

用VLBI测定H₂O脉泽源的距离

郑兴武 彭云楼

(南京大学天文系)

提 要

本文介绍了利用 VLBI 方法测定恒星距离的研究进展。评述了几种 H₂O 脉泽源成图的原理、方法和它们的精度。讨论了用 VLBI 测定恒星距离的潜在意义以及有关的一些问题。

一、引 言

VLBI 高分辨率和高精密天体定位将使天体测量学和大地测量学面临着一次飞跃。目前它已经渗透进恒星视差、恒星自行、星系结构、星系旋转、地球自转和板块移动诸测量领域[1],正在变革那些传统的测量方法。用 VLBI 测定恒星的距离就是一例。

用 VLBI 观测年轻恒星形成区和晚型星拱星包层里的脉泽辐射,不仅提供 OB 型星形成和晚型星消亡的演化信息[2],[3],也给天文学家提供了一个新的有效的测定恒星距离的方法。自 1981 年 Genzel[4]等人第一次用 VLBI 获得 10%精度的猎户星云的距离之后,该项开拓性的工作逐步受人注意。Reid[5]等人观测了 Sgr B₂水脉泽的自行,获得银河系中心离太阳的距离为 $7.1 \pm 1.2 \text{ kpc}$ 。如果这是真的话,那么对银河系的大小、质量等参数都会有一个新的认识。Reid[6]认为,这种测定恒星距离的方法还将对恒星结构、银河系结构、恒星演化、星系演化以及宇宙学方面产生深远的影响。

在恒星周围的星际介质中脉泽过程引起 H₂O、OH、SiO、CH₃OH 和 NH₃ 诸分子的微波辐射,频谱通常是很复杂的,它既包含流量密度极高的峰,也包含许多精细特征。每个精细特征都是由不同视向速度的脉泽点源引起的。一个强的脉泽源可能包含几十乃至几百个致密脉泽点源,它们分布在几个角秒的范围内,多普勒速度范围从 10 到 300 km/s,脉泽点源的角大小小于 10^{-4} as ,有的亮温度高达 10^{16} K [7],[8]。假定在脉泽源中,各个脉泽点源的运动是随机的,则用 VLBI 方法测出不同时间每个点源的位置和视向速度,从而获得脉泽点源的自行,用统计视差的方法就可得到恒星的距离。

本文在第二节中,分析了经典天文距离测定的局限性。在第三节中给出脉泽点源相对自行测定的方法以及各种方法的精度。在第四节中讨论了几种脉泽点源的运动模型。在第五节中给出恒星距离的测定及其精度。最后给出一些观测结果,并讨论这个方法的潜在意

义以及一些值得研究的问题。

二、背 景

天体距离的测定是天文学基本测量之一,只有估计了天体的距离之后,才能得到诸如天体的能量、质量、动力学性质以及它们的年龄等感兴趣的信息。可以说,人类认识宇宙的进步很大程度上决定于测定天体距离的方法与技术的改进。

测定恒星距离最经典的方法是三角视差法。恒星的三角视差测量不依赖于恒星的物理性质,但它要求很高的测量精度。到目前为止,已获得了7000颗恒星的视差^[9],平均标准差为 $0''.016$,其中只有350颗恒星的视差大于 $0''.05$,测量相对误差好于10%,主要的是晚型主序星。所有这些恒星都在离太阳20pc之内,但银河系的直径大约为30kpc,包含数亿颗恒星,大部分恒星是如此之遥远,以致无法用三角视差测量来确定它们的距离。

另一种方法是利用恒星的光度来推断它们的距离。用这种方法,一般都含有某种假设,如恒星运动的统计假设,或者在主序星重迭法中对不同星团、光谱型相同的恒星作关于相对光度的假设,这依赖于恒星的物理状态与化学组成。这种方法误差很大,绝对星等估计误差 ΔM 与距离估计相对误差大约有如下关系:

$$\Delta D/D = 0.92\Delta M \quad (1)$$

即绝对星等估计相差一等,会引起接近100%的相对误差,从而引起大约300%的质量估计误差。

近三十年来,由于射电天文技术和空间技术的发展,天文学的各个领域几乎都受到不同程度的冲击,唯独天体测距这个古老的领域未被触及。VLBI技术以及不久就要发射的依巴谷天体测量卫星和空间望远镜,将在天体测量特别是在视差测量方面产生重要的影响。

三、脉泽点源相对自行的测量

假如在恒星形成区中,脉泽点源的运动完全是热运动性质的,即运动是随机的,则比较它们的自行和视向运动可以获得恒星的距离。从VLBI谱线观测可以测得 H_2O 脉泽谱的多普勒频移,从而获得脉泽点源的视向运动。若用VLBI测得各个脉泽点源相对于一个参考中心的相对位置,则数月乃至一年间隔的观测就可以获得脉泽点源的相对自行。

测定脉泽点源相对位置的方法有:(1)相位成图(phase mapping), (2)条纹率成图(fringrate mapping)^{[10],[11]}和综合方法(synthesis method)。它们的资料处理的复杂程度不同,测量精度也不同。方法的应用取决于实验的要求。综合方法有较高动态范围的图,相对位置测量误差约为 $10^{-5}''$ (4000km的基线),但是对资料的信噪比有较高的要求,对资料要进行苛刻的校准,计算工作量大到很少有人用它。使用较多的是相位成图和条纹率成图。

(1) 相位成图及其测量精度的估计

在频率 ν 上,VLBI测得的一个脉泽点源的剩余条纹相位为

$$\Delta\phi(\nu) = 2\pi[\nu\Delta\tau_g(\nu) + (\nu - \nu_{L0})\tau_e + \nu\tau_a] + \phi_i + 2n\pi \quad (2)$$

其中

| | |
|--|-------------------|
| $\Delta\tau_g(\nu) = \tau_g(\nu) - \tau_g'(\nu)$ | 为真实几何时延和估计几何时延之差, |
| $\tau_e = \tau_2 - \tau_1$ | 为两地的钟差, |
| ν_{L0} | 为本振频率, |
| τ_a | 为两地大气引进的延迟差, |
| ϕ_i | 为两天线系统引进的相位差, |
| n | 为相位模糊度 |

如果选取在 ν_R 频率上的 $\phi(\nu_R)$ 为参考相位, 则在频率 ν 上的脉泽点源和在频率 ν_R 上作为参考点的脉泽点源间剩余相位差为

$$\begin{aligned} \Delta^2\phi(\nu) &= \Delta\phi(\nu) - \Delta\phi(\nu_R) \\ &= 2\pi\{\nu[\tau_g(\nu) - \tau_g(\nu_R)] \\ &\quad + (\nu - \nu_R)[\tau_g(\nu_R) - \tau_g'(\nu_R)] \\ &\quad + (\nu - \nu_R)[\tau_e + \tau_a]\} \end{aligned} \quad (3)$$

这样就完全消除了与频率无关的仪器项 ϕ_i 和模糊度 n , 使相对定位精度大大提高。设对应于频率 ν 和 ν_R 的脉泽点源为 m_ν 和 m_R , 它们在空固坐标系中的单位矢量为 S_ν 和 S_R , $\Delta S_{\nu R}$ 是参考点 m_R 到 m_ν 点源的位置矢量。如果我们采用下述的关系式:

$$\tau_g'(\nu_R) = \frac{1}{c} D \cdot S_R \quad (4)$$

$$\tau_g(\nu_R) = \frac{1}{c} (D - \Delta D) \cdot (S_R - \Delta S_R) \quad (5)$$

$$\tau_g(\nu) = \frac{1}{c} (D - \Delta D) \cdot (S_R - \Delta S_R + \Delta S_{\nu R}) \quad (6)$$

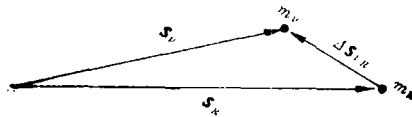


图 1

其中 ΔD 和 ΔS_R 是基线和源位置的估计值和真值之差。(3)式可化为(略去二次项)

$$\begin{aligned} \Delta^2\phi &= \frac{2\pi\nu}{c} D \cdot \Delta S_{\nu R} - \frac{2\pi\nu}{c} \Delta D \cdot \Delta S_{\nu R} \\ &\quad - \frac{2\pi}{c} [(\nu - \nu_R)(\Delta D \cdot S_R + D \cdot \Delta S_R)] \\ &\quad + 2\pi(\nu - \nu_R)(\tau_e + \tau_a) \end{aligned} \quad (7)$$

若选取: 观测频率 $\nu = 22\text{GHz}$, 基线 $D = 4000\text{km}$, 视场 $\Delta S_r = \pm 1''$, 参考源位置误差 $\Delta S_R = 0''.1$, 基线误差 $\Delta D = 1\text{m}$, 观测带宽 $B = \Delta\nu_R = \text{Max}(\nu - \nu_R) = 2\text{MHz}$, 大气延迟差为 30cm , 钟的稳定度为 10^{-14} 。则由基线估计误差、源位置估计误差、钟差和大气延迟差引起的脉泽源相对位置误差的数量级分别为

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta\theta_D &= \frac{\Delta D}{D} \Delta S_f \sim 0.3(\mu\text{as}) \\
 \Delta\theta'_D &= \frac{\Delta v_R}{v} \frac{\Delta D}{D} \sim 5(\mu\text{as}) \\
 \Delta\theta_R &= \frac{\Delta v_R}{v} \Delta S_R = 10(\mu\text{as}) \\
 \Delta\theta_a &= \frac{\Delta v_R}{v} \frac{c\tau_a}{D} = 1.5(\mu\text{as}) \\
 \Delta\theta_c &= \frac{\Delta v_R}{v} \frac{c\tau_c}{D} = 0.15(\mu\text{as})
 \end{aligned} \right\} (8)$$

从上面估计值可看出,具有 10^{-14} 稳定度的氢脉泽钟在 VLBI 实验中也足够精确了。另外可看出误差主要来自参考源位置误差。因为谱线观测带宽比较窄,不可能用测量群延迟的方法来绝对定位。

(2) 条纹率成图和测量精度的估计

现在所用的多点条纹率(multiple-points fringe rate)成图方法是由 Walker(1981)在单点条纹率成图方法(Moran, 1968)[12]基础上发展起来的。后的一个基本假定是在有脉泽辐射的那些频率通道内,一个频率通道只对应一个具有一定视向速度的脉泽源。而多点条纹率成图则认为一个频率通道里可能对应一个以上相同视向速度而不同空间位置的脉泽源。这种假定已被综合成图方法证实。这种方法的测量精度比相位测量精度低一至两个数量级,但简单,所用的计算时间短,已被广泛应用。

假定 VLBI 处理机的输出为脉泽辐射的互相关函数 $S_{12}(t, \tau)$, 对 τ 作 Fourier 变换获得互功率谱 $S_{12}(t, \nu)$, 再对 t 作 Fourier 变换得到条纹率谱 $S_{12}(f_R, \nu)$

$$S_{12}(t, \nu) = \int S_{12}(t, \tau) e^{-j2\pi\nu\tau} d\tau \quad (9)$$

$$S_{12}(f_R, \nu) = \int S_{12}(t, \nu) e^{-j2\pi f_R t} dt \quad (10)$$

若在 ν 频率通道里只有一个脉泽点源, 条纹率谱有如图 2 的形式, 只有一个峰值 f_m 。图 3

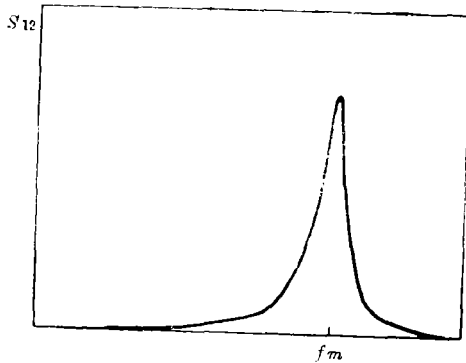


图 2

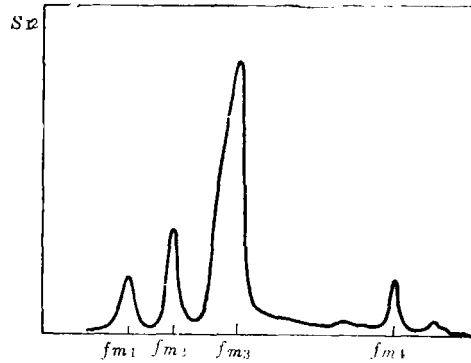


图 3

表示在 ν 频率通道里条纹率谱是由四个脉泽点源的贡献而成的。有四个峰 f_{m1}, f_{m2}, f_{m3} 和 f_{m4} , 对应于相同视向速度而不同相对位置的脉泽源。

条纹率 f_m 与脉泽点源相对于参考点的相对位置 $X(\Delta a \cos \delta)$ 和 $Y(\Delta \delta)$ 有如下的关系。

$$\text{其中} \quad f_m = X \frac{dU}{dt} + Y \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

$$U = D_\lambda \cos \delta_B \sin(\alpha_B - \alpha_S)$$

$$V = D_\lambda [\sin \delta_B \cos \delta_S - \cos \delta_B \sin \delta_S \cos(\alpha_B - \alpha_S)]$$

U 和 V 是瞬时基线在 UV 平面上的投影, α_B 和 δ_B 是基线的赤经和赤纬, α_S 和 δ_S 是源的赤经和赤纬, D_λ 是以观测波长为单位的基线长度。

在一个积分时间段里寻找条纹率谱的每一个峰值, 从(10)式就可以获得一组平行直线, 若有四个峰值, 就有四条平行直线。图4为对应于图3的四个条纹率峰值在 UV 平面上画出的四条直线 A, B, C 和 D 。在下一个积分时间段里可画出 A', B', C' 和 D' 。一系列的观测可以获得四个交点。它们就是四个脉泽点源的位置。

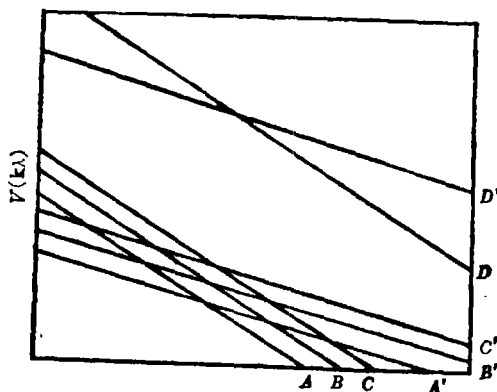


图 4

在一个积分时间段(约15—30分钟), 由于 dU/dt 和 dV/dt 随时间的变化造成条纹率峰值的模糊, 从(10)式可知, 这种模糊随着相对位置增大而增大, 模糊程度由下式给出:

$$\frac{df_m}{dt} \Delta t = \left(\frac{d^2U}{dt^2} X + \frac{d^2V}{dt^2} Y \right) \Delta t \quad (11)$$

其中 Δt 为积分时间, 假定它保持在条纹分辨率的数量级,

$$\frac{df_m}{dt} \Delta t < \frac{1}{\Delta t} \quad (12)$$

即

$$\left(\frac{d^2U}{dt^2} X + \frac{d^2V}{dt^2} Y \right) < \frac{1}{2\pi \Delta t^2}$$

定义这样一个视场

$$\begin{aligned} X &< \text{Min} \left(2\pi \Delta t^2 \frac{d^2U}{dt^2} \right)^{-1} \\ Y &< \text{Min} \left(2\pi \Delta t^2 \frac{d^2V}{dt^2} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

在这个视场内多点条纹率成图法确定的相对位置是可信的。如果实验要求确定较大视场中脉泽点源的分布, 则可以把整个视场分成若干区域来成图。

在低信噪比的情况下如何把真实的条纹率峰值从噪音背景中区分出来, 以及如何把条

纹率谱中两个靠得很近的峰区分开来等技术细节不在此赘述,但它们在真正计算里是非常重要的。

定义条纹率束宽

$$\theta_{JR} = \frac{\lambda}{D\Omega_E \Delta t \cos\theta} \quad (14)$$

其中 λ 为观测波长, D 为基线长度, Ω_E 为地球自转速度 (7.3×10^{-5} radian/s), Δt 为积分时间(典型值为 30 分钟), θ 为基线矢量和源方向之间的夹角。最好的相对位置测量精度大约为 θ_{JR} , 对于 $\lambda = 1.3\text{cm}$, $D = 4000\text{km}$, 测量精度为毫角秒。

四、脉泽点源的运动模型

在恒星形成区脉泽点源的运动不完全是随机的,而可能是以年轻 OB 型星为中心的膨胀、收缩和旋转运动。决定脉泽点源的运动模型是一个复杂的问题,但它却和距离测定精度密切相关。为此,我们介绍几个运动模型,并讨论在这些模型下脉泽点源的视运动。

1. 薄壳膨胀模型

脉泽点源处在一薄球壳层内,如图 5(a) 所示,假定这个薄球壳以常速度 (v_0) 向外膨胀,按照投影原理, X (或 Y) 越大,自行速度越大。把每个脉泽点源的自行速度和相对位置 X (或 Y) 作图,应有如图 5(b) 的形式,而视向速度和相对位置应有如图 5(c) 所示,其中曲线为一椭圆。在 $|v_R|$ 上的截距是薄壳的膨胀速度,在 X 轴上的截距应是壳的半径。

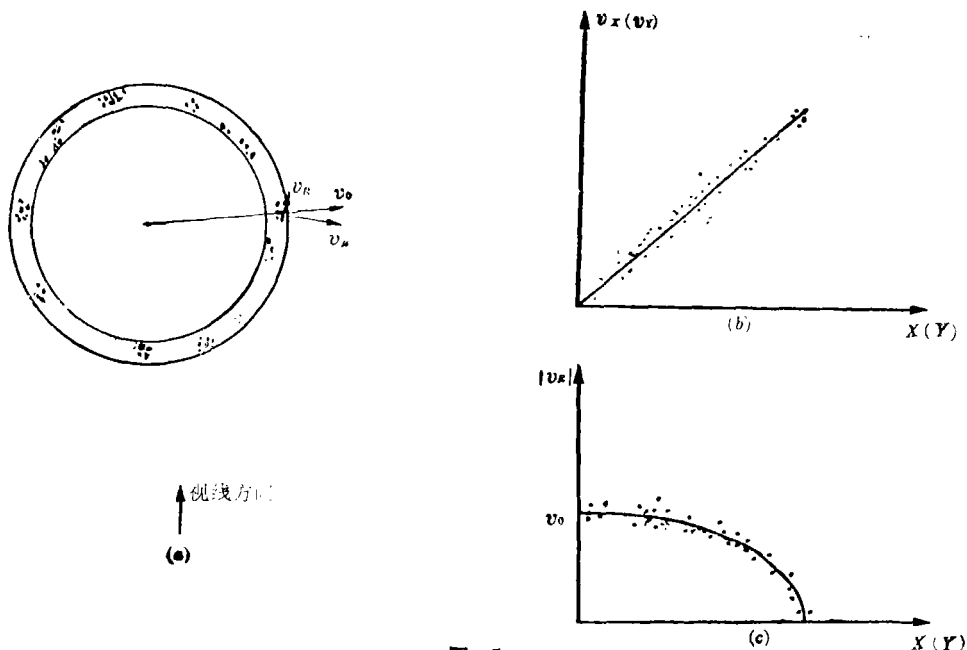


图 5

2. 厚壳膨胀模型

如图6(a)所示, 脉泽点源处在一个有一定厚度的球壳层内。该壳层以速度 v_0 向外膨胀, 脉泽点源的自行速度和相对位置, 以及视向速度和相对位置的关系如图6(b)和图6(c)所示。

从图6(a)和图6(b)可知, A源和B源应有相同的自行速度, 但有不同的相对位置。直线 k 反映球壳的内半径限制, 而 k' 反映的是球壳的外半径限制。

在 X (或 Y)- $|v_R|$ 图上所有点应落在一个椭圆之内。如果有些点落在椭圆之外则表示有另外的运动流。

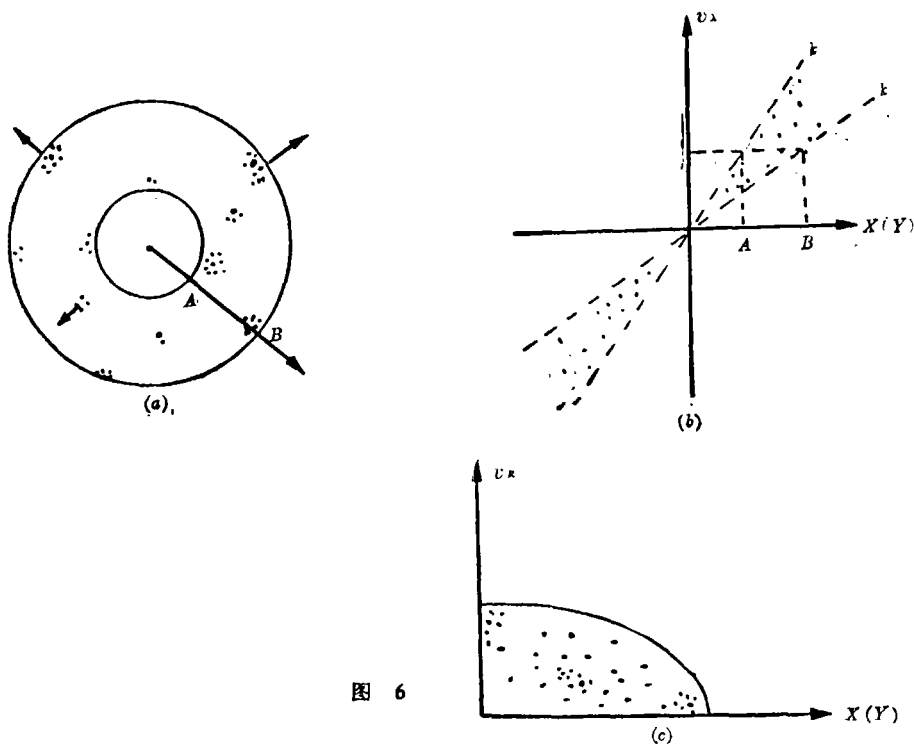


图 6

3. 厚壳的收缩模型

在 X (Y)- v_x (v_y) 图上所有资料点应落在第二和第四象限的两条不同斜率的直线之内。

4. 旋转模型

如图6(a)所示脉泽点源处在一个厚的球壳层内, 该壳层的内、外半径为 $r_{内}$ 和 $r_{外}$, 有一个正体的旋转运动。设这种旋转是刚性的, 则在 v_x (v_y)- X (Y) 图上所有点应落在两个同心的椭圆之间, 在外椭圆上的点对应于球壳层里最外面的那些脉泽点源, 而在内椭圆上的点则对应于最里面的那些脉泽点源(图7(b))。

上述几种运动模型是最简单的, 复杂的运动模型可以是它们的组合。根据猎户星云H₂O脉泽源的资料分析, H₂O脉泽源的膨胀中心位于一个正在形成的OB型星的位置, 那些低速运动的脉泽点源位于一个有一定厚度的膨胀的壳层内并附加一个高速的运动流。

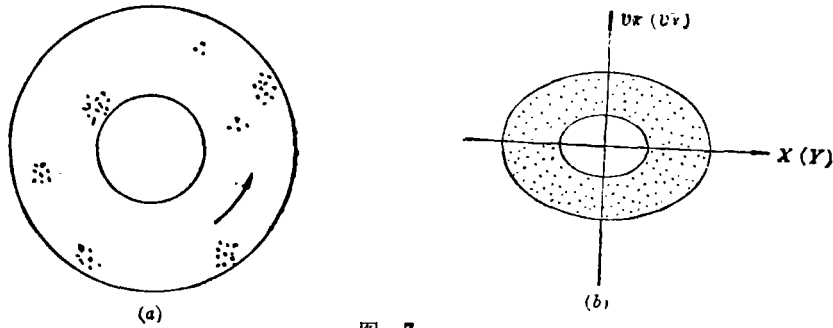


图 7

五、恒星距离的测定和它的精度

利用 VLBI 可以测定一群脉泽点源的相对自行和视向速度。假如这群脉泽点源处在一个湍动速度场内,其中 N 个脉泽点源能从相对自行的测量定出其自行运动速度,若这 N 个脉泽点源自行速度弥散为 σ_{μ} (radian/s)。而 M 个脉泽点源视向速度弥散为 σ_{v_z} (km/s)。由统计视差原理恒星距离为

$$D = \sigma_{v_z} / \sigma_{\mu} \quad (15)$$

由于自行测量的误差加宽了自行速度弥散,则真正的自行速度弥散为

$$\sigma_{\mu}^2 = (\sigma_{\mu}^{obs})^2 - (\sigma_{\mu}^{meas})^2 \quad (16)$$

其中 σ_{μ}^{meas} 为自行测量误差。距离测量的精度由下式给出

$$\frac{\sigma_D}{D} \approx \left[\frac{1}{4N} \left\{ \frac{2N}{M} + \left[1 - \left(\frac{\sigma_{\mu}^{meas}}{\sigma_{\mu}} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (17)$$

实际上在恒星形成区脉泽点源的运动不完全是随机的运动,而可能是具有一个中心的膨胀运动或收缩运动,设在中心 R 处的膨胀速度为

$$\mathbf{v} = v_e R^{\alpha} \quad (18)$$

其中 v_e 为 $R = 1''$ 处的膨胀速度, α 为幂指数,则在赤经和赤纬方向的投影分别为

$$v_x = v_e R^{\alpha} \frac{X}{R}, \quad v_y = v_e R^{\alpha} \frac{Y}{R} \quad (19)$$

其中, X, Y 和 Z 是 R 在赤经、赤纬和视向方向的三个分量。设所选取的参考源离膨胀中心为 R_0 , 在赤经和赤纬方向的投影分别为 X_0 和 Y_0 , 则相对自行速度和视向速度为

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_x &= v_e R^{\alpha} \frac{X}{R} - v_e R_0^{\alpha} \frac{X_0}{R_0} \\ \Delta v_y &= v_e R^{\alpha} \frac{Y}{R} - v_e R_0^{\alpha} \frac{Y_0}{R_0} \\ \Delta v_z &= v_z = v_e R^{\alpha} \frac{Z}{R} - v_e R_0^{\alpha} \frac{Z_0}{R_0} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

上式中左边的空间速度和右边的相对位置 X 和 Y 是已知量,可以用最小二乘法获得 v_e, α, Z, D 和膨胀中心的坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 。由于这里是用速度求解源的距离,在理论上测量的

精度要好于统计视差的方法,但因球膨胀模型可能与实际膨胀有偏离,因此它和统计视差有相同的测量精度。

六、几个恒星距离的精确测量

VLBI 相对位置测量的精度大约为 10^{-6} (相位成图) 数量级。测量脉泽源距离的误差主要依赖于所观测的脉泽点源数, 设 $N = 25, M = 50, \sigma_{\mu}^{meas}/\sigma_{\mu}^{obs} = 1/5$, 则测量距离的相对误差约为 15%。

VLBI 测量恒星距离的第一个样品是 Orion-KL (Genzel et al., 1981), 1977 年到 1979 年共进行了四次六台站的长基线综合孔径观测, 测得了三十多个脉泽点源的自行。自行的典型值为几毫角秒/年。从观测资料分析得知, 脉泽点源处在一个膨胀的厚壳层里。利用这个模型, 按照 (20) 式计算获得表 1 的值。在 Orion-KL 里有两种气体膨胀速度。导出的距离为 $480 \pm 80 \text{ pc}$, 这个结果几乎同光学测量完全一致。

表 1

| | 低速流 18km/s | 高速流 (30—100km/s) |
|--------------|---------------|---------------------|
| 膨胀速度 v_0 | 18+2 | 24+8 |
| 幂指数 α | 0.0±0.1 | 0.3±0.1 |
| 膨胀中心 X_0 | 0".2+1".0 | 0".0+2".0 |
| Y_0 | 3".5+2".0 | 4".5±6".0 |
| Z_0 | 2".0 | |
| 距离 D | 480±80 | |

利用 H₂O 脉泽源的 VLBI 测量, Genzel 等人 (1981) 测得 W51M 的距离为 $7 \pm 1.5 \text{ kpc}$, Schneps 等人 [13] (1981) 测得 W51N 的距离为 $8 \pm 2.5 \text{ kpc}$ 。一个非常成功的工作是 Harvard-Smithsonian Observatory 的 Reid 等测得银河系中心的距离为 $7.1 \pm 1.2 \text{ kpc}$ 。该组人员正在处理 Cepheus A, W49N, W3(OH) 和 G12.2+0.1 等 H₂O 脉泽源的观测资料, 预计对银河系的结构会有一个新的认识。

在计算模型方面, 现在所用的全都是球对称膨胀或收缩模型。我们认为应加进 H₂O 脉泽源的整体旋转分量以及脉泽点源的随机运动, 从而获得恒星形成区分子云的旋转角动量和湍动速度场的信息。

参 考 文 献

- [1] Proceedings of IAU 129, in preparation.
- [2] Habing, J. H. and Israel, P. F., *Ann. Rev. Astr. Ap.*, **17** (1979), 345.
- [3] Popper, M. D., *Ann. Rev. Astr. Ap.*, **18** (1980), 115.
- [4] Genzel, R., Reid, M. J., Moran, J. M. and Downes, D., *Ap. J.*, **244** (1981), 884.
- [5] Reid, M. J. et al., 1987, submitted.
- [6] Reid, M. J. and Moran, J. M., *Ann. Rev. Astr. Ap.*, **19** (1981), 231.
- [7] Genzel, R. and Downes, D., *Astron. Astrophys. Suppl.*, **30** (1977), 145.

-
- [8] Genzel, R. and Downes, D., *Astron. Astrophys.*, **72** (1979), 234.
[9] ESA SCI(79)10, 1979, HIPPARCOS, Space Astrometry, Report on the phase A study.
[10] Giuffrida, T., Ph. D. thesis, MIT, (1977).
[11] Walker, R. C., *A. J.*, **36** (1981), 1323.
[12] Moran, J. M., Ph. D. thesis, MIT, (1968).
[13] Schneps, M. H., Lane, A. P., Downes, D., Moran, J. M., Genzel, R. and Reid, M. J., *Ap. J.*, **249** (1981), 124.

(责任编辑 刘金铭)

Distance Determination of H₂O Maser Sources with VLBI

Zheng Xingwu Peng Yunlou

(Department of Astronomy, Nanjing University)

A review is given of determining the distance to the H₂O maser sources with VLBI techniques, touching on basic principle of mapping masers and errors. The potential impact and future developments are discussed.