

重构银河系物质分布

Lei Qian

National Astronomical Observatory of China
Beijing, 100012, China

March 18, 2010

银河系是离我们最近的星系，因为我们就在其中。而正因为如此，了解银河系的结构和动力学有特殊的困难。我们无法像观测M31那样从外部获得银河系的整体图像，我们对银河系结构和动力学的了解都来源于依据恒星分布以及对中性氢21cm发射的分布进行的重构。

对于恒星，其距离可以通过三角视差和周光关系等方法测定，然后可以获得恒星的三维分布。而对于中性氢，其三维分布的获得需要借助中性氢的运动规律，通常使用银河系的旋转曲线。

假设银河系中气体做圆周运动，可以将观测到的径向速度转换为距离（Nakanishi和Sofue 2003）。使用了Clemens（1985）的旋转曲线

$$V(R) = \sum_{i=0}^7 A_i R^i, \quad (1)$$

其中系数如表1所示。

由于不同的几何关系，外银河系（与银心距离大于太阳与银心距离的部分），内银河系，靠近切点的位置需要分别考虑。假设在银盘上方的气体和银盘赤道面共转，并且转动是圆周运动。转动规律可以描述为

$$V_r(l, b) = \left[\frac{R_0}{R} V(R) - V_0 \right] \sin l \cos b \quad (2)$$

其中 R_0 和 V_0 分别是太阳离银心的距离和旋转速度。由这个表达式可以从观测得出的径向视线速度 $V_r(l, b)$ 得到气体距离银心的距离 R 。计算气体和太阳系的距离 r ，我们使用下面的方程

$$R^2 = r^2 + R_0^2 - 2rR_0 \cos l \quad (3)$$

Table 1: 旋转曲线中的系数。

	$R < 0.09 R_0$	$0.09 R_0 < R < 0.45 R_0$	$0.45 R_0 < R < R_0$
A_0	0.	325.0912	-2342.65649
A_1	3261.30	-264.0309	2663.95435
A_2	-17847.8	261.7602	-1156.07764
A_3	52752.5	-132.822906	269.354645
A_4	-87027.2	31.9537735	-36.2039909
A_5	74344.	-2.857958	2.8025787
A_6	-25510.	0.	-0.1158279
A_7	0.	0.	0.001977

对于外银河系， r 可以唯一确定为 $r = R_0 \cos l + (R^2 - R_0^2 \sin^2 l)^{1/2}$ ，而对于内银河系，解不是唯一的， $r = R_0 \cos l \pm (R^2 - R_0^2 \sin^2 l)^{1/2}$ 。为了计算 r 处径向尺度为 Δr 的一个小区域内中性氢的体密度，先计算这个区域对柱密度的贡献。假设这个区域对应的视向速度的范围在 V_{r_1} 到 $V_{r_1} + \Delta V_r$ 之间，那么这个区域对柱密度的贡献可以表示为

$$N_{\text{HI}}[\text{cm}^{-2}] = 1.82 \times 10^{18} \int_{V_{r_1}}^{V_{r_1} + \Delta V_r} T_b dV_r. \quad (4)$$

Δr 可以由旋转曲线计算，而体密度可以表示为

$$n_{\text{HI}}[\text{cm}^{-3}] = \frac{N_{\text{HI}}}{\Delta r} = 1.82 \times 10^{18} T_b \frac{\Delta V_r}{\Delta r} \quad (5)$$

对应外银河系，这样的步骤就可以唯一地从亮温度分别得到中性氢的体密度的三维分布。

在切点附近 $r = R_0 \cos l$ ，视向速度就等于旋转速度，即达到同一半径上的最大值， $\Delta V_r / \Delta r$ 趋向于0，所以计算采用下面的公式

$$n_{\text{HI}}(r_t) = \frac{1.82 \times 10^{18} \int_{V_t - \sigma}^{\infty} T_b dV_r}{r_2(V_t - \sigma) - r_1(V_t - \sigma)}, \quad (0^\circ < l < 90^\circ), \quad (6)$$

$$n_{\text{HI}}(r_t) = \frac{1.82 \times 10^{18} \int_{-\infty}^{V_t + \sigma} T_b dV_r}{r_2(V_t + \sigma) - r_1(V_t + \sigma)}, \quad (270^\circ < l < 360^\circ), \quad (7)$$

其中计算柱密度的时候对速度的积分是在一个 $|V_t| - \sigma \leq |V_r| \leq \infty$ 的范围内进行的， σ 是速度弥散。 $r_1(V_t \pm \sigma)$ 和 $r_2(V_t \pm \sigma)$ 分别表示对应速度 $V_t \pm \sigma$ 的近点和远点距太阳的距离。

在内银河系，一条视向上有两个视向速度相同的点，存在距离简并的问题。解决这个问题需要用到中性氢厚度的模型（Spitzer 1942），假设银盘中的恒星和气体是等温的，通过求解泊松方程可以得到

$$n_{\text{HI}}(\xi) = n_{\text{HI}0} \text{sech}^2(\xi) \quad (8)$$

其中 ξ 是

$$\xi = \log \left(1 + \sqrt{2} \frac{z - z_0}{z_{1/2}} \right), \quad (9)$$

于是两点对柱密度的贡献为

$$N_{\text{HI}}(b) = n_{\text{HI}0_1} \text{sech}^2(\xi_1) \times \frac{\Delta r_1}{\cos b} + n_{\text{HI}0_2} \text{sech}^2(\xi_2) \times \frac{\Delta r_2}{\cos b}, \quad (10)$$

其中

$$\xi_1 = \log \left(1 + \sqrt{2} \frac{r_1 \tan b - z_{01}}{z_{1/2}} \right), \quad (11)$$

$$\xi_2 = \log \left(1 + \sqrt{2} \frac{r_2 \tan b - z_{02}}{z_{1/2}} \right). \quad (12)$$

其中的参数由对观测的拟合确定。

用上述步骤就可以把亮温度分布 $T_b(l, b, V_r)$ 转换为密度分布 $n_{\text{HI}}(l, b, r)$ 。这样就重构了银河系的物质分布。但是这个过程需要预先知道旋转曲线，我们现在所知的旋转曲线不一定是准确的。实际观测到的亮温度分布中包含了物质分布以及动力学（旋转曲线的信息），所以原则上可以在重构物质分布的同时也修正我们对旋转曲线的认识。

Kalberla（2003），Kalberla et al.（2007）基于巡天数据迭代求解了耦合的泊松方程和玻尔兹曼方程同时得到银河系的物质分布和旋转曲线，结果对之前的旋转曲线有一些修正。但是还是有一些遗留问题，例如，最严重的问题就是“共转”假设，即同一半径出不同高度的气体的角速度相同。这是一个待解决的问题。

References

- [1] Clemens D. P. 1985 ApJ, 295, 422

- [2] Kalberla P. M. 2003 ApJ, 588, 805
- [3] Kalberla P. M., Dedes L., Kerp J., Haud U. 2007 A&A, 469, 511
- [4] Nakanishi H. & Sofue Y., 2003 PASJ, 55, 191