, 从而可能测出行星的存在。

所有这些方法均属于利用中央恒星光度的微小扰动来间接探测其行星, 而我们的最终目标应是对行星本身的辐射进行探测和研究。配备自适应光学的地面望远镜可以对巨行星进行直接成像观测, 但对地球大小的行星必须用类地行星搜寻者 TPF (The Terrestrial Planet Finder) 或增强的下一代空间望远镜 NGST (The Next Generation Space Telescope) 来探测。

直接成像一旦成为可能, 就可对太阳系外行星的辐射进行分析, 以确定行星大气的特征: 行星大气如何依赖于行星质量、行星与中央热星的距离以及恒星的质量? 是否有人类可居住的行星? 是否有制造生命的物质, 如甲烷、分子氧和臭氧? 由于明亮的中央恒星辐射的干扰, 行星大气的观测极具挑战性。TPF 的设计就是用干涉测量法消除中央恒星辐射的干扰来解决问题的; 借助附加的掩食器, NGST 也可对此目的做出贡献。

### 3 对未来的展望

#### (1) 视向速度法搜寻

ESO 2001 年开始用 3.6 m 望远镜以  $1\sim 2$  m/s 精度监测恒星; 瑞士 1998 年开始用 La Silla 1.5 m 望远镜监测 800 颗恒星; Keck 10 m 望远镜以 3 m/s 的精度监测 400 颗恒星。

#### (2) 天测法搜寻

NASA 将于 2004 年发射精度为  $50 \mu\text{as}$  的天测卫星 FAME (Full-sky Astrometric Mapping Explorer), 以在几年内测量百万颗恒星。预计 FAME 应能发现数百颗木星质量的行星; SIM 以  $4 \mu\text{as}$  的精度将有能力发现 (15 pc 内) 土星质量和 (5 pc 内) 地球质量的行星。

ESA 的 GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) 计划将测量银河系内 10 亿颗恒星的位置, 其精度达  $1 \mu\text{as}$  ( $V = 5$ ) 和  $10 \mu\text{as}$  ( $V = 15$ )。在约 50 万颗太阳型恒星中, GAIA 能探测到 10 pc 内 100 颗恒星周围的“大地球” (10 倍地球质量) 和 200 pc 内木星质量的行星。如果 5% 的恒星有行星系统, 估计 GAIA 可发现约 25000 颗太阳系外木星质量的行星。

#### (3) 成像

在地面, Keck、VLT 等大型望远镜将用自适应光学技术显著改善成像性能; 在空间, 预定 2010 年发射的 NGST 将有可能用类似日冕仪的装置直接看到邻近恒星周围木星质量的

行星。至于类地行星的搜寻和其上可能存在生命的研究，则要依赖于 2012 年计划发射的编队飞行的空间红外干涉卫星 TPF。

#### (4) 凌

ESA 预定 2005 年发射的 COROT (CONvention ROTation and planetary Transits, 口径为 25 cm) 将用一半时间观测行星凌, 估计可发现半径小到约 2 倍地球值、距其母恒星距离为 0.5 a.u. 的数十颗行星; Kepler 计划也完全致力于行星凌, 它以 1 m 口径和 100 平方度视场应在 5 年运行期内探测到数百颗类地行星。

#### (5) 乐观的时间表

- 1) 太阳系外行星的首批成像 (2005 年前后);
- 2) 类地行星的探测 (2005 年);
- 3) 搜寻生命的光谱特征 (2010~2015 年);
- 4) 太阳系外行星的多像元成像 (2025 年以后);
- 5) 太阳系外行星的多像元光谱 (2030 年以后)。

### 参 考 文 献

- 1 Illingworth G. *Astrophys. Space Sci.*, 1999, 269/270: 165
- 2 何香涛. 观测宇宙学, 北京: 科学出版社, 2002: 141
- 3 Wang S G, Su D Q, Chu Y Q et al. *Appl. Opt.*, 1996, 35: 5155
- 4 黄克凉, 周洪楠. 天文学进展, 2002, 20(2): 175
- 5 Hu E M, McMahon R G, Cowie L L. *ApJ*, 1999, 522: L9
- 6 Hu E M, Cowie L L, McMahon R G. *ApJ*, 2002, 568: L75
- 7 Hughes D H, Serjeant S, Dunlop J et al. *Nature*, 1998, 394: 241
- 8 Steidel C, Givanisco M, Pettini M et al. *ApJ*, 1996, 462: L17
- 9 Dey A, Spinrad H, Stern D et al. *ApJ*, 1998, 498: L93
- 10 束成钢, 姜佩芳. 天文学进展, 2002, 20(2): 190
- 11 Yan H, Windhorst R A, Cohen S H. *ApJ*, 2003, 585: L93
- 12 Schneider J. *Exoplanets, Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, London, New York: MacMillan Publisher Ltd, 2001: 759
- 13 Olszczan A, Frail D A. *Nature*, 1992, 355: 145
- 14 Mayor M, Queloz D. *Nature*, 1995, 378: 355
- 15 Schneider J. *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*, <http://www.obspm.fr/planets>, 2002
- 16 Zhao G, Chen Y Q, Qiu H M et al. *AJ*, 2002, 124: 2224

## High Z Galaxies and Exoplanets

Zou Zhenlong

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

### Abstract

It is an introductory remarks of our knowledge frontier about objects in distant as well local universe. Attention is focused on high z galaxies and exoplanets: their discovery methods, progress and some future plans.

**Key words** astrophysics—high z galaxies—exoplanets—review