

文章编号: 1000-8349(2008)02-0103-12



河外星系中的厚盘

赵君亮

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 自 1979 年以来, 越来越多的观测证据表明, 在许多盘状星系中普遍存在厚盘成分, 它们在结构、化学组成和运动学等方面与薄盘有着明显的不同。一般而言, 星系中厚盘的标高比薄盘大得多, 厚盘恒星与薄盘恒星相比, 金属丰度较低而年龄较老, 绕星系中心的转动速度较慢而速度弥散度较大。上述观测证据表明厚盘确实是星系长期演化后的产物, 对于研究河外星系的形成和演化史有着重要的天体物理意义。该文在简单回顾银河系和河外星系中厚盘发现和确认史的基础上, 介绍了对星系厚盘结构参数等性质的探测途径和目前取得的一些主要认识, 并与薄盘恒星的相应特征作了比较。结构参数主要包括厚盘和薄盘的标长、标高和轴比, 其他观测性质有两类盘的颜色、年龄、金属度和运动学特性等。最后, 结合上述观测性质, 对厚盘形成的几种可能的机制及未来可以开展的工作做了简要的说明和讨论。

关键词: 天体物理学; 星系; 厚盘; 形成机制

中图分类号: P157 **文献标识码:** A

1 引 言

1983 年, Gilmore 和 Reid^[1-3] 通过对南银极附近 18.24 平方度天区内约 12 500 颗恒星样本 (极限星等为 $V = 19.0$ 、 $I = 18.0$) 的分析, 首次提出银河系除了原来意义上的薄盘外, 还存在厚盘结构。星系天文学家随即对厚盘产生了很大的兴趣。目前, 银河系厚盘的存在已被人们普遍接受, 并对其各方面性质及形成机制作了广泛的研究和讨论^[4-8]。

早在 1979 年, Burstein^[9] 通过对 5 个侧向透镜星系 NGC 4111、4350、4474、4570 和 4762 的研究, 指出这些盘状星系除了存在薄盘和核球外, 有可能还存在第 3 种结构成分——厚盘。几乎同一时间, Tsikoudi^[10] 通过对侧向透镜星系 NGC 3115 的研究发现: 在该星系盘的周围存在某种光度较暗、范围比较大的包层, 但他并没有明确提出厚盘这一概念。现

收稿日期: 2008-01-08; 修回日期: 2008-02-22

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (10773020)

在看来, 在 Burstain 和 Tsikoudi 的早期工作中, 有关河外星系中存在厚盘的概念是不太明确的。因此, 随着 Gilmore 和 Reid 的发现, 加之对银河系可以取得河外星系所不能企及的、各别恒星的丰富观测资料, 人们的注意力便自然会转向着重于对银河系厚盘的研究。

总的来说, 与薄盘相比, 银河系厚盘的观测性质在结构、元素丰度和运动学等方面存在较为明显的差异。结构上, 厚盘的标高明显大于薄盘, 标长也可能比薄盘略长^[11,12]。就元素丰度来看, 厚盘恒星相对薄盘恒星是贫金属天体, 年龄比较老^[13]; 与具有相近铁丰度的薄盘恒星相比, 厚盘恒星中的 α -元素含量明显增多^[14,15]。在运动学特征方面, 厚盘恒星绕银心的转动速度比薄盘恒星来得小, 但速度弥散度却比较大^[16,17]。所有这些观测事实表明, 厚盘是银河系形成早期阶段的某种遗迹, 它并不是薄盘的简单扩展, 而是代表了银河系形成之初的一个特定时期, 有关特征可以对盘状星系形成模型提供非常好的观测约束^[18-20]。

自 1980 年以来, 随着观测技术的提高、资料的积累和分析工作的深入, 人们在几乎所有类别的不同质量盘状星系中都发现有厚盘结构存在, 包括 S0 星系^[21-23]、Sb 星系^[24-26], 以及更晚型的一些星系^[27-30]。有人甚至认为厚盘是所有盘状星系形成过程的普遍性产物^[31]。

在相当一段时间内, 人们对星系形成的大部分观测研究集中于两类星系: 具有非常高红移的年轻星系和零红移星系——银河系。对前者可以观测到正在发生中的星系形成过程, 而后者则可以通过对各别恒星的观测来解读过去的星系形成和演化史。这两条研究途径尽管方向正确, 但也各有自身的缺陷。高红移星系的一些性质很难与低红移星系对应起来, 因为期间出现了诸多不易捉摸的变化因素, 如星系形态的转变、光度演化、星系并合事件等。可以追踪的只是星系总体性质的变化, 很少能揭示推动星系演化的物理机制方面的细节情况。另一方面, 对于银河系来说, 尽管可以取得有关恒星的大量观测结果, 如年龄、金属度、运动学资料等, 但这些资料只是反映了银河系的演化史, 并不能对一般意义上的星系形成过程提供观测约束, 也无法由此探究星系形成与星系的一些基本参量(如质量、角动量等)间的关系。最近, Hammer 等人^[61]发现, 像银河系这样的星系仅占旋涡星系总数的 7% 左右, 因而不能算是典型的旋涡星系。

为数众多的近距星系有可能为上述两种极端情况提供某种联系。在距离不太远的范围(如 $cz \leq 5\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)内, 可以取得各种类型星系的高分辨率图像、进行形态分类、取得低面亮度区域的多波段测光和光谱资料, 以及研究小空间尺度上的内部动力学状态等, 而这对于高红移星系来说通常是难以做到的。总体上看, 盘状星系的结构较椭圆星系来得复杂, 它们可能包括晕、核球、厚盘、薄盘、气体盘以及暗晕等多种成分, 这种结构组成必然是星系形成时的内外部条件及此后长期演化的结果。随着厚盘结构的不断发现, 对厚盘的观测和研究便成为探索星系形成和演化的一条重要途径, 并成为天体物理研究的一个热点。

2 厚盘的结构参数

对于星系中的某种盘成分, 无论是薄盘还是厚盘(甚至包括气体盘), 通常认为物质的密度(对恒星是数密度)分布, 随中心距 R 和中面距 z 的变化均服从指数律, 并以标长 h_R 和标高 h_z 这两个结构参数来描述盘内的物质分布。这里的中心距是指到盘中心的(投影)距离, 在

银河系中就是银心距; 中面 (midplane) 则指星系盘的对称平面 (在银河系中就是银道面), 而离开中面的垂直距离便称为中面距, 在银河系中就是银面距。例如, 在垂直中面的方向上, 如以 $f(z)$ 表示不同中面距 z 处恒星的数密度, 则有 $f(z) = f_0 e^{-z/h_z}$, 式中 $f_0 = f(0)$ 为中面 ($z = 0$) 处的恒星数密度。

从目前的观测研究结果来看, 星系中厚盘指数标高 $h_{z,tk}$ 的数值最大可达数千秒差距, 其与薄盘指数标高 $h_{z,tn}$ 之比 $k_z = h_{z,tk}/h_{z,tn}$ 大多在 2~6 范围内^[32]。例如, 根据 Gilmore 和 Reid 的研究结果可知: 银河系厚盘标高为 1 450 pc, 薄盘标高为 300 pc, 由此得出标高比在 4.8 左右^[3]。不过, 因分析用样本和方法的不同, 后来一些工作倾向于银河系有较小的厚盘标高, 如 1999 年 Robin 等人^[33] 曾得出 $h_{z,tk} = 0.76$ kpc, 相应的标高比仅为 $k_z = 2.5$ 。又如 Wu 等人^[26] 得到星系 NGC 4565 的标高比为 2, 而近期 Pohlen 等人^[23] 通过对 8 个侧向透镜星系的研究, 得出它们的平均标高比为 3.6。

统计研究发现, k_z 值的大小还与星系的质量有关, 一般来说星系的质量越小, 标高比 k_z 的数值越大, 对此一种解释是认为就大质量星系而言, 可能有一部分恒星已在动力学演化过程中转移到了星系的椭球子系^[32]。最近的一项研究表明, 在大质量星系中, 厚盘占星系重子物质总量的比例不超过 10%, 然而对小质量星系来说, 这一比例可高达 25%~30%^[29](见图 1)。

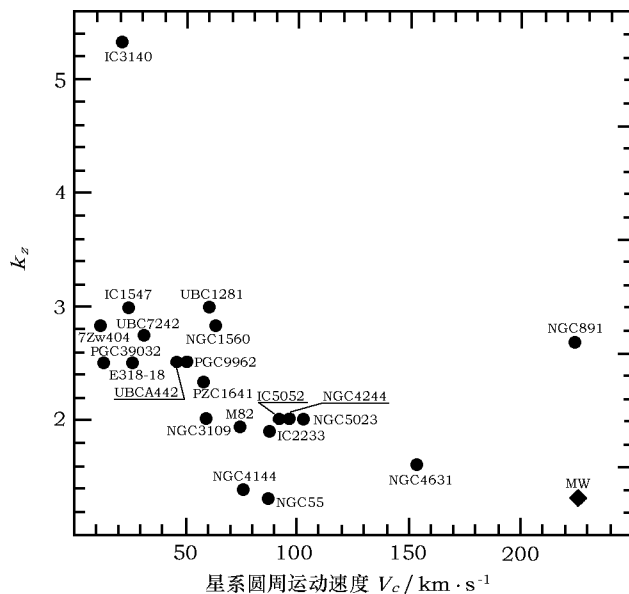


图 1 星系厚盘与薄盘标高之比 k_z 与星系质量的关系^[62]

V_c 越大星系的质量越大

对于一个盘状星系来说, 薄盘恒星占了星系重子物质中的大部分, 它们高度集中于中面附近, 其标高远比厚盘标高来得小, 而中面聚度 (在银河系中就是银面聚度) 比厚盘恒星高得多。因此, 在中面附近星系光度主要来自薄盘恒星, 如对银河系来说, 大部分研究结果表明在太阳邻域内厚盘恒星仅占恒星总数的 2%~5%^[3,25]。一旦远离中面, 薄盘恒星的数密度降低得很快, 厚盘恒星便渐而占有重要、甚至主导的地位。2002 年 Neeser 等人^[28] 发现, 侧向低面亮

度星系 ESO 342-G017 的厚盘贡献了恒星盘总光度的 20%~40%，而 Yoachim 和 Dalcanton [32] 指出，在 $z = 3 \sim 4.5h_{z, \text{tn}}$ 的地方，星系总光度的 50%~80% 可能来自厚盘恒星。对银河系来说，其厚盘光度可能达到盘总光度的 13% 左右 [34]。

在大多数情况下，星系厚盘的标长略大于薄盘标长，但两者之间并没有必然的联系 [24,32]。如 2002 年 Wu 等人 [26] 曾对侧向星系 NGC 4565 作了中带面测光，分析结果表明，该星系的厚盘标长为 11.03 kpc，薄盘标长为 8.05 kpc，相应的标长比 $k_R = 1.37$ 。2004 年，Pohlen 等人 [23] 对侧向透镜星系所得出的平均标长比为 1.8。他们还发现，厚盘中心的光度密度只及薄盘的 3%~10%，而厚盘和薄盘的实际径向延伸范围是相近的，可见厚盘范围所涉及的标长要比薄盘小。

少数星系的标长比 $k_R < 1.0$ ，如 1999 年 Abe 等人 [27] 对侧向 Sc/Sd 星系 IC 5249 作了研究，得到 $k_R = 0.6$ 。最近，Yoachim 和 Dalcanton [29] 通过对 34 个不同质量晚型侧向盘状星系进行研究，得到厚盘标长与薄盘标长之比 $k_R = 0.6 \sim 1.6$ ，平均值为 1.25，其中 $k_R < 1.0$ 的星系仅有 4 个，不到样本星系总数的 12%。不过，由于薄盘和厚盘的标长都随星系质量的增大而变大，于是标长比 k_R 的大小与星系质量间的关系就不太明显了（见图 2）。

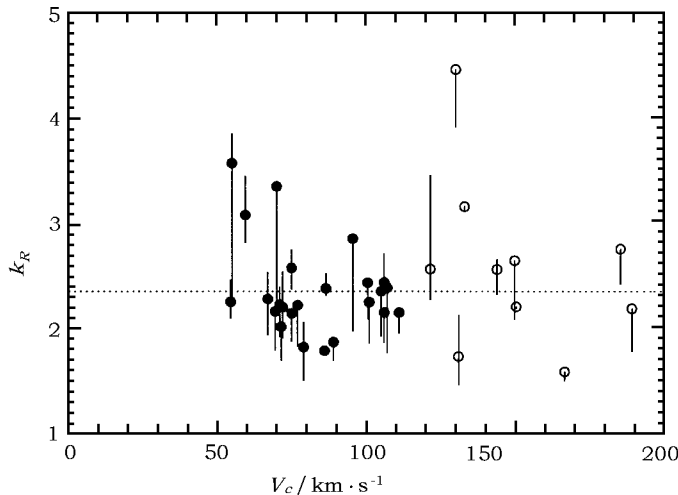


图 2 星系厚盘与薄盘标长之比 k_R 与星系质量的关系 [29]

空心圆圈表示有明显尘带的星系

另一个用以描述盘内物质分布的重要结构参数是盘的轴比 c ，它的定义为 $c = a/b$ ，其中 a 和 b 分别为盘的直径和厚度。在实用上，无论是厚盘还是薄盘，确定它们的真实直径和厚度并不容易，人们通常利用盘的标长和标高来计算其轴比，即 $c = h_R/h_z$ [29]。轴比的大小反映了盘结构的扁平程度： c 值越大，说明盘的外形越扁。Burstain 早期工作得到的厚盘轴比为 4:1~5:1 [9]。后来的一些研究表明，大多数情况下厚盘的轴比值为 3:1~4:1，而薄盘的轴比有的甚至会超过 8:1 [29,31,32]，可见厚盘的确名副其实，它的截面形状要比薄盘厚得多。另一方面，无论是厚盘或者薄盘，它们的轴比值与星系质量的大小无关（见图 3）。

对于银河系来说，如果采用 Robin 等人 [35] 和 Ng 等人 [36] 的结果，厚盘标长的范围为

2.8~4.5 kpc, 则厚盘的轴比可能在 3:1~7:1 范围内; 近期所得出的银河系的厚盘轴比约为 3:1~4:1, 而薄盘的轴比已接近 6.0^[29], 与多数河外星系的情况差不多。

需要指出的是, 由于颜色梯度的存在, 不同波段测光资料所得出的有关厚盘 (以及薄盘) 的结构参数并不相同, Yoachim 和 Dalcanton^[29] 对此作了较为详细的说明, 其中包括尘埃消光的可能影响。

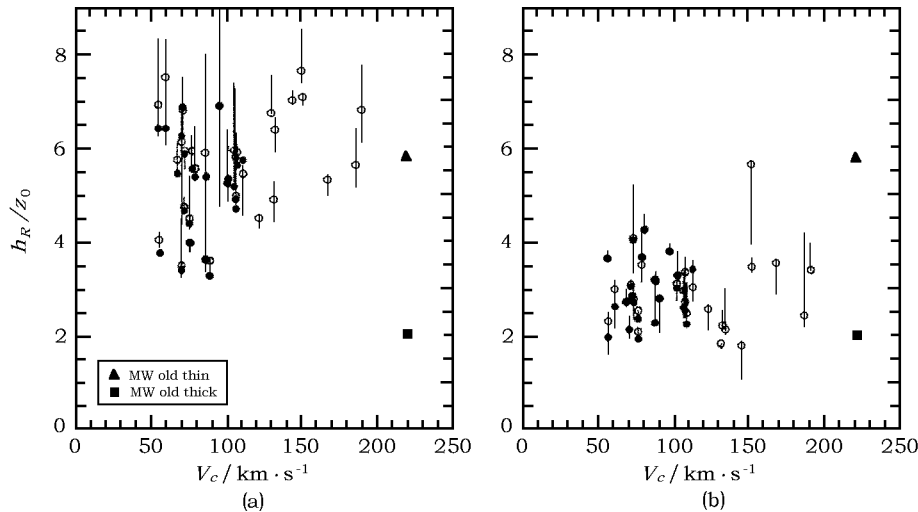


图3 星系盘的轴比与星系质量间的关系^[29]

(a) 薄盘, (b) 厚盘。空心圆圈表示有明显尘埃带的星系; 黑三角为银河系薄盘; 黑方块为银河系厚盘

3 其他观测特征

除了结构参数外, 与经典意义上的星系盘——薄盘相比, 厚盘在颜色、年龄、金属度和运动学性质等方面也表现有不同的观测特征。

随着哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 用于星系的观测研究, 它具有高空间分辨率性能, 因此可以在一些近距星系中 (特别是它们的边缘部分) 分辨出大量的单颗恒星, 并进而探究它们的星族特征, 如年龄和金属度等。Seth 等人 and Mould^[37-39] 的近期工作表明, 在中面距较高 ($z \approx 4h_{z,tn}$) 的地方, 也就是在以厚盘恒星为主的位置上, 大多数都是年老的红巨星支恒星, 年龄范围约为 5~13 Ga。与薄盘相比, 厚盘的颜色显然偏红, 因此 Mould^[39] 在他的工作中明确称之为红色厚盘。

红巨星的这种颜色表明, 它们大多是一些贫金属星, 就 Seth 等人的样本星系而言, 这类恒星金属度的中位值为 $[Fe/H] \approx -1$ 。不过, 他们所研究的 6 个低质量星系的金属度仍有较大的差异, 其值分别为 -2.3, -1.7, -1.3, -0.7, -0.4 和 0.0^[38]。上述差异是可以理解的, 因为除了不同星系的厚盘金属度必然会有差异外, 即使对同一星系, 由于观测的样本恒星不同, 所得出的厚盘金属度值也会有所不同。例如, 对观测工作最为细致的银河系来说, 大多

数研究所得出的厚盘恒星的金属度在 -0.6 左右 [4,13,33,40]，但也有明显不同的结果 [41,42]。

Seth 等人 [38] 还发现，低质量星系中年龄不超过 1 亿年的年轻恒星的标高，大于银河系中同龄恒星的标高，因而这类星系中的恒星可能是在一个较厚的盘状区域内形成的。不仅如此，在他们的所有样本星系中，从年轻的主序星到中等年龄的 AGB 星，直到老年红巨星，恒星族的标高随着恒星年龄的增大而增大。此外，在垂直星系中面的 z 方向上，他们并没有发现存在明显的金属度梯度，Dalcanton 等人 [19] 就厚盘形成的可能机制对这一观测事实作了一定的解释。另一方面，Tikhonov 等人利用 HST 观测资料对旋涡星系 M81、NGC 55 和 NGC 300 的研究表明，主要反映星系厚盘特征的红巨星的平均金属度分别为 -0.65 、 -1.25 和 -0.87 ，且表现出存在径向金属度梯度 [43]。

最近 Yoachim 和 Dalcanton 发现 [29]，大质量星系的光度主要来自薄盘，但对圆周运动速度 $V_c \leq 120 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的小质量星系来说，厚盘恒星贡献了星系光度的近一半，而它们的质量则超过全部恒星质量的一半。因此，尽管低质量矮星系呈现蓝色，但它们中大部分恒星的年龄可能是相当老的。如果进一步考虑到薄盘中含有大量尚未形成恒星的中性氢气体，那么即使对那些 $V_c \leq 80 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的小质量星系，厚盘与薄盘的重子物质质量之比也明显小于 1.0。

侧向星系的颜色分布情况较为复杂，这是因为在盘状星系的中面附近会存在大量的尘埃，从而使薄盘恒星的颜色偏红。2002 年，Dalcanton 和 Burstain [31] 对 47 个侧向晚型盘状星系的光学 ($B - R$) 和光学 - 红外 ($R - K$) 颜色分布的研究表明，这些星系在垂直中面方向和径向都存在较明显的颜色梯度。他们还讨论了厚盘的存在、厚盘恒星和薄盘恒星的年龄差异、不同质量星系颜色梯度的起因等问题。2005 年，Mould [39] 利用 HST 资料研究了 4 个近距侧向星系 (NGC 1550、UGC 1281、NGC 784 和 UGCA 442) 在 z 方向上恒星的 $V - I$ 颜色分布情况 (见图 4)，这些星系的距离约在 $3 \sim 4 \text{ Mpc}$ 范围内。结果表明这 4 个星系都不存在 z 方向上的颜色梯度，或者说 $\Delta(V - I)/\Delta z \approx 0$ ，其中以星系 UGCA442 的 $\Delta(V - I)/\Delta z$ 值为最大，但也仅为 0.11 ± 0.10 。

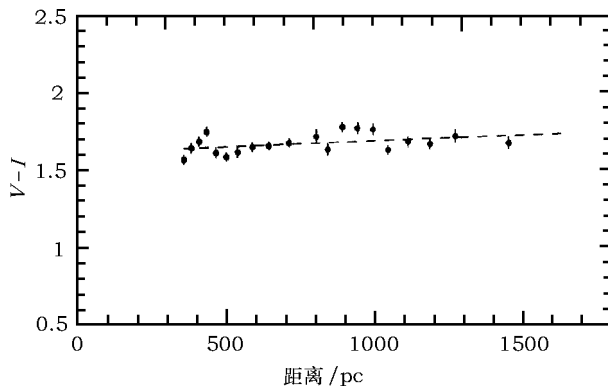


图 4 星系 NGC 784 在 z 方向上的颜色分布 [39]

颜色梯度 $\Delta(V - I)/\Delta z = 0.06 \pm 0.04$

如果说迄今为止，天文学家仅对极少数 (也许不超过 10 个) 河外星系中的远离星系中面的恒星作了有关星族特征的探索，那么对此类恒星已进行运动学研究的河外星系就为数更少了。

2005 年, Yoachim 和 Dalcanton^[32] 对 Flat Galaxy Catalog^[44] 中的 2 个晚型、无核球的侧向星系 FGC 227 和 FGC 1415, 利用 Gemini(北) 望远镜作了较为详细的运动学研究。他们发现, 这 2 个星系的厚盘和薄盘, 在观测运动学特征上的表现颇不相同。FGC 1415 内厚盘的转动速度明显比薄盘来得慢, 两者的转动方向是相同的, 这和银河系厚盘的运动特征相类似。FGC 227 的情况则不同, 在远离中面的地方星系转动速度非常缓慢, 且厚盘成分的转动方向很可能与薄盘反向。除了盘的转动特性外, Yoachim 和 Dalcanton^[32] 还对这 2 个星系的恒星视向速度弥散度分布进行了分析。他们发现, 在 FGC 1415 内, 中面上和中面外的恒星速度弥散度是类似的, 不同中心距处其值大体上保持为常数。FGC 227 的情况有所不同, 中面上的恒星速度弥散度随中心距的增大而增大, 并认为这一观测事实与前文提到的存在缓慢而又反向转动的厚盘成分的结论是一致的。不过, 由于观测信噪比太低, 对中面外未能取得明确的结果。

4 探测途径

在银河系内, 人们可以取得各别恒星的观测资料, 根据不同的运动学和化学性质来论证厚盘和薄盘恒星, 并进而探求它们的结构特征。河外星系的情况完全不同, 即使利用高分辨率空间技术(如 HST) 能分辨出近距盘星系边缘(对侧向星系来说是远离星系中面处)的单颗恒星, 并进而取得这些恒星的年龄、金属度等反映其星族特征的观测资料, 但无法由此确定盘的结构参数。这是因为薄盘恒星的中面聚度很高而无法分辨, 利用远离星系中面处的单颗恒星资料不可能区分厚盘和薄盘的不同结构特征。就目前来看, 可用于河外星系盘结构研究的唯一资料是星系的面亮度测光^[28]。

对于一个盘状星系来说, 其面亮度测光所得的结果, 在图像上应表现为盘中心附近最为明亮, 随着中心距 R 和中面距 z 的增大, 星系的面亮度渐而降低。通常认为, 星系面亮度在 R 和 z 方向上的变化均服从指数律^[45]。据此, 可以建立某种反映星系面亮度 I 的变化规律的数学模型^[9,29,32,38], 并与实测面亮度进行比较以确定盘的结构参数, 如标长 h_R 、标高 h_z 和轴比 c 等。如果设定星系中只有 1 个盘(薄盘), 并发现模型与实测面亮度符合得不太好, 在 z 较大的地方实测面亮度与模型面亮度相比有较为明显的亮度超, 则说明模型可能不合理。在这种情况下, 可以进一步设定星系有 2 个盘, 即薄盘和厚盘, 并通过与实测面亮度的拟合来确定每个盘的结构参数。要是改进后的模型与实测面亮度分布能取得更好的拟合效果, 可以认为星系有 2 个性质不同的盘, 从而推断厚盘的存在。

上述探测星系厚盘是否存在的基本原理看上去颇为简单, 但在实际应用时还会涉及诸多其他必须考虑的因素, 如观测资料的合理处理、测光的波段、具体采用的数学模型形式等, 因而所取得的结果可能并不是唯一解^[19], 不同作者往往根据各自的具体情况来加以处理。另外, 在有关厚盘结构的研究中, 作为观测对象的样本星系都是一些侧向或近乎侧向的盘状星系。

Burstain^[9] 在他有关发现存在厚盘的早期工作中, 设定星系盘在沿星系投影像长轴方向的中心距为 x_0 、中面距为 z 处, B 星等系统的面亮度分布轮廓为 $\mu_B(x_0, z)$, 则描述 $\mu_B(x_0, z)$ 的数学模型是^[9]:

$$\mu_B(x_0, z) = \mu_0 + 1.085 \ 7\alpha x_0 [(1 + z^2 \sec^2 i)/x_0^2]^{1/2}. \quad (1)$$

式中, α^{-1} 为标长, i 是星系盘的倾角, 而 $\mu_0 = \mu_B(x_0, 0)$ 。Burstain 就是通过比较上述模型与实测结果, 发现在他的样本星系中除了核球和星系盘 (即薄盘) 的光度外, 为了使实测光度轮廓与模型拟合得更好, 需要引入另一个独立的、面亮度相对比较暗的光度成分, 并在此基础上提出了厚盘的概念。

近期, Yoachim 和 Dalcanton 在探究星系盘结构时用以描述盘光度密度分布的模型中, 认为每个盘成分都是一个径向指数盘, 它们在柱坐标位置 (R, z) 处的光度密度为^[29,46,47]

$$L(R, z) = L_0 \exp(-R/h_R) f(z). \quad (2)$$

这里, L_0 是星系中心的光度密度, h_R 为标长, $f(z)$ 是表述恒星在 z 方向上的分布函数, 它的一般形式为

$$f(z) = \operatorname{sech}^{2/N}(Nz/h_z). \quad (3)$$

其中, h_z 为盘的标高, 而参数 N 用于控制中面附近光度轮廓的形状。尽管取不同的 N 会有不同的含意, 如当 $N \rightarrow \infty$ 时式 (3) 变为 $f(z) \propto e^{-2z/h_z}$ 等, 但这只会影响到中面附近的光度分布。在中面距较大的地方, 无论 N 取何值, 光度密度都大致按指数律衰减, 因而 N 的取值对厚盘结构探测结果的影响是不灵敏的, 在 Yoachim 和 Dalcanton 的工作中取 $N = 1$ 。把上述空间光度密度的表达式转换成星系的面亮度模型后, 便可以观测面亮度进行拟合, 以确认厚盘结构是否存在^[29]。

除了由星系的面亮度测光来研究侧向星系的盘结构特征外, 近期人们开始利用星系的光谱观测资料, 通过建立某种数学模型来分解星系的观测自转曲线, 进而分析厚盘和薄盘恒星各自的转动特征, 其目的是从运动学特性上深入探究厚盘的可能形成机制^[32]。

5 形成机制

观测表明, 厚盘与薄盘在结构、元素丰度及运动学等性质上存在明显的系统性差异, 由此推论两者很可能有着不同的形成机制。人们普遍认为, 就薄盘来说, 其大部分恒星显然是在一个角动量比较大的自转盘中逐渐形成的^[48-50]。另一方面, 对厚盘形成机制的认识还远远不够, 其情况可能较为复杂。

通常认为盘状星系中厚盘结构的形成有 3 种不同的机制: (1) 在星系演化过程中先形成薄盘, 薄盘因垂直方向的动力学加热而形成厚盘, 这说明厚盘恒星最初是在薄盘中形成的, 然后再运动到现在厚盘的位置^[33,51,52]; (2) 随着原星系云的整体坍缩, 厚盘恒星在位于中面距较高的地方直接从气体坍缩形成, 它们与薄盘恒星无关^[53-55]; (3) 厚盘恒星来自于若干小伴星系的并合过程, 它们完全是在母星系之外形成的, 因并合而成为母星系的成员^[56-58]。

显然, 上述 3 种机制都可以对银河系和河外星系厚盘结构的观测特征做出较为合理的解释。但是, 对不同的机制来说, 盘状星系早期阶段的演化特性会有很大的差异。如果考虑第 1 种机制, 那么盘主要是通过比较平稳的气体吸积形成的, 期间可能发生若干次短时标的伴星系并合事件。对于第 2 种机制, 厚盘恒星可以有 2 种形成方式: (1) 盘基本上是在原星系云的整体平稳坍缩过程中形成的, 厚盘恒星的形成时标并不长^[53]; (2) 厚盘恒星

是在一个气体盘中形成的, 后者则因恒星的形成而呈现动力学加热^[54]。如果采用第 3 种机制, 那么尽管今天观测到的厚盘有相当规则的结构, 但它们可以由参与并合的星系“碎片”集聚而成^[32]。

厚盘恒星的元素丰度特征可以为区分厚盘形成机制提供进一步的观测约束。例如, 这类恒星的金属度偏低而 α -元素含量偏高, 说明它们是在星系演化的早期形成的, 而且形成过程所经历的时标比较短。不过, 上述 3 种可能的形成机制都能在一定程度上对厚盘恒星元素丰度的观测特征给出某种解释^[32]。有人认为, 要想利用恒星的元素丰度来对银河系厚盘的起源做出明确的观测判定, 需要测得 10 万颗或更多厚盘恒星的金属度^[59]。

就星系结构的形成和演化问题来说, 除了探究不同成分恒星的化学组成外, 研究它们目前的运动学状态也许更为重要。这是因为: (1) 如果先形成薄盘, 然后经动力学加热形成厚盘, 那么厚盘和薄盘应该有类似的圆周运动曲线; (2) 要是厚盘在气体内落、坍缩中形成, 则因角动量在这一过程保持守恒, 厚盘的转动速度必然始终慢于薄盘的转动速度, 两者的差异情况取决于厚盘和薄盘的相对标长; (3) 如果厚盘是通过小质量伴星系的并合集聚而成, 那么对不同星系来说, 厚盘和薄盘的相对运动学状态必然表现为因星系而异, 甚至可以差别很大。

对银河系内恒星运动学资料的分析表明, 厚盘与薄盘的转动方向是相同的, 不过厚盘的转动比薄盘慢, 两者的差异约在 $40\sim 90 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间^[13,17,58,60]。对于这种观测运动学特征, 不同的厚盘形成模型都能做出一定的解释^[11,16,58]。不过, 如果厚盘的转动比薄盘有明显滞后, 上述 3 种形成机制中的前 2 种便不可能给出合理的说明。

Yoachim 和 Dalcanton 对侧向星系 FGC227 和 FGC1415 的运动学研究表明, FGC1415 内远离星系中面处盘的转动速度要比中面附近盘的转动速度约慢 20%~50%, 与银河系厚盘的运动特征相类似。FGC227 的运动特征与之全然不同, 在远离中面的地方, 星系盘转动的速度非常缓慢, 估计不会超过中面附近盘转动速度的约 25%。他们还进一步发现, 在把这 2 个星系的观测自转曲线分解为厚盘和薄盘两种成分后, FGC1415 厚盘的转动速度为薄盘的 30%~40%, 且厚盘与薄盘的转动方向相同。另一方面, FGC227 厚盘的转动速度不仅非常慢, 而且它的转动方向很可能与薄盘是反向的。由此可见, 这 2 个星系中的厚盘也许有着不同的形成机制。不过, 要做出明确的一般性结论, 显然还有待于对更多的星系取得它们尽可能多的运动学观测资料, 并开展相应的分析和研究。

盘状星系中厚盘结构的普遍存在已是不争的事实, 目前人们对厚盘的一些基本性质已经有了较为广泛的了解, 但许多细节尚有待进一步的研究。最近 Dalcanton 等人^[20]指出, 在今后 10 年内若干涉及厚盘研究的重要方面必将引起人们的关注, 如探索低红移和高红移星系厚盘观测结果之间的联系, 实测与星系形成的数值模拟和半解析模型间的比较, 探索厚盘与核球和恒星晕之间的关系等。厚盘的研究对探究星系的结构和演化至为重要, 也许不同星系中厚盘的形成可能有着不同的机制, 或者一种以上的机制会在不同程度上对同一星系中厚盘的形成发挥作用。随着观测资料的积累和精化, 以及研究方法的改进, 人们终将会对厚盘的性质和形成机制取得更为全面的认识。

参考文献:

- [1] Reid I N. MNRAS, 1982, 201: 51
- [2] Reid N, Gilmore G. MNRAS, 1982, 201: 73
- [3] Gilmore G, Reid N. MNRAS, 1983, 202: 1025
- [4] Fuhrmann K. A&A, 1998, 338:161
- [5] Prochaska J X, Nanumov S O, Carney B W et al. AJ, 2000, 120: 2513
- [6] Mashonkina L, Gehren T. A&A, 2001, 376: 232
- [7] Feltzing S, Bensby T, Lundstron I. A&A, 2003, 397: L1
- [8] Bensby T, Feltzing S, Lundstron I. A&A, 2003, 410: 527
- [9] Burstein D. ApJ, 1979, 234: 829
- [10] Tsikoudi V. ApJ, 1979, 234: 842
- [11] Buser R, Rong J, Karaali S. A&A, 1999, 348: 98
- [12] Norris J E. ApSS, 1999, 265: 213
- [13] Chiba M, Beers T C. AJ, 2000, 119: 2843
- [14] Mishenina T V, Soubiran C, Kovtyukh V V et al. A&A, 2004, 418: 551
- [15] Brewer M, Carney B W. Publ. Astron. Soc. Australia, 2004, 21: 110
- [16] Soubiran C, Bienaymé O, Siebert A. A7A, 2003, 398: 141
- [17] Parker J E, Humphreys R M, Beers T C. AJ, 2004, 127: 1576
- [18] Freeman K C, Bland-Howthorn J. ARA&A, 2002, 40: 487
- [19] Dalcanton J J, Seth A C, Yoachim P. Island universes, Astrophysics and Space Science Proceedings. US: Springer, 2007: 29
- [20] Dalcanton J J, Yoachim P. AJ, 2006, 131: 226
- [21] de Grijs R, van der Kruit P C. A&AS, 1996, 117: 19
- [22] de Grijs R, Peletier R F. A&A, 1997, 320: L21
- [23] Pohlen M, Balcells M, Lütticke R et al. A&A, 2004, 422: 465
- [24] Shaw M A, Gilmore G. MNRAS, 1989, 237: 903
- [25] Morrison H L, Miller E D, Harding P et al. AJ, 1997, 113: 2061
- [26] Wu H, Burstein D, Deng Z G et al. AJ, 2002, 123: 1364
- [27] Abe F, Bond I A, Carter B S et al. AJ, 1999, 118: 261
- [28] Neeser M J, Sackett P D, De Marchi G et al. A&A, 2002, 383: 472
- [29] Yoachim P, Dalcanton J. AJ, 2006, 131: 226
- [30] Tikhonov N A. ARep, 2006, 50: 517
- [31] Dalcanton J J, Bernstein R A. AJ, 2002, 124: 1328
- [32] Yoachim P, Dalcanton J. ApJ, 2005, 624: 701
- [33] Robin A C, Haywood M, Crze M et al. A&A, 1996, 305: 125
- [34] Morrison H L, Boroson T A, Harding P. AJ, 1994, 108: 1191
- [35] Robin A C, Haywood M, Crézé M et al. A&A, 1996, 305: 125
- [36] Ng Y K, Bertelli G, Chiosi C et al. A&A, 1997, 324: 65
- [37] Seth A C, Dalcanton J, de Jong R S. AJ, 2005, 129: 1331
- [38] Seth A C, Dalcanton J, de Jong R S. AJ, 2005, 130: 1574
- [39] Mould J. AJ, 2005, 129: 698
- [40] Ibukiyama A, Arimoto N. A&A, 2002, 394: 927I
- [41] Gilmore G, Wyse R F G. ARA&A, 1989, 27: 555
- [42] Burkert A, Truran J W, Hensler G. ApJ, 1992, 391: 651
- [43] Tikhonov N A, Galazutdinova O A, Drozdovsky I O. A&A, 2005, 431: 127
- [44] Karachentsev I D, Karachentsev V E, Kudrya Y N et al. Astron. Nachr. 1993, 314: 97

- [45] Binney J, Tremaine S. *Galactic Dynamics*. Princeton: Princeton University Press, 1987: 13
- [46] Kregel M, van der Kruit P C, de Grijs R. *MNRAS*, 2002, 334: 646
- [47] van der Kruit P C, Searle L. *A&A*, 1981, 95: 105
- [48] Fall S M, Efstathiou G. *MNRAS*, 1980, 193: 189
- [49] Matteucci F, Francois P. *MNRAS*, 1989, 239: 885
- [50] Chiappini C, Matteucci F, Gratton R. *ApJ*, 1997, 477: 765
- [51] Velazquez H, White S D M. *MNRAS*, 1999, 304: 254
- [52] Chen B, Stoughton C, Smith J et al. *ApJ*, 2001, 553: 184
- [53] Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. *ApJ*, 1962, 136: 748
- [54] Kroupa P. *MNRAS*, 2002, 330: 707
- [55] Fuhrmann K. *Astron. Nachr.* 2004, 325: 3
- [56] Martin N F, Ibata R A, Bellazzini M et al. *MNRAS*, 2004, 348: 12
- [57] Navarro J F, Helmi A, Freeman K C. *ApJ*, 2004, 601: L43
- [58] Gilmore G, Wyse R F G, Norris J E. *ApJ*, 2002, 574: L39
- [59] Bland-Hawthorn J, Freeman K C. *Publ. Astron. Soc. Australia*, 2004, 21: 110
- [60] Reid N. *AJ*, 1998, 115: 204
- [61] Hammer F, Puech M, Chemin L et al. *ApJ*, 2007, 662: 322
- [62] Drozdovsky I, Aparicio A, Gallart C et al. *RevMexAA*, 2007, 29: 157

Thick disks in External Galaxies

ZHAO Jun-liang

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

Abstract: Since thick disks in S0 galaxies were originally detected in 1979, thick-disk components have been discovered in many disk galaxies, and there are more and more observational evidences that the thick disk in an external galaxy should be a component of the galaxy which is structurally, chemically and kinematically distinct from the thin disk of the galaxy. Generally speaking, for a galaxy the thick disk has its scale height significantly larger than the thin disk. Thick-disk stars are more metal-poor and older than stars in the thin disk and have both a slower rotation around the galaxy center and a larger velocity dispersion. It can be concluded from all these observational facts that thick disks are a kind of relic, which can be used to trace the formation and evolutionary history of external galaxies.

Edge-on disk galaxies have been extensively used by different authors to measure structural parameters and other observational properties of thin and thick disks. It is found from some recent studies that thick-disk scale heights are generally 2–6 times larger than thin-disk scale heights and the thick-disk scale lengths are slightly larger, which agree with what observed in the Milky Way Galaxy. The axial ratios of thick disks are normally in a range of 3:1–4:1, and those of thin disks can be over 8:1 in some galaxies.

The ages of stars in thick disk are estimated to be 5–13 Ga, and their colors are significantly redder than thin-disk stars. Thick-disk stars are metal-poor with median metallicity of $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ in some low mass galaxies and show no evidence for the strong vertical metallicity gradients. It has been found that the contribution of the thick disk to the total luminosity shows an obvious trend with mass. For high-mass galaxies ($V_c > 120 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), thick disks can contribute 10% of the total luminosity of the galaxy and for lower mass systems this value can be up to 40%. The analysis of vertical color gradients for some galaxies suggests that the color of thick disks are fairly uniform. The stellar mass of low mass galaxies are dominated by thick disk stars, its fraction being up to 50% of the total stellar mass in some cases. Unfortunately, stellar populations above the galaxies' midplanes have been studied in fewer than 10 galaxies to date.

The number of kinematic studies of thick disks in external galaxies is even more sparse than the stellar population studies. It is revealed from the two edge-on galaxies studied recently that one shows the thick disk rotates at 30%–40% of the rotation speed of the thin disk and the other shows clear evidence of counter-rotation.

From the systematic differences between the properties in structure, chemical abundance and kinematics of thick and thin disks, they are likely to have distinct formation scenarios. It has been extensively recognized that the majority of thin-disk stars formed gradually from a rotating disk of high angular momentum gas. However, the formation of the thick disk is still poorly understood and is more complex. According to the properties of thick disks, their stars could form in one of the following ways: (1) they were kinematically heated from an earlier thinner disk, which means that disks form largely through smooth gas accretion, and the thick-disk stars in a galaxy form initially in a thin disk; (2) they were formed from gas with large scale height, which suggests that disks form primarily through smooth monolithic collapse and thick-disk stars precipitate out of the collapsing gas cloud, or the thick disk forms from a disk of gas that has been energetically heated, so that they form in the thick disk itself; (3) they were directly deposited at large scale heights during the accretion of smaller satellite galaxies, which means that these stars can form entirely from merging subunits outside the present-host galaxy. It is not very easy to distinguish among the above formation scenarios of thick disks for individual galaxies, and probably thick disks of different galaxies have different formation processes, or even more than one mechanism can play their own roles in formation processes of the thick disk around a disk galaxy. While the broad outlines of thick disk formation are in place, there are many details to be worked out.

Key words: astrophysics; galaxy; thick disk; formation scenario