

银河系研究的近期进展

赵君亮 束成钢

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

银河系天文学是天文学研究的一个重要且基础的课题。它涉及到天体物理的许多领域。近年来, 由于观测资料的大量获得以及理论工作的不断发展, 银河系的研究又成为天体物理中的一个热点。本文旨在对银河系研究的近期结果作一简单回顾和评述。

一、引 言

近年来, 随着观测和理论工作的不断发展, 人们对银河系的认识大大地深入了。银河系天文学(它的前身是恒星天文学)这一古老而又新兴的学科已成为天体物理学研究的一个重要和基本的內容。对于银河系的研究, 需要具备多方面的知识。如早期宇宙的扰动以及后来的演化; 不同物理环境下恒星的形成; 原星系的流体动力学研究; 角动量的增长和转移对星系盘生长的影响; 引力势场的影响等。人们通过观测得到的有关恒星的空間三维分布、运动学以及化学成分等方面的资料, 用以研究银河系的形成和演化。本文的目的是对银河系研究的近期工作作一简单回顾和评述。其中关于银河系中心区域(银心区)的内容则将另文予以介绍。

二、银河系的形成

1. 盘状星系的形成

对星系形成的研究, 目前都是通过建立合理的数学模型并结合已知的一些观测结果来进行的; 而在星系形成阶段, 宇宙的物理状况是从观测类星体的吸收线才得到一些了解的^[1]。其根本的出发点, 都在于研究因宇宙密度扰动生成原星系云, 进而坍缩成原星系, 再经过演化形成我们今天的星系。反映盘状星系原星系的形成有两个重要的时标, 即冷却时标和自由坍缩时标^[1]。冷却时标反映了原星系能量损失的快慢程度, 自由坍缩时标反映了原星系引力坍缩的快慢程度。冷却时标与粒子的数密度、化学成分、温度和辐射机制(如自由-自由, 束缚-自由)等有关, $t_{\text{cool}} = \frac{3nkT}{n^2\Lambda(T)} \propto \frac{T}{n\Lambda(T)}$, 其中 k 是玻尔兹曼常数, n 是原星系的平均粒子数密度, $\Lambda(T)$ 是与冷却机制有关的系数, T 是温度; 而自由坍缩时标只跟粒子数密度有关, $t_{\text{fr}} \approx 2 \times 10^7 n^{1/2} \text{yr}$ 。目前的研究表明^[1-3], 所有的 Hubble 型星系都具有较短的冷却时标, 即 $t_{\text{cool}} \lesssim t_{\text{fr}}$ 。现在关于这两个重要时标的研究工作很多^[2-14]。

2. 银河系的形成

关于银河系形成的最著名的工作是由 Eggen, Lynden-Bell 和 Sandage 在 1962 年完成的, 称为 ELS 模型^[15]。该模型要求椭球子系应在原银河系快速坍缩(与轨道动力学演化时标 10^8yr 量级相比)的阶段中形成; 后期气体坍缩并形成富金属的冷盘, 而在这个盘中迄今仍有恒星形成。ELS 模型^[15]有两个基本假设: (i) 由压力维持的早期气态原星系是稳定的, 没有恒星形成; (ii) 恒星运动轨道在恒星形成后不会变圆。很显然, 若这两个基本假设有任何一个不成立, 则恒星金属丰度导出的恒星形成时间与其目前轨道之间就不可能有什么关联。

值得提及的是 Isobe^[16]同样利用 ELS 模型^[15]分析数据却得到了相反的结论: 原银河系的坍缩应该是较缓慢的而非快速的。Yoshii 和 Saio^[17]也对 ELS 模型^[15]提出了质疑。最近关于耗散不起主要作用的银河系 N 体模拟研究表明^[14, 15]: 坍缩系统的最终状态取决于气体的不均匀度和初始温度; 激烈的驰豫过程并没有停止, 这使得初始和最终时期的轨道运动能量与相应的角动量之间存在联系; 随着这一过程的发展, 物质分布的银心聚度将越来越大; 在典型情况下, 最后稳定阶段的速度分布在半光度半径内是各向同性的, 而在该半径之外则是各向异性的。如在银河系中, 椭球子系的半光度半径大约是 3 kpc, 处于太阳轨道之内, 因此太阳附近老年星的速度分布应是各向异性的, 这与观测结果基本相符。当然, 关于 ELS 模型^[15]本身存在着很多争论, 如时间尺度问题、金属丰度梯度问题、恒星运动轨道问题等等^[130-134]。Sandage^[130]在 1990 年特别撰文对 ELS 模型^[15]进行了重新评价并回答了批评意见, 他认为 ELS 模型^[15]目前仍然是关于银河系形成的最佳模型。

3. 银河系的化学演化

为了认识原星系的恒星形成率和动力学演化, 需要一个时间度量标准。它应不依赖于椭球子系并且可以十分有效地帮助我们了解银河系的动力学演化时标。这个标准是由银河系的化学成分提供的, 银河系中的大部分重元素是由恒星演化产生的, 因此恒星化学丰度亦即银河系化学丰度的变化就能很好地说明整个银河系化学演化的历史。我们知道, 有一些元素(主要是氧)是由超大质量恒星产生的, 而一般大质量恒星在超新星爆发阶段则将产生另一些元素(主要是铁)。所以, 由不同质量恒星的演化可以估计银河系形成的时间尺度范围, 氧和铁的不同丰度则提供了关于原银河系中恒星形成率的可靠信息。

目前已对足够多的恒星取得了氧和铁元素的丰度资料。Wheeler 等^[20]对此已作了详细的总结。目前的主要结果是: 代表 $[\text{O}/\text{Fe}]$ 和 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 之间关系的曲线中, 斜率与 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 有明显的相关性; 当 $-2.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$ 时, $[\text{O}/\text{Fe}]$ 基本保持不变; 当 $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -1$ 时, $[\text{O}/\text{Fe}] \sim -\frac{1}{2}[\text{Fe}/\text{H}]$, 而金属丰度又与运动学有关。对这个结论的解释也是很显然

的, 主要是因为氧元素的产生比铁元素的产生将更受恒星质量的限制, 并且随着银河系的演化, 年轻恒星在形成时本身就比较老年恒星含更多的重元素^[21]。如本文下面所述, 这方面的研究很活跃^[22-32]。由于氧只能在 II 型超新星($M \geq 20 M_{\odot}$)中产生, 而铁则主要在 I 型超新星($M \geq 3 M_{\odot}$)中产生, 因此超大质量恒星的主序寿命提供了氧丰度增长的时间尺度; 而 I 型超新星的主序寿命提供了铁元素丰度增长的时间尺度。当然, 研究银河系的化学演化仅仅依赖 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和 $[\text{O}/\text{Fe}]$ 是不够的, 对其他元素, 如镁、硅、钙等的研究亦是十分必要的。

通过建立合理的模型, 结合多种元素的化学丰度, 就能对银河系的化学演化有一个深刻的了解。如目前通常认为由 I 型超新星合成铁的合理时间尺度为 $\lesssim 10^9 \text{yr}$ ^[22,23]。这个结论对银河系中极端星族 II 天体快速形成的观点给出了最强有力的证据, 并与下文将谈到的流行的运动学证据一致^[22-32]。

三、银河系的空间结构

古老的恒星统计计数方法仍然是研究高银纬区银河系结构的几个有效方法之一, 在“Stars and Stellar Systems”^[33] 一书的第五卷中, 对银河系的空间结构研究作了很好的总结。这方面的研究直到 70 年代经 King 等人^[34]的工作才有很大的发展。1979 年 Van den Bergh^[35] 用计算机做了数值模拟, 使得这方面的研究工作热点重新开始, 并持续至今^[36-39]。

1. 恒星统计计数分析

进行恒星统计计数研究的理论方法是解恒星统计积分方程

$$N(m) = \int \psi(M_v, \mathbf{x}) D(M_v, \mathbf{x}) d^3x \quad (1)$$

式中 $N(m)$ 是给定星等 m 的恒星数, 光度函数 $\psi(M_v, \mathbf{x})$ 是位置以及绝对星等的函数, $D(M_v, \mathbf{x})$ 是恒星空间密度分布函数, d^3x 是体积元。由于已知条件太少, 很少有人去直接应用这个方程, Frumpler 和 Weaver^[40] 对此作了详细的讨论。由于光度函数涉及的星等范围一般很宽, 很难找到 $D(M_v, \mathbf{x})$ 和 $\psi(M_v, \mathbf{x})$ 的解, 通常借助于加入光谱型和色指数的观测资料对其进行限制而使情况得以改善。这里基本的问题在于恒星光度函数和密度函数本身是许多参量的函数, 诸如化学丰度, 年龄、光谱型等, 而我们又对这些参量了解甚少。虽然目前已尽力把一些已知的天体物理参量考虑进去, 但 ψ 和 D 这两个函数在数学上仍然允许有很大的变化范围。

目前常用的方法是承认经验函数, 并用以对大量的参数进行拟合, 然后再把这些函数与观测进行比较。也有少数人采用别的方法, 如 Bobin 和 Crézé^[41,42], 他们从银河系演化模型来导出参数间的相互关系。由于这些经验函数是从旋涡星系的测光观测、太阳附近的恒星 Gliese 表以及一些研究得非常详细的球状星团、疏散星团中得到的, 大多数研究人员在没有太多选择余地的基础上, 只能接受一些相同形式的函数, 则他们得到的结果很相似也就不会令人奇怪了。Vander Bergh 等人^[35,41-57] 在这一方面做了许多工作。

过去一般认为, 旋涡星系的面亮度分布可用一个较平的指数盘加上一个 $r^{1/4}$ 的光滑圆球来描述。但是近期的测光资料表明, 这种描述方法并不恰当^[58,59]。例如, 对同银河系很相似的 NGC891 的观测表明, 其亮度分布没有任何迹象表现为 $r^{1/4}$ 分布^[59]。最近, 在运动学和分光观测上关于厚盘的大量工作引起人们很大的兴趣^[56,60]。虽然对厚盘的真实性的目前仍存在分歧^[55], 但是这方面的工作仍取得了很大进展^[45,46,49]。另外, 运动学(特别是自行和视向速度)资料以及分光观测资料对银河系参量的选择提供了很大帮助^[49,61-63]。

CCD、PDS、COSMOS、APM 等设备和仪器的应用, 使恒星统计学得到了很快的发展。关于恒星统计计数的样本, 已在足够大的天区取得精度很高的观测资料^[64]。目前最成

功的恒星统计计数工作是 Basel Halo 计划。这项宏大的工作已进行了 28 年, 已提供了 15 个天区的三色星等资料。Fenkart^[65,66]对此作了总结和分析。值得强调的是, 由 Gilmore 和 Wyse^[26]导出的厚盘密度分布与 Basel Halo 计划中许多高银纬的观测数据相符^[65,66]。这给出了厚盘具有椭球子系性质的第一个证据^[25,49]。另一个独立的证据是由 Mc Neil^[67]给出的。虽然目前厚盘模型与恒星计数、化学丰度、分光观测以及运动学资料相符^[37], 但是几乎所有高精度的观测数据都是在离太阳几十到几百 pc 范围内得到的, 显然将由此得出的描述厚盘参数外推到离银道面几个 kpc 处当然是不充分的^[54,65,66]。目前的研究认为, 银河系内恒星在垂直银道面上的密度分布一般可用双指数形式来描述^[56,68,69]:

$$\frac{\nu_0(z)}{\nu_0(0)} = 0.959e^{-z/240} + 0.041e^{-z/1000} \quad (2)$$

其中 $\nu_0(z)$ 是银面距为 z (以 pc 为单位) 处的恒星密度。

2. 银河系的总体结构图像

银河系在总体上像一个铁饼, 其中心是突起的金属丰度高的核球。从表面亮度的观测可推得该核球的有效半径大约为 2.7kpc, 这与核球区球状星团系统的整体典型尺度相近^[70]。但是从 IRAS 的 12 μ m 红外观测却发现该核球半径约为 0.7kpc, 这比从光学波段得到的结果要小得多^[71]。通常认为核球半径大约为 1kpc, 核球内部即所谓的银心区, 是一个十分活跃的研究领域。我们将另文予以介绍。

在银河系铁饼状的对称面上, 聚集着大量的恒星、星团、星协 and 星际气体, 这就是银盘。银盘的大小半径约为 15—20kpc, 而厚度却只有几个 kpc, 太阳就处在银道面附近偏北的银盘内, 离银心的距离目前研究表明为 $\lesssim 8.0$ kpc^[72,73], IAU 大会建议太阳的银心距取为 8.5kpc。银盘里集中了大约 80% 的银河系总质量 (不计银冕), 且气体非常丰富, 不断有新的恒星形成; 另外, 银盘中也观测到了旋涡星系所特有的结构特征——旋臂, 即英仙臂、人马臂、猎户臂以及 3kpc 臂^[74]。对银河系旋臂的研究, 我国天文学家也进行了很好的工作。如李宗伟等^[140]所作的银河系超新星遗迹与旋臂相关的统计研究; 向德琳^[141]所作的关于二维银河系旋臂对比度的工作。另外, 银河系是否是某种棒旋星系的研究也十分令人感兴趣。如 Gerhard 和 Vietri^[142]、Mulder 和 Liem^[143]认为银河系不是棒旋星系; Blitz 和 Spiegel^[144]以及 Weinberg^[145]的研究则认为银河系应属于棒旋星系; 而且在 1991 年 Binney 等^[146]建立的银心中央具有旋转棒的动力学模型亦解决了许多困难的问题。看来, 目前对这个问题不可能给出肯定的答案。

在银盘外边的空旷区域是银晕, 尺度大约是 20 多 kpc, 其中主要是椭球子系恒星, 如球状星团。在银晕中, 气体相当稀少, 不太会有新的恒星形成。银晕的质量估计不到银盘质量的 10%。关于椭球子系的空间形态, 将在下一小节中予以讨论。在银晕外, 可能还存在着一个范围更大 (半径可达 60kpc 以上) 的银冕。目前认为^[74], 银冕中的物质主要是宇宙线和磁场以及一些温度很高的气体 ($T \geq 10^6$ K), 质量估计可达 $6 \times 10^{11} M_{\odot}$ 。关于银冕是否存在的问题, 现在仍有不同的意见^[37,64]。目前关于银河系结构研究的热点是关于厚盘的研究, 本文下面也将专门进行评述。

3. 贫金属椭球子系的空间形状

作为恒星统计计数分析的一个例子, 讨论贫金属椭球子系的空间形状, 特别是太阳附近高速运动的亚矮星次系, 有很重要的天体物理意义。因为非薄盘恒星的空间分布反映了早期银河系坍缩和恒星形成的情况、高速星的运动学状况以及暗物质的分布情况等。

在太阳附近高速运动的贫金属星具有不对称的速度弥散度, 其比值为 $\sigma_{rr}:\sigma_{\theta\theta}:\sigma_{zz}\sim 2:1:1$ ^[76,76]。由于速度弥散度与恒星动力学方程中的“力”相当, 因此可以预期高速运动的贫金属次系应呈扁的椭球分布。目前许多理论研究都认为这个观点是可靠的^[77-80]。关于椭球子系空间分布形状研究最成功的应是 Bahcall 和 Soneira (简称 BS) 模型^[43-45]。这一模型是从对 Koo 和 Kron^[81]的暗星统计计数结果分析得到的。BS 的结论是贫金属椭球子系空间分布的轴比为 $c/a=0.80\pm 0.20$ ^[43-45]。Wyse 和 Gilmore^[82,83]对这个问题又做了进一步的研究, 他们把 BC 模型考虑得更合理, 更全面。

对椭球子系形状的研究还可以利用天琴 RR 型变星的计数来进行^[76,84-87], 早期的工作是由 Kinman 等人^[86]完成的。现在的研究表明^[84]: 银心距越小的天琴 RR 型变星分布越扁, 轴比 $c/a\lesssim 0.6$, 与恒星统计计数相符。更进一步的研究发现^[84]: C 型 (光变幅度较小) 和小 Δs (富金属) 的天琴 RR 型变星与贫金属天琴 RR 型变星在运动学上有很大不同, 它们是由两种成分组成的系统, 但目前这类恒星的资料还不够。Hartwick^[87]的研究也指出: 贫金属天琴 RR 型变星的空间分布轴比是银心距的函数, 在离银心很远处, 分布近似成球形; 他认为贫金属天琴 RR 型变星本身也可能是一个双成份系统。对球状星团的空间分布研究表明, 球状星团也存在这种双成分的特性^[76,85,88]。

总之, 对银河系中极端星族 II 的贫金属恒星分布研究表明, 这些恒星形成一个独特的非球状系统, 其扁度会随银心距而变化, 在太阳附近几个 kpc 内, 轴比 $c/a\sim 0.5$ 。

四、老年恒星的运动学和化学性质

银河系中恒星运动学性质取决于引力场与恒星的空间分布, 恒星化学丰度则由形成恒星的星际介质所决定。因此, 老年恒星的运动学和化学研究, 对于了解银河系形成的物理过程、原银河系中的气体状况、恒星动力学史和银河系引力势场十分重要。

1. 恒星动力学

任何无碰撞的动力学系统, 如恒星系统, 其性质是由无碰撞的玻尔兹曼方程决定的:

$$\frac{df}{dt} \equiv \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \cdot \frac{\partial f}{\partial v} = \frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial f}{\partial x} - \nabla\Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial v} = 0 \quad (3)$$

其中 f 是相空间中点 (x, v) 处的密度。由于系统是无碰撞的, 则可用引力势场的梯度 $\nabla\Phi$ 来代替加速度。一般认为系统是稳态的, 则有 $\frac{\partial f}{\partial t} = 0$ 。对整个速度空间积分, 就可得到著名的

Jean's 方程:

$$vkz = -\frac{\partial}{\partial z}(v\sigma_{zz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv\sigma_{rz}) \quad (4)$$

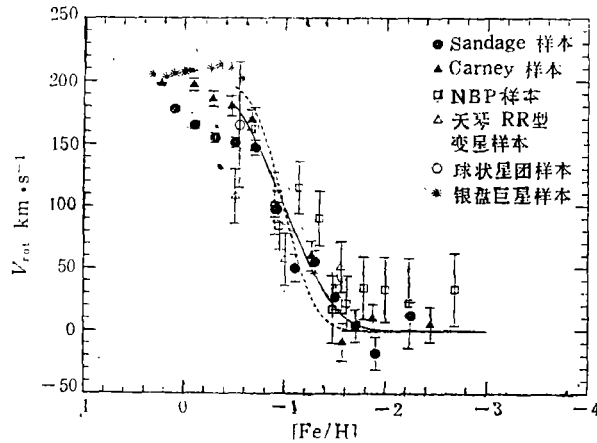


图 1 恒星转动速度和金属丰度间的关系。实线表示两者之间在 $-1.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.5$ 有光滑的关系, 点线表示该关系在 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$ 有一个不连续性

$$vkr = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv\sigma_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z} (v\sigma_{zz}) - \frac{v\sigma_{\phi\phi}}{r} - \frac{v}{r} \langle r\phi \rangle^2 \quad (5)$$

其中 $v(r, z)$ 是恒星空间密度, σ_{ij} 是恒星速度弥散度, $\langle r\phi \rangle$ 是恒星绕银心的平均转动速度, kz 、 kr 是引力在 r 、 z 方向上的分量。关于 Jean's 方程的具体应用, 可参阅文献^[75,76,89-93]。引入 v_c 为银河系自转在太阳附近的速度, 从银河系较平的自转曲线上可以确定 $v_c = 220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。定义 $v_a \equiv v_c - \langle v_\phi \rangle$, 通常称之为样本的非对称流。正是由于引进了非对称流 v_a , 人们可以方便地将局部恒星分布的可观测量与银河系的整体性质联系起来。

2. 非对称流

银河系中老年恒星普遍都存在非对称流现象, 关于这方面的工作也开展得很多^[11,80,82-85]。总的结论是: 这些老年恒星是在低耗散的气体之中生成的, 因此它们保留了银河系中恒星形成和耗散过程的历史; 而且这些恒星在银河系坍缩期间, 转动速度没有大的变化, 这正好反映了椭球子系在形成期间角动量的损失。这个结论与 Zreck 等^[11]的 N 体模拟结果一致。虽然目前关于非对称流的讨论对在银河系坍缩时期恒星的连续生成提供了强有力的证据, 但是关于坍缩的性质则没有明确的结论。

3. 运动学和化学性质间的联系

(1) 转动速度和金属丰度间的关系: 银河系转动速度和恒星化学丰度间的关系最早是由 ELS^[15]建立并讨论的。但是近几年来, 随着贫金属星新观测资料的取得, 对这种关系在 $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -1$ 情况下能否成立的问题出现了很大的争论^[80,84,86]。

图 1 给出了最近获得的观测数据。一般认为平均转动速度在 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.8$ 处为 $160 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 到 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ 处减小到 0; 对于更低的金属丰度, 两者关系似乎不明显。另外, 对 $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -0.8$ 则有不同的看法。Sandage 和 Fouts^[60]认为转动速度和金属丰度间变化关系是光滑的; 而 Norris 等人^[94,96]的工作则认为这个关系在 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.8$ 处出现一个不连续点。在这个问题上现在还没有明确一致的结论。

(2) 轨道偏心率和金属丰度间的关系: 恒星运动学和金属丰度间关系的另一个表现是恒

星运动轨道在银道面上投影的偏心率和金属丰度间的关系,即一般认为金属丰度越低,该偏心率就越大^[17,56,60,93-98],这个关系现在已被 Sandage^[56]作为 ELS^[15]模型支持银河系快速坍缩的主要证据。但是有 20%的贫金属星并不遵循这一关系,即金属丰度低而其投影偏心率却不大又被引为支持银河系慢坍缩的证据^[17,96]。这种矛盾就促使人们去进行更深一层的研 究^[97]。目前总的认识是,如果贫金属恒星在轨道偏心率和金属丰度之间存在某种关系,那就意味着银河系是快速坍缩的;反之,银河系形成是经历了一种缓慢、耗散的坍缩过程。

4. 年龄和金属丰度间的关系

恒星化学丰度的变化与其年龄有着密切的关系。一般说来,恒星金属丰度越低,年龄越大;反之,则年龄越轻。因此,可以建立适当的年龄—丰度关系来研究银河系中恒星的年龄^[64,98-105],如球状星团年龄的测定便是在假设成员星具有相同年龄的条件下,通过化学丰度的测量得到的^[89]。虽然对年龄—金属丰度关系在某些细节方面有不同的看法,但总的认识是一致的。如 Sandage^[130]认为在银河系中该关系是一个与位置强相关的关系;Rana 和 Basu^[135]认为该关系曲线是很光滑的;Strobel^[136]则认为该关系对不同的银河系成分,如贫金属球状星团、富金属球状星团、疏散星团、薄盘等有不同的表示,尤其是当银面距 $z < 200\text{pc}$ 时,该关系显著,而当 $z > 300\text{pc}$ 时,该关系就不十分明显了。现在的一般看法是:^[89-104,130,135,136]在银河系中金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -0.8$ 的恒星与球状星团具有相同的年龄,大约为 $1.5 \times 10^{10}\text{yr}$; $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.8$ 的恒星年龄一般为 $1.2 \times 10^{10}\text{yr}$,而 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.5$ 的恒星年龄仅为几十亿年。

五、厚 盘

过去人们认为银河系中仅仅存在一个盘,即银盘,也称为薄盘。近些年的研究表明,在银盘附近的老年恒星其性质亦构成一个盘状分布,而这个盘比银盘的厚度要大得多,因此称这个盘为厚盘。关于厚盘的研究非常活跃^[25,37,79,80,83,85,106-122]

目前关于厚盘的主要认识是^[106-122]:在太阳附近垂直于银道面的标高为 $1-1.5\text{kpc}$,该方向上的平均速度弥散度 $\sim 45\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,典型的恒星金属丰度是太阳金属丰度的 $1/4$,平均非对称流为 $30-50\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。关于厚盘可能的形成机制有:

- (i) 在一种缓慢的、具有压力支持的坍缩过程中,厚盘随着星族 II 恒星的出现而形成。
- (ii) 由于吸积或银河系势场的剧烈驰豫,从而引起早期生成的薄盘获得强烈的动力学加热,进而形成厚盘^[106]。
- (iii) 厚盘物质的直接吸积^[107]。
- (iv) 薄盘中高速运动的恒星扩散到外部轨道而形成厚盘^[107]。
- (v) 由于在金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -1$ 时冷却加快,从而能量耗散加上恒星形成产生了厚盘^[83]。

这几个模型的区别在于年龄、金属丰度和运动学。第一种模型所得到的是具有丰度梯度的中等年龄系统;第二种模型预期盘内恒星的年龄有不大的变化范围,但似乎没有丰度梯度;第三种模型所产生的盘其年龄和丰度有较大的变化范围;第四种模型产生的盘将会有一

个年龄范围, 具有与薄盘相同的化学丰度, 但是从薄盘到厚盘, 恒星的圆运动速度呈现不连续变化; 最后一个模型预言贫金属椭圆星系将必然产生一个厚盘。除了第一种模型外, 其余的都是先有薄盘, 然后才有厚盘。众说纷云, 至今无任何一种模型能稍占优势, 甚至还有人对厚盘是否真实存在表示怀疑^[10], 但目前大部分人都承认厚盘存在的事实了。

1. 金属丰度

如前所述, 恒星系统的化学丰度包含了许多关于早期整体演化的信息。一般认为, 离银道面 2kpc 距离是研究厚盘性质最合适的地方^[108,109]。研究表明^[25,109]: 厚盘恒星金属丰度平均值为 $\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle = -0.6$, 弥散度为 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} = 0.3$ 。这个结论已被 Yoss 等^[110]所证实。

2. 运动学性质

对厚盘的运动学研究表明, 其速度弥散度之比为 $\sigma_{r\gamma} : \sigma_{\phi\phi} : \sigma_{zz} = 131 \pm 7 : 102 \pm 8 : 89 \pm 5$ ^[60,109-112]。其中垂直于银道面方向速度弥散度 $\sigma_{zz} \sim 45\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 非对称流为 $30-50\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。作为比较, 亚矮次系的非对称流为 $180-220\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[76]。不仅如此, 亚矮次系和厚盘之间在金属丰度和运动速度上也存在明显差异。同样地, 在比较厚盘和薄盘运动学性质时, 也提出了同样的问题^[58,79,80,114]。至今这仍然无法加以解释。

3. 厚盘的年龄

厚盘年龄的确定是一个非常困难的工作。主要原因在于目前没有好的方法来确定厚盘的样本。金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -0.7$ 的老年厚盘恒星年龄可与球状星团年龄相比, 达到 $1.4 \times 10^{10}\text{yr}$ ^[121]。由于厚盘中大多数恒星有 $-1 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.8$, 因此可以认为大多数厚盘恒星是年龄较老的。前些年, 人们在考虑各种因素的影响后得出的结论是^[105,122]: 厚盘年龄比球状星团年龄要小几十亿年, 估计为 $0.8-1.1 \times 10^{10}\text{yr}$ 。最近的研究却又表明, 厚盘的年龄应该为 $1.4 \times 10^{10}\text{yr}$, 即与球状星团一样老^[133,137,138]。在目前的情况下, 对厚盘年龄不可能给出较精确的结果, 只能给出一个大致的范围。

六、银河系的物质分布

1. 银河系的总质量

银河系整体质量的研究是银河系天文学的一个基本问题。历史上, 许多人用不同的方法得到了他们各自的结论。如 Kapteyn (1922 年) 的结果是 $M_G = (0.6-1.0) \times 10^{11} M_\odot$; Lindblad (1926 年) 的结论是 $1.8 \times 10^{11} M_\odot$; Oort 则认为银河系质量至少为 $8 \times 10^{10} M_\odot$ 等等。银河系整体质量的正确估计离不开太阳银心距和 Oort 常数的准确确定。过去这两个常数的确定都带有很大的误差, 因此结果相差也就很大。现在由于各种高精度仪器的使用、理论模型更加合理, 这方面的研究也就大大提高了精确度。Fich^[123] 在 1991 年对银河系质量的研究作了详细的回顾, 但是他没有给出具体的估值, 因为用不同的方法得到的结果将是相差很大的。如 Kulessa 和 Lynden-Bell^[139] 用不同模型得出的结果 (不计银冕) 是处于 $0.9-2.0 \times 10^{12} M_\odot$ 之间。

一般认为, 若不考虑银冕, 银河系的总质量大约为 $4 \times 10^{11} M_\odot$; 若考虑银冕, 则总质量可达 $(3-6) \times 10^{12} M_\odot$ ^[123]。

2. 银河系的物质分布

银河系的物质主要分布在银核、银盘、银晕和银冕中。银核中的物质有恒星、星团、气体和磁场等,详细情况可参阅“银心区研究近期进展”一文^[124]。在银晕中,主要是球状星团,还有少量的气体,质量大约为 $10^{10}M_{\odot}$ ^[74];关于银冕,目前对其是否存在仍有不同看法。一般估计,若银冕存在,则其质量可为 $10^{12}M_{\odot}$ 量级;银盘中的物质,我们将在下节讨论。

3. 银盘中的物质分布

研究银盘中物质分布有两个基本参数,即本地体密度 ρ_0 和本地柱密度 $\Sigma(\infty)$ 。这两个特征量是人们进行有关银河系研究的基本参数,如化学演化,恒星形成的物理状况,暗物质等。为了纪念早期 Oort 测量 ρ_0 的意图,一般称 ρ_0 为 Oort 极限。 ρ_0 值的取得十分困难,需将太阳附近已观测到的各种物质形态的质量相加,一般说来,误差很大。由目前已确认的物质得到的 Oort 极限 $\rho_0 \sim 0.1M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$ ^[125], $\Sigma(\infty) \sim 55-80M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-2}$ ^[126]。确定 ρ_0 和 $\Sigma(\infty)$ 需要相同的观测资料,但分析的方法却有所不同。

确定银盘中物质分布要求解出无碰撞的玻尔兹曼方程(3),但人们往往应用它在垂直于银盘面 z 方向上的变形形式,即垂直于银道面的 z 方向上的 Jean's 方程(5)。该方程在一般情况下是无解析解的。如何应用该方程来解决实际问题,可参阅文献^[80]。1934年 Bahcall^[126-128] 发展了确定 Oort 极限的方法。他发现^[126-128]: (i) 由太阳附近已认证的恒星和气体得出 $\rho_0 \sim 0.1M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$, 相应的引力场与由其他方法导出的引力场不符; (ii) 按照观测标高,另外需要存在 $0.06-0.14M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$ 的未被认证的物质,而这些物质又不属于球状银晕。他的这个结论意味着太阳附近应有暗物质存在。许多人在这方面作了研究^[69,90,107,128],特别是 Kuijken 和 Gilmore^[69,90] 在考虑了 Bahcall^[126-128] 方法的不足之处后,对研究方法作了改进。他们的结果是 $\rho_0 = 0.1M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$, 太阳附近没有暗物质存在。这主要是由于他们合理地建立了一种与银盘结构更为相符的恒星速度分布模型,并正确地估计了误差这一重要因素在确定 Oort 极限中的影响。现在看来,太阳附近,以至整个银道面附近,应没有暗物质的存在。

七、结 束 语

虽然目前对银河系天文学的研究已取得了很大进展,但是在观测和理论分析上仍有许多工作有待人们去研究。如作为研究银河系形成的基础模型 ELS 模型^[15]有两个基本的假设,而这两个基本假设在许多方面得出的结论,似乎都存在问题(恒星形成机制、恒星轨道等),因此有必要对这方面的工作作深入的研究;还有在恒星统计计数、厚盘的形成机制、恒星轨道偏心率和化学丰度之间的关系、Oort 极限的确定等方面,都还要求人们去做深入的工作。由此看来,银河系天文学将仍然是天体物理研究中的一个热点。

参 考 文 献

- [1] Gilmore, G. and Wyse, R. F. G., *Annu. Rev. Astron. & Astrophys.*, 27 (1989), 555.
- [2] Blumenthal, G. R., Faber, S. M. and Primack, J. R. et al., *Nature.*, 311 (1984), 517.
- [3] Silk, J., *Nature.*, 301 (1983), 574.
- [4] Rees, M. J. and Ostriker, J. P., *M. N. R. A. S.*, 179 (1977), 541.

- [5] Binney, J., *Ap. J.*, 215 (1977), 483.
- [6] Silk, J., *Ap. J.*, 211 (1977), 638.
- [7] White, S. D. M. and Rees, M. J., *M. N. R. A. S.*, 183 (1978), 341.
- [8] Fall, S. M. and Efstathiou, G., *M. N. R. A. S.*, 193 (1980), 189.
- [9] Bothun, G. D., Impey, C. D. and Malin, D. et al., *A. J.*, 94 (1987), 23.
- [10] Larson, R. B., *M. N. R. A. S.*, 176 (1976), 31.
- [11] Zreck, W. H., Quinn, P. J. and Salmon, J. R., *Ap. J.*, 330 (1988), 519.
- [12] Frenk, C. S., White, S. D. M. and Davis, M. et al., *Ap. J.*, 327 (1988), 507.
- [13] Gunn, J. E. in *Astrophysical Cosmology*, ed. by H. A. Bruck, G. V. Coyne and Longair, M. S., p. 233. (1982).
- [14] Gunn, J. E. and Gott, J. R., *Ap. J.*, 176 (1972), 1.
- [15] Eggen, O. J., Lynden-Bell, D. and Sandage, A., *Ap. J.*, 136 (1962), 748.
- [16] Isobe, S., *Astron. Astrophys.*, 36 (1974), 333.
- [17] Soshii, Y. and Saio, H., *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 31 (1979), 339.
- [18] Way, A. and Van Albada, T. J., *M. N. R. A. S.*, 209 (1984), 15.
- [19] Mc Glynn, T., *Ap. J.*, 281 (1984), 13.
- [20] Wheeler, T. C., Sneden, C. and Truran, J. W. Jr., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 27 (1989), 279.
- [21] Woosley, S. E. and Weaver, T. A., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 24 (1986), 205.
- [22] Tinsley, B. M., *Ap. J.*, 229 (1979), 1046.
- [23] Matteucci, F. and Greggio, L., *Astron. Astrophys.*, 154 (1986), 279.
- [24] Gilroy, K. K., Senden, C. and Pilachowski, C. et al., *Ap. J.*, 327 (1988), 298.
- [25] Gilmore, G. and Wyse, R. F. G., *A. J.*, 90 (1985), 2015.
- [26] Rocca-Volmerange, B. and Sehaefler, R., *Astron. Astrophys.*, 233 (1990), 427.
- [27] Abia, C., Canal, R. and Isern, J., *Ap. J.*, 366 (1991), 198.
- [28] Laird, J. B., Rupen, M. P. et al., *A. J.*, 96 (1988), 1908.
- [29] Rana, N. C., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 29 (1991), 129.
- [30] Bazan, G. and Mathews, G. J., *Ap. J.*, 354 (1990), 644.
- [31] Franco, G. A. P., *Astron. Astrophys.*, 227 (1990), 499.
- [32] Francois, P., Vangioni-Flam, E. and Audouze, J., *Ap. J.*, 361 (1990), 487.
- [33] Blaauw, A. and Schmidt, M. (eds), *Galactic Structure (Stars and Stellar Systems, Vol. 5)*, (1965).
- [34] King, I. R., in *Stellar Populations*, ed. by C. Norman, A. Renzini and M. Tosi, p. 238, (1986).
- [35] van den Bergh, S., in *Scientific Research With Space Telescope. NASA. CP-2111*, ed. by M. S. Longair, J. W. Warner, p. 151, (1979).
- [36] Bahcall, J. N., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 24 (1986), 577.
- [37] Freeman, K. C., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 25 (1987), 603.
- [38] Majewski, S. R., *Ap. J. Suppl.*, 78 (1992), 87.
- [39] Feast, M. W., Whitelock, P. A. and Carter, B. S., *M. N. R. A. S.*, 247 (1990), 227.
- [40] Trumpler, R. J. and Weaver, H. F., *Statistical Astronomy*, (1953).
- [41] Robin, A. and Creze, M., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 64 (1986), 53.
- [42] Robin, A. and Creze, M., *Astron. Astrophys.* 157 (1986), 71
- [43] Bahcall, J. N. and Soneira, R. M., *Ap. J. Suppl.*, 44 (1980), 73.
- [44] Bahcall, J. N. and Soneira, R. M., *Ap. J. Suppl.*, 47 (1981), 357.
- [45] Bahcall, J. N. and Soneira, R. M., *Ap. J. Suppl.*, 55 (1984), 67.
- [46] Bahcall, J. N. et al., *Ap. J.*, 299 (1985), 616.
- [47] Gilmore, G., *M. N. R. A. S.*, 195 (1981), 183.
- [48] Gilmore, G., *M. N. R. A. S.*, 207 (1984), 223.
- [49] Gilmore, G., and Reid, I. N., *M. N. R. A. S.*, 202 (1983), 1025.
- [50] Gilmore, G., Reid, I. N. and Hewett, P. C., *M. N. R. A. S.*, 213 (1985), 257.
- [51] Pritchett, C., *A. J.*, 88 (1983), 1476.
- [52] Buser, R. and Kaeser, U., *Astron. Astrophys.*, 145 (1985), 1.
- [53] Friel, E. D. and Worth, K. W. C., *A. J.*, 91 (1986), 293.
- [54] Yoshii, Y., Ishida, K. and Stobie, R. S., *A. J.*, 93 (1987), 323.
- [55] del Rio, G. and Fenkart, R., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 68 (1987), 397.
- [56] Sandage, A., *A. J.*, 93 (1987), 610.
- [57] Rodgers, A. and Harding, P., *A. J.*, 97 (1989), 1036.

- [58] Schomber, J. M. and Bothun, G., *A. J.*, 93 (1987), 60.
[59] Shaw, M. and Gilmore, G., *M. N. R. A. S.*, 237 (1989), 903.
[60] Sandage, A. and Fouts, G., *A. J.*, 92 (1987), 74.
[61] Carney, B., Latham, D. W. and Laird, J. B., *A. J.*, 97 (1989), 423.
[62] Ratnatunga, K. U., Bahcall, J. N. and Casertaro, S., *Ap. J.*, 339 (1989), 106.
[63] Klemola, A. R., Jones, B. F. and Hanson, R. B., *A. J.*, 94 (1987), 501.
[64] Gilmore, G., and Wyse, R. F. G. in *The Galaxy*, ed. by G. Gilmore, E. Carswell, p. 247, (1987).
[65] Fenkart, R. P., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 80 (1989), 89.
[66] Fenkart, R. P., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 81 (1989), 187.
[67] Mc Neil, R. C., *A. J.*, 92 (1986), 335.
[68] Evans, D. W., *M. N. R. A. S.*, 227 (1987), 13.
[69] Kuijken, K. and Gilmore, G., *M. N. R. A. S.*, 239 (1989), 571.
[70] de Vaucouleurs and Pence, W., *A. J.*, 83 (1978), 1163.
[71] Blanco, V. and Blanco, B., *Astrophys. Space. Sci.*, 118 (1986), 365.
[72] Glass, I. S. and Feast, M. W., *M. N. R. A. S.*, 198 (1982), 199.
[73] Reid, M. J., in *IAU. Symp.*, No. 136, p.37. (1989).
[74] 容建湘, 恒星天文学, 1986, 高等教育出版社.
[75] Carney, B. and Latham, D. W., *A. J.*, 91 (1986), 60.
[76] Norris, J., *Ap. J. Suppl.*, 61 (1986), 667.
[77] Binney, J. and May, A., *M. N. R. A. S.*, 218 (1986), 743.
[78] White, S. D. M., *M. N. R. A. S.*, 237 (1989), 41.
[79] Ratnatunga, K. U. and Freeman, K. C., *Ap. J.*, 291 (1985), 260.
[80] Ratnatunga, K. U. and Freeman, K. C., *Ap. J.*, 339 (1989), 126.
[81] Koo, D. C. and Kron, R. G., *Astron. Astrophys.*, 105 (1982), 107.
[82] Wyse, R. F. G. and Gilmore, G., *A. J.*, 91 (1986), 855.
[83] Wyse, R. F. G. and Gilmore, G., *A. J.*, 95 (1988), 1404.
[84] Strugnell, P., Reid, I. N. and Murray, C. A., *M. N. R. A. S.*, 220 (1986), 413.
[85] Zinn, R., *Ap. J.*, 293 (1985), 424.
[86] Kinman, T. D., Wirtanen, C. A. and Janes, K. A., *Ap. J. Suppl.*, 13 (1966), 379.
[87] Hartwick, F. D. in *The Galaxy*, ed. by G. Gilmore and B. Carswell, p. 281, (1987).
[88] Frenk, C. S. and White, S. D. M., *M. N. R. A. S.*, 193 (1980), 295.
[89] Van der Kruit and Searle, L., *Astron. Astrophys.*, 110 (1982), 61.
[90] Kuijken, K. and Gilmore, G., *M. N. R. A. S.*, 239 (1989), 605.
[91] Fich, M., Blitz, L. and Stark, A. A., *Ap. J.*, 342 (1989), 272.
[92] Armandroff, T., *A. J.*, 97 (1989), 375.
[93] Norris, J. and Ryan, S. G., *Ap. J. Lett.*, 336 (1989), L17.
[94] Norris, J. and Ryan, S. G., *Ap. J.*, 340 (1989), 739.
[95] Allen, C., Schuster, W. J. and Poreda, A., *Astron. Astrophys.*, 244 (1991), 280.
[96] Norris, J., Bessell, M. S. and Pickles, A. J., *Ap. J. Suppl.*, 58 (1986), 466.
[97] Scarle, L. and Zinn, R., *Ap. J.*, 225 (1978), 357.
[98] Laird, J. B., Rupen, M. P. and Latham, D. W., *A. J.*, 95 (1988), 1843.
[99] Stetson, P. B. and Harris, W. E., *A. J.*, 96 (1988), 909.
[100] Schuster, W., Nissen, P., *Astron. Astrophys.*, 222 (1989), 69.
[101] Twarog, B. A., *Ap. J.*, 242 (1980), 242.
[102] Carlberg, R. G., Dawson, P. and Hsu, T., et al., *Ap. J.*, 294 (1985), 674.
[103] Knude, J., Schnelder, N. H. and Winther, M., *Astron. Astrophys.*, 179 (1987), 115.
[104] Norris, J. and Green, E. M., *Ap. J.*, 337 (1989), 272.
[105] Vanden Berg, D. A. and Bell, R. A., *Ap. J. Suppl.*, 58 (1985), 711.
[106] Jones, B. J. T. and Wyse, R. F. G., *Astron. Astrophys.*, 120 (1983), 165.
[107] Statler, T. S., *Ap. J.* 331 (1988), 71.
[108] Sandage, A., *A. J.*, 86 (1981), 1643.
[109] Hartkoft, W. I. and Yoss, K. M., *A. J.*, 87 (1982), 1670.
[110] Friel, E. D., *A. J.*, 93 (1987), 1388.
[111] Friel, E. D., *A. J.*, 95 (1988), 1727.
[112] Eggen, D. J., *Ap. J.*, 229 (1979), 158.

- [113] Gilmore, G. and Wyse, R. F. G., *Nature.*, 322 (1986), 806.
 [114] Lacy, C. G., *M. N. R. A. S.*, 208 (1984), 687.
 [115] Binney, J. and Lacy, C. G., *M. N. R. A. S.*, 230 (1988), 597.
 [116] Pagel, B. E. J. and Patchett, B. E., *M. N. R. A. S.*, 172 (1975), 13.
 [117] Soderblom, D. R., *A. J.*, 100 (1990), 204.
 [118] Sommer-Larsen, J., *M. N. R. A. S.*, 249 (1991), 368.
 [119] Yoss, K. M., Neese, C. L. and Hartkoft, W. I., *A. J.*, 94 (1987), 1600.
 [120] Carr, B. J. and Lacy, C. G., *Ap. J.*, 316 (1987), 23.
 [121] Hesser, J. E. et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 99 (1987), 739.
 [122] Norris, J., *A. J.*, 93 (1987), 616.
 [123] Fich, M. and Tremaine, S., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 29 (1991), 409.
 [124] 束成钢, 赵君亮, 天文学进展, 11 (1993), p.236.
 [125] Hawkins, M. R. S. and Bessell, M., *M. N. R. A. S.*, 234 (1988), 177.
 [126] Bahcall, J. N., *Ap. J.*, 276 (1984), 156.
 [127] Bahcall, J. N., *Ap. J.*, 276 (1984), 169.
 [128] Bahcall, J. N., *Ap. J.*, 287 (1984), 926.
 [129] Gould, A., *Ap. J.*, 341 (1989), 748.
 [130] Sandage, A., *J. Roy. Astron. Soc. Can.*, 84 (1990), 70.
 [131] Van den Berg, S., *J. Roy. Astron. Soc. Can.*, 84 (1990), 60.
 [132] Lee, Y. W., *A. J.*, 104 (1992), 1780.
 [133] Burkner, A., Truran, J. W. and Hensler, G., *Ap. J.*, 391 (1992), 651.
 [134] Lee, Y. W., *Ap. J.*, 363 (1990), 159.
 [135] Rana, N. C., Basu, S., *Astron. Astrophys.*, 265 (1992), 499.
 [136] Strobel, S., *Astron. Astrophys.*, 247 (1991), 35.
 [137] Freeman, K. C., in IAU Symp. No. 149, p. 65, (1992).
 [138] Spite, M., in IAU Symp. No. 149, p. 1, (3, (1992).
 [139] Kulessa, A. S. and Lyoden-Ecll, D., *M. N. R. A. S.*, 255 (1992), 105.
 [140] Li, Z. W. et al., *Ap. J.*, 378 (1991), 93.
 [141] 向德琳, 天体物理学报, 11 (1991), 154.
 [142] Gerhard, O. E. and Vietri, M., *M. N. R. A. S.*, 223 (1986), 337.
 [143] Mulder, W. A. and Liem, E. T., *Astron. Astrophys.*, 157 (1986), 148.
 [144] Blitz, L. and Spergel, D. N., *Ap. J.*, 379 (1991), 631.
 [145] Weinberg, M. D., *Ap. J.*, 384 (1992) 81.
 [146] Binney, J., Gerhard, O. E. and Stark, A. et al., *M. N. R. A. S.*, 252 (1991), 210.

(责任编辑 舒似竹)

Recent Progress in Galactic Astronomy

Zhao Junliang Shu Chenggang

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

Abstract

Galactic astronomy is a basic, important branch of astronomical science. It is closely linked with many aspects of modern astrophysics. As ever-growing and better observational data become available and theoretical research vigorously developing in recent years, many an astrophysicist's attention has been drawn back from the fasion to the problems of the Galaxy. In this paper we present a brief review of the recent studies of the Milky Way System except for the Galaxy center area, to which a subsequent review will be devoted.