

## 1 星系

星系是由恒星、恒星残骸、星际气体与尘埃、暗物质等构成的引力束缚系统。

### 1.1 银河系

不识庐山真面目，只缘身在此山中。

1610 年，伽利略首先通过望远镜发现银河由无数恒星组成。1785 年，赫歇尔通过计量不同方向的恒星密度，得到第一幅银河系整体图像：银河系为扁盘状，太阳位于中心附近。1896–1921 年，Kapteyn 利用照相底片测量不同天区的恒星密度，用统计视差求得恒星距离，首次估计银河系直径  $\sim 5 \times 10^4$  ly, 厚度  $\sim 1 \times 10^4$  ly, 他认为太阳位于银河系中心附近。

1920 年，Shapley 利用球状星团内的造父变星等测量星团距离，并给出球状星团的空间分布。Shapley 发现球状星团均匀地分布在银河的两侧，并且有向人马座聚集的倾向。

沙普利认为球状星团是银河系的子系统，并以银心为分布中心，由此估计太阳系到银心的距离为  $5 \times 10^4$  ly, 在沙普利的模型中，银河系的结构是扁盘状的，直径  $3 \times 10^5$  ly.

早期对银河系的研究集中在可见光波段，由于天文学家并不了解星际介质的存在及其消光作用，因而得到关于银河系结构的错误的结论。

直到 20 世纪 30 年代人们才认识到星际介质的分布范围及其对观测的重要影响，并逐步发展了射电与红外的手段来研究银河系的结构。

#### 1.1.1 银河系的整体结构

银河是天空中的一个环带，在人马座附近最亮、最宽，它的中心线近似为天球上的一个大圆。

银河系是一个直径约 20 万光年，包含约  $1\text{--}4 \times 10^{11}$  颗恒星，具有漩涡结构的盘状星系。

银河系可分为四个组成部分，分别是银盘 (disk), 旋臂 (spiral arm), 核球 (bulge) 和银晕 (halo)。

银盘呈扁盘状，包含年轻年老恒星、气体与尘埃，存在恒星形成，天体作圆轨道运动。核球呈花生状，位于银盘中心，包含年轻年老恒星、气体与尘埃，恒星整体无规则轨道运动，也有绕银心的轨道运动。银盘与核球存在恒星形成。银晕近似包裹住银盘的球形，只有年老恒星，无气体与尘埃，恒星形成已经停止了，恒星作无规则轨道运动。

银心定义为银河系的质心和动力学（转动）中心。由于射电源 Sgr A 的位置与旋转中性氢的动力学中心重合，1958 年 IAU 决定采用 Sgr A 的位置作为银河系中心。后来人们发现银河系中心有一超大质量黑洞，即射电源 Sgr A\*。

1944 年巴德 (Walter Baade) 发现星系晕与核球中的恒星明显比盘中的恒星颜色偏红，由此根据金属丰度的大小提出星族的概念。星族 I 是年轻的富金属恒星，主要位于银盘中，如疏散星团。星系盘中的星族 I 恒星绕银心作规则的圆轨道运动。星族 II 恒星是年老的贫金属恒星，主要位于银晕和核球中，如球状星团。恒星晕中星族 II 恒星的绕银心作高偏心率的椭圆轨道运动，且轨道取向是随机的。

金属丰度越低的恒星离银盘面越远，这暗示了银河系的演化。

#### 1.1.2 银盘

银河系的银盘分为薄盘加厚盘，恒星密度分布满足

$$n(R, z) \propto \left( e^{-|z|/h_{\text{thin}}} + 0.02e^{-|z|/h_{\text{thick}}} \right) e^{-R/h_R}. \quad (1.1.1)$$

薄盘包含  $6 \times 10^{10} M_{\odot}$  的恒星和  $0.5 \times 10^{10} M_{\odot}$  的气体与尘埃，B 波段光度为  $2 \times 10^{10} L_{\odot}$ , 质光比为 3. 厚盘恒星质量约  $3 \times 10^9 M_{\odot}$ , B 波段光度  $2 \times 10^8 L_{\odot}$ , 质光比为 15.

通过测量太阳附近的恒星和气体云的视向速度和自行随银经的变化来判断恒星的轨道运动方式（如刚体转动还是较差转动）。在太阳周围 360 度的范围内，恒星的谱线位移表现出周期性的蓝移和红移。在太阳附近，距离银心越远，转动速度越小。

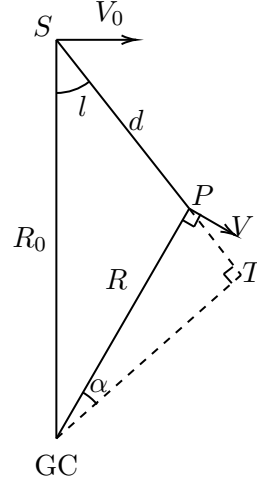


图 1: Oort 公式图示。

设银经为  $l$  的恒星和太阳的转动角速度分别为  $\omega = \frac{V}{R}$  和  $\omega_0 = \frac{V_0}{R_0}$ ，恒星相对于太阳的视向速度为  $V_r = V \cos \alpha - V_0 \sin l$ 。几何关系  $\cos \alpha = \frac{R_0 \sin l}{R}$ 。

那么视向速度为  $V_r = R_0 (\omega - \omega_0) \sin l$ ，切向速度为  $V_t = R\omega \sin \alpha - R_0\omega_0 \cos l$ ，几何关系  $R \sin \alpha = R_0 \cos l - d$ ， $d$  为恒星到太阳的距离，那么切向速度为  $V_t = R_0 (\omega - \omega_0) \cos l - \omega d$

在  $R = R_0$  附近将  $\omega - \omega_0$  泰勒级数展开，

$$\omega - \omega_0 = \left( \frac{d\omega}{dR} \right)_{R_0} (R - R_0) + \cdots \approx \frac{1}{R_0^2} \left[ R_0 \left( \frac{dV}{dR} \right)_{R_0} - V_0 \right] (R - R_0), \quad (1.1.2)$$

对  $R \approx R_0 \gg d$ ,  $R - R_0 \approx -d \cos l$  有

$$V_r = Ad \sin 2l, V_t = Ad \cos 2l + Bd, \quad (1.1.3)$$

根据太阳附近恒星的视向和切向速度，可以求出奥尔特常数：

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \left[ \frac{V_0}{R_0} - \left( \frac{dV}{dR} \right)_{R_0} \right] \approx 15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}. \\ B &= -\frac{1}{2} \left[ \frac{V_0}{R_0} + \left( \frac{dV}{dR} \right)_{R_0} \right] \approx -14 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

从而求出太阳绕银心转动角速度  $\omega_0 = A - B = 29 \pm 1.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}$ ，转动周期约  $2.2 \times 10^8 \text{ yr}$ ，转动速度约  $238 \pm 15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上述数据是本地静止标准速度，太阳相对于该速度还有约  $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的本动速度。

银河系自转曲线和质量分布

测量方法：

$R < R_0$  时测量视线方向上 HI 谱线和 CO 谱线的最大位移，从而测得最大视向速度，而速度满足  $V_r = R(\omega - \omega_0)$ ， $R = R_0 \sin l$ ，进而得到  $\omega(R)$  和  $V(R)$ 。

$R > R_0$  时观察 HII 区的发射线、分子云的 CO 分子毫米波谱线和 Maser 谱线测定视向速度，利用  $V_r = R_0 (\omega - \omega_0) \sin l$  确定  $\omega$ ，利用 HII 区内的高温恒星确定距离，进而确定  $\omega(R)$ 。或者利用甚长基线干涉技术测量 Maser 的自行，如果还能确定距离，就能计算  $V_t$  和  $\omega(R)$ 。

最后发现自转曲线内区刚体转动，外区较为平坦。太阳轨道内包含的质量为

$$M = \frac{R_0 V_0^2}{G} \sim 1 \times 10^{11} M_{\odot}, \quad (1.1.5)$$

银河系可见质量约  $6 \times 10^{10} M_{\odot}$ . 约  $10^{12} M_{\odot}$ ，最可能的解释是银晕中存在大量的暗物质。

银河系旋臂的证认

光学观测：

示踪天体：OB 型星，年轻的疏散星团、发射星云和 H II 区、经典造父变星

限制：星际尘埃消光

射电观测：

示踪天体：HI 区、分子云

方法：测量 21 cm 谱线和分子云毫米波谱线的多普勒位移，与银河系自转曲线比较，从而得到距离、甚长基线三角视差法

限制：气体云的转动是非圆的，在圆运动的同时还有无规则运动

观测结果

天鹅臂、英仙臂、猎户臂、人马臂、盾牌-南十字臂、矩尺臂

旋臂理论解释

首先旋臂不是物质臂。一方面旋臂存在时间较长，如果旋臂由同样的物质构成，较差自转会使旋臂缠绕或消失。另一方面表征旋臂的主要是年轻天体，恒星寿命有限，也会导致旋臂消失。

1963 年林家翘和徐珏生提出密度波理论，认为旋臂实际上是密度波的表现。星系引力势的扰动使天体运动速度发生变化，天体轨道取向相互耦合使物质密度规则变化，从而使密度波在银盘内传播，产生对称的整体旋臂。

旋臂密度波漩涡图样绕银心刚体转动， $\omega = 13.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}$ 。在银河系内区天体的运动速度超过旋涡图样速度，在外区天体比旋涡图样运动得更慢。气体云接近旋臂后碰撞坍缩，形成恒星。

此外还有一种自传播恒星形成理论：气体云坍缩引发的热星辐射和超新星爆发产生激波，压缩周围气体，引发下一代恒星诞生，天体绕银心较差转动形成旋臂。这种方式形成的旋臂维持时间较短，形状也较粗糙。

### 1.1.3 核球和银晕

银河系中心区域是大小约  $6 \times 4 \text{ kpc}$  的棒状结构，核心是盒形/花生形的核球，恒星分布十分密集，密度比太阳附近高  $10^5$  倍，质量约  $10^{10} M_{\odot}$ 。

光学波段，核球附近区域受到星际气体和尘埃的强烈消光，因此红外和射电波段是研究银心的主要途径。

银心区域充满相对论电子和磁场，具有强烈的射电辐射。银心周围 10 pc 区域，电离气体与尘埃组成微型漩涡结构。银心周围 100 pc 区域，延展的纤维状气体与银盘面垂直，反映了银心区域的磁力线。

费米泡？

恒星晕：包含球状星团与晕星。星族 II 恒星以银心为中心球状分布，在椭圆轨道上绕银心旋转，质量约占星系恒星总质量的 1%。

气体晕：弥漫的 X 射线辐射表明在银晕中存在大量的热气体 ( $T \sim 10^6 \text{ K}$ )，质量约  $(2.5 \pm 1) \times 10^{10} M_{\odot}$ 。

暗物质晕：由银河系的自转曲线得知，银晕中的不可见物质质量远超过银河系可见物质质量。暗物质在所有波段都不产生辐射、仅有引力与弱相互作用。

暗物质可能的成分：

1. MACHOs (Massive Compact Halo Objects), 包括褐矮星、行星、中子星、黑洞等。

2. WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), 亚原子非重子物质。

可以利用微引力透镜研究暗物质含量。可以研究 WIMPs 与原子核碰撞产生的热辐射, 两个 WIMPs 湮灭产生的次级粒子 (伽马射线, 正电子, 中微子等)。

#### 1.1.4 银河系的起源

pdf84 ©C. Chiappini 有两幅图描绘星系图景, 可以抄一下。

Conroy et al. arViv:2204.02989 有一副晕、厚盘、薄盘元素丰度的图

中小质量恒星演化产生 C, N, 产生行星状星云。大质量恒星演化产生 Ib, Ic, II 型超新星, 产生 O, 白矮星双星演化产生 Ia 型超新星, 产生 Fe.

记得把这段移到恒星中 pass

整体坍缩模型: 银河系起源于一个几百万光年大小的原初气体云。气体云沿转动轴方向坍缩, 通过耗散过程形成扁平盘, 在大约 2 亿年内形成致密核球和转动的气体薄盘。与此同时, 气体在坍缩过程中形成球状星团和第一代恒星。这些天体继承了坍缩云块的运动特征, 表现为晕星的无规则运动。大质量恒星发生超新星爆发, 气体中重元素增丰。第二代恒星开始在盘上形成, 具有规则的圆轨道特征。后面形成的恒星有越来越高的金属丰度。

问题:

该模型预言自外向内恒星年龄和金属丰度的连续变化, 但是银河高纬度地区有金属丰度反常的恒星晕中的恒星有净的反向转动速度

球状星团的年龄比该模型预言的要高一个量级。

并合和吸积模型: 银河系由许多小星系并合而成。原初的小团块已经经历了不同程度的恒星形成和演化过程, 因此具有不同的金属丰度。星系盘是通过持续的并合和吸积过程形成的——当吸积气体向内运动时, 径向运动的耗散和环向运动的加速导致气体盘的形成。

近年来巡天观测发现, 银河系厚盘形成于 130 亿年前。110 亿年前, 银河系与一矮星系并合, 形成了内晕。接下来的五六十亿年中, 银河系经历持续的金属元素富集。形成厚盘的气体在 80 亿年前耗尽, 新的气体开始从银河系周围聚集, 银河系薄盘恒星开始形成并持续至今。

## 1.2 星系概述

### 椭圆星系

星系中心最亮, 亮度向边缘递减。我们可以用面亮度 (单位平方角秒的星等) 描述亮度, 多数椭圆星系满足

$$I(R) = I_0 \exp \left[ -7.67 \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}} \right], \quad (1.2.1)$$

### 漩涡星系

同样有面亮度分布, 不过椭圆星系是  $\exp \left( - \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}} \right)$ , 盘星系是  $\exp \left( - \left( \frac{R}{R_e} \right) \right)$ .