银河系天体的空间运动特征

◎ 晓 泓

任何物体的运动都是相对的，天体亦不例外。在银河系内，恒星等天体的运动颇为复杂，而为了能明晰描述它们的运动特征和统计规律，天文学上引入了若干特有的重要概念。

自行和视向速度

天文学家通常把恒星空间运动速度沿两个方向分解：一个是沿观测者到恒星的视线方向上的分量，称为视向速度，以公里每秒为单位；一个是与视线相垂直方向上的分量，称为自行。自行是恒星天球位置的变化角速度，以每年(或每百年)角秒为单位，称为年(或百年)自行。如果知道某颗恒星的距离，由自行便可推算出该恒星在天球切平面上的运动线速度，称为切向速度，亦即恒星空间运动速度的切向分量。自行和切向速度还可以沿赤经、赤纬方向(参见本刊2008年第3期中《各司其职的天文学坐标系》)进一步分解为两个分量。

1718年，英国天文学家哈雷把天狼星等若干亮星当时的位置，与托勒玫星表上的相应位置作了比较之后，发现它们大约有月球直径(0.°5)般大小的变化，这一变化就是恒星在约1500年期间自行运动的结果。亮星的年自行大多小于0.″1，而暗星自行一般还更小。自行最大的是巴纳德星，年自行为10.″31，读者不难推算出它需经170多年才会移动月球直径那么大的一段距离；无怪中外古人都没有觉察到恒星的自行现象，而把恒星当作恒定不动的星体了。

如设某颗恒星的距离为r，在t_1和t_2时刻测得其赤经、赤纬分别为(α_1,δ_1)和(α_2,δ_2)，则该恒星在赤经、赤纬方向上的自行分量分别为

$$\mu_\alpha=\frac{\alpha_2-\alpha_1}{t_2-t_1},\ \mu_\delta=\frac{\delta_2-\delta_1}{t_2-t_1} \tag{1}$$

而该恒星在赤经、赤纬方向上的切向速度分量分别为

$$V_\alpha=kr\mu_\alpha\cos\delta,\ V_\delta=kr\mu_\delta \tag{2}$$

其中k=4.74为单位换算因子。之所以这里会出现因子k，而不是教科书中常见的线速度V与角速度ω之间的关系式$V=r\omega$，原因在于上述表达式中恒星距离r的天文学单位是秒差距(pc)，而不是公里(km)，而自行(角速度)的天文学单位是每年毫角秒(0.″001)，而不是每秒弧度。

自行虽小，但在漫长岁月中仍会使恒星间相对位置发生显著变化。如北斗七星是人们非常熟悉的星空图案，但由于这7颗星自行的大小、方向各不相同，在10万年前或经10万年后，它们的位置和现在就完全不同。

恒星视向运动的观测效应与自行不同，它使恒星远离或靠近地球，但不会改变观测者所看到的恒星在天空中(即天球上)的坐标位置(有关内容另文详细介绍)。

视差动和本动

早在300多年前，英国天文学家威廉·赫歇尔就已正确地认识到，因为地球随着太阳在银河系内运动，地球上所观测到的恒星(以及其他天体，下同)空间运动主要包含了两种成分，即因太阳运动引起的恒星表观运动，以及恒星自身的运动；前者称为恒星的视差动，后者称为恒星本动。因此，观测到的恒星运动便是视差动和本动二者的合成。当然，由于观测者还要参与地球的自转和公转运动，而这也会影响到恒星的观测运动；不过对于绝大多数远方的恒星来说，这两项运动对恒星观测运动的影响非常小，通常可不予考虑。

既然视差动是恒星观测运动中由太阳运动引起的部分，那么它便是一种系统性运动，或者说有一定的规律性。另一方面，恒星本动无论在大小和方向上都是无规则的。当年赫歇尔正是根据这一事实推算出，太阳相对邻近恒星大约以20公里/秒的速度，朝着织女星附近的方向运动。

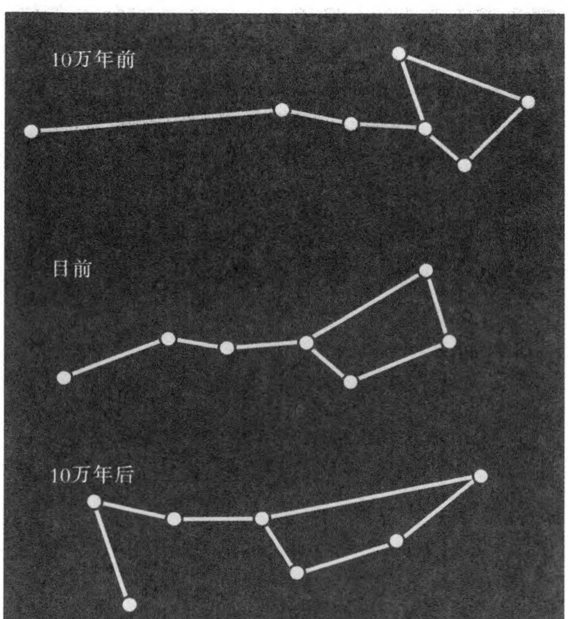
视差动和本动是恒星空间运动的两种成分，它们都可以沿天球切平面和视线方向分解，分别称为视差动的切向分量与视向分量，以及本动的切向分量与视向分量。

事实上，由于所有恒星都参与银河系的整体运动，在恒星的观测运动中，除了视差动外还可能含有其他系统性运动成分，如银河系自转等。因此，理论上说本动的严格定义应该是在恒星观测运动中，扣除所有的系统性运动成分(其中包括视差动)后的纯随机运动部分。在实用上，根据银河系运动的奥尔特理论，可以认为太阳附近恒星群绕银河系中心的平均运动为圆运动，轨道面与银道面相重合；另一方面，恒星(包括太阳)绕银河系中心的运动轨道是一些偏心率不大的椭圆，且一般来说轨道面与银道面斜交(但交角不大)，而个别恒星在这种椭圆轨道上的运动矢量与恒星群圆运动矢量之差便是相应恒星的本动。从这点上看，恒星本动并没有绝对含义，它们会随所选取样本恒星群的不同而略有不同。

选定太阳附近一群恒星的平均运动作为考察个别恒星本动的运动学参考系，这样的参考系称为“本地静止标准”，而个别恒星的本动便是它们相对本地静止标准的运动。

平均太阳运动

太阳是银河系内的一颗普通恒星。当然，根据定义太阳是不会有视差动的，但太阳也有自身的本动，这就是太阳绕银河系中心的运动速度矢量与近邻恒星群绕银河系中心平均圆运动矢量之差，或者说是太阳相对本地静止标准的空间运动，通常称之为平均太阳运动。当年，赫歇尔所确定的、太阳相对邻近恒星以约每秒20公里速度朝织女星附近方向运动，便是通过实测得到的平均太阳运动。



北斗七星在10万年前、目前和10万年后的形状

具体来说，平均太阳运动可以有两种表达形式。如采用三维赤道球坐标，这就是太阳空间运动的速率 $V_\odot$，以及太阳奔赴点的天球赤道坐标(A,D)，这里所谓奔赴点是指太阳空间运动方向所指向的天球上的点。如采用三维赤道直角坐标，那么就是太阳空间运动速度矢量在该坐标系中的3个分量($X_\odot,Y_\odot,Z_\odot$)。这两种表达方式之间有如下关系：

$$\begin{aligned}X_\odot&=V_\odot\cos A\cos D\\ Y_\odot&=V_\odot\sin A\cos D\\ Z_\odot&=V_\odot\sin D\end{aligned}\qquad(3)$$

通过对太阳附近恒星运动速度的观测，可以确定平均太阳运动。不难理解，选择不同的恒星样本，平均太阳运动的具体数值必然会有差异。由近距亮星所得到的平均太阳运动速率为 $V_\odot$=19.7公里/秒，向点的赤道坐标(1900.0历元)为 $A=271°$，$D=+30°$，后者称为标准向点。显然，这一结果与赫歇尔测得的数值相差甚小，足见早期杰出天文学家的聪慧和过人之处。

就实测方面而言，为了确定平均太阳运动($X_\odot,Y_\odot,Z_\odot$)，所需要的观测资料是恒星视向速度以及自行。这里，如能取得足够多恒星的视向速度，便可用最小二乘法按下式得出($X_\odot,Y_\odot,Z_\odot$)：

$$X_\odot\cos\alpha_i\cos\delta_i+Y_\odot\sin\alpha_i\cos\delta_i+Z_\odot\sin\delta_i+V_{ri}=V'_{ri}\qquad(4)$$

式中，$i=1,2,\cdots,n$，(α_i,δ_i)是第 i 颗恒星的赤道球坐标，V_{ri} 是该恒星的视向速度观测值，V'_{ri} 是相应的残差，而 n 为样本恒星个数。如还能测得样本恒星的自行(μ_α,μ_δ)$_i$，则对每颗恒星可以列出与式(4)类似的两个方程(因为自行有两个分量)，并可与式(4)一起用于解算平均太阳运动；不过这时必须知道恒星的距离 r，以把自行换算为切向速度(V_α,V_δ)。

恒星本动的速度椭球分布

尽管个别恒星的本动在大小和方向上都是无规则的，但大量恒星的本动仍表现出某种统计规律性，并为观测所证实。研究表明，在本地静止标准中恒星本动速度服从下列三维正态分布：

$$\Psi(u_i,v_i,w_i)=\frac{1}{(2\pi)^{3/2}\sigma_1\sigma_2\sigma_3}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{u_i}{\sigma_1}\right)^2+\left(\frac{v_i}{\sigma_2}\right)^2+\left(\frac{w_i}{\sigma_3}\right)^2\right]\right\}\qquad(5)$$

其中(u_i,v_i,w_i)表示第 i 颗恒星的本动速度在三维银道直角坐标系内的3个分量。式(5)是一个椭球方程，所以称恒星本动服从椭球分布，而($\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$)即为椭球3

条主轴的半长度。在一些场合中，为简单起见在方程(5)中可设定$\sigma_2=\sigma_3$，这时三轴椭球式(5)便退化为旋转椭球，又称为等轴椭球。椭球方程(5)中的参数($\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$)可通过恒星视向速度及自行观测来加以确定。

在提出上述椭球分布理论之前，人们曾认为恒星本动速度应该服从球分布（麦克斯韦分布），即在式(5)中设定$\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$，这就是所谓“单星流假设”；或认为本动速度是两个不同球分布的合成，称为二星流假设，个别恒星的运动分别属于其中一个星流，而两个星流的整体运动方向恰好相反。但是，这两种理论都与一些重要的观测事实不符。例如，观测研究表明，实际上并没有发现存在两种内禀物理性质不同的所谓“星流”。

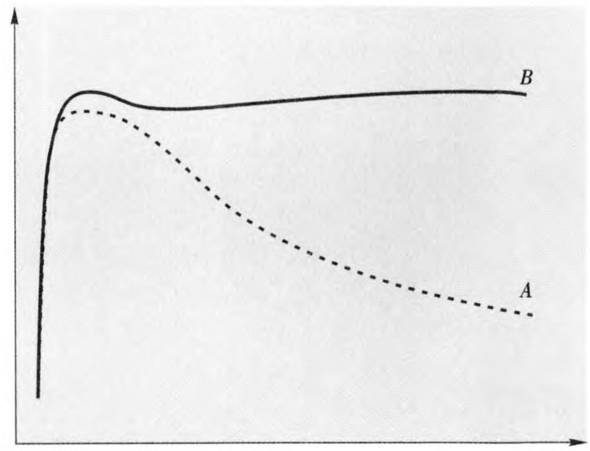
另一方面，椭球分布假设能对观测结果做出更好的解释，其中最重要的一点是，速度椭球3条主轴的方向和大小与银河系大尺度运动的特征相一致。目前，本动速度的椭球分布假设已为天文界所普遍接受，它不仅适用于银河系内的恒星运动学研究，也被用于探索河外星系中的恒星运动学状态。当然，椭球分布假设也只是对恒星本动速度分布的一种统计近似表述，恒星本动的具体分布状况必然更为复杂。

银河系的大尺度运动

“本地静止标准”并非静止不动，所谓“静止”是相对的，只是为了便于讨论太阳邻域内个别恒星(包括太阳)的运动学状态。实际上银河系内的一切天体(包括恒星和星云等)都会参与银河系的整体运动，后者又称为银河系的大尺度运动。

这种大尺度运动首先表现为银河系有自转，即所有银河系恒星都绕着银河系中心在旋转。例如，太阳到银河系中心的距离约为8千秒差距，这就是太阳的银心距。在这个位置上，太阳以每秒220公里左右的速度绕银河系中心转动，不难算出转一周约需2亿多年。自诞生以来的50亿年内，太阳已转过了20余圈。

天体系统的整体运动学状态，归根结底取决于系统内物质的质量分布。对于一个物质系统来说，它的转动状态理论上可以有两种极限情况，即刚体自转和开普勒转动。如系统内的物质为均匀分布，且系统为无限大，则该系统表现为刚体自转，这种形式的运动相当于留声机唱片式的转动，系统中所有质点的转动角速度都一样，而线速度则与质点到转动中心的距离R成正比。另一方面，如系统中的物质极大部分都集中在中心附近，则系统中质点的转动服从开普勒运动定律，这时质点所受的是中心力，其线速度与$R^{-1/2}$成正比。行星绕太阳的运动就属于这种情况，因为太阳质量占了太阳系物质总质量的99.86%。



反映恒星绕银心转动线速度(纵坐标)随银心距(横坐标）变化的银河系自转曲线 *A是理论曲线，B是因暗物质存在所得到的实测曲线。*

银河系的整体自转状态比以上两种情况来得复杂，具体表现是恒星绕银河系中心的转动角速度ω随银心距R的不同而不同，这种运动形式称为较差自转。在太阳附近，如设恒星绕银心作圆运动，那么这种较差自转的最简单表达形式就是下列奥尔特公式：

$$V_r=Ar\sin 2l,\quad k\mu_l=A\cos 2l+B \qquad (6)$$

上式适用于银纬$b=0$(即银道面上)的恒星；式中l是恒星的银经，而

$$\begin{aligned} A&=-\frac{1}{2}\omega'_{\odot}R_{\odot} \\ B&=-\omega_{\odot}-\frac{1}{2}\omega'_{\odot}R_{\odot}=-\omega_{\odot}+A \end{aligned} \qquad (7)$$

称为奥尔特常数，其中$R_{\odot}$是太阳银心距，$\omega_{\odot}$为太阳绕银心的转动角速度，而$\omega'_{\odot}$是角速度ω随银心距R的变化率$\omega'=\partial\omega/\partial R$在太阳位置处的值，它所反映的正是银河系天体运动的较差自转部分。对于银道面外($b\neq 0$)的恒星，可以列出与式(6)相类似的表达式，只是形式略为复杂些。

恒星不仅绕银心转动，同时还参与沿银心向径方向的某种整体性运动，称为大尺度径向运动，其速度也会随恒星银心距的不同而不同。考虑到这种径向运动后，公式(6)会变得更为复杂。

如果银河系只有整体性转动，那么它便是一个完全稳定的系统。大尺度径向运动的存在，说明银河系可能表现有整体性的膨胀或收缩。那么，它会不会最终瓦解，或者向中心坍缩、集聚呢？实测表明，太阳附近恒星的径向运动速度要比转动速度小得多。银河系尽管可能正在经历着某种形式的缓慢动力学演化，但它显然是非常稳定的，至少在过去的100多亿年内银河系始终是一个稳定的天体系统。□