

# 普通天文学知识总结

## CHAPTER I 观测恒星

**List:** 如何获取天体信息并测量物理参数（距离、大小、光度、温度、组成、质量）？如何对恒星进行分类

### 1.1 辐射

1.1.1 人们获得天体信息渠道有：电磁辐射、宇宙线、中微子、引力波

电磁辐射波长由长到短可以分为：射电、红外、光学、紫外、X射线、gamma射线

电磁辐射由光子构成  $E = h\nu$ ，频率高，能量高

1.1.2 黑体：处于热动平衡状态的理想天体（吸收所有外来辐射并全部再反辐射）

大部分正常恒星的连续辐射可以近似看作黑体辐射

维恩定律  $\lambda_{peak}T = 0.29(cmK)$ ，温度越高，最强辐射的波长越短

太阳的辐射峰值波长在可见光波段

斯蒂芬-玻尔兹曼定律  $F = \sigma T^4$ ，含义：单位时间从黑体单位面积上辐射的能量

平方反比定律  $F = \frac{L}{4\pi d^2}$ ，单位时间单位面积收到的辐射强度与到光源的距离成反比

1.1.3 基尔霍夫定律：热+致密（高温+光学厚）=连续谱；热+稀薄=发射线；冷+稀薄=吸收线

//太阳光谱以连续谱和吸收线为主，气体星云M17以发射线为主

光谱反映恒星物质组成，同时与温度、密度相关

多普勒位移：恒星远离观测者，波长变长，红移。当 $V_r \ll c$ 时， $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_r}{c}$

**Wrap up** 利用光谱信息：连续谱形状→温度；谱线强度→温度+化学成分；谱线宽度→温度、密度、速度；谱线位移：视向速度

## 1.2 恒星测距

测距方法：三角视差法//周年视差法：以地日长轴为基线

秒差距：周年视差为1"的天体距离

可用条件：目标恒星明亮、自行大、角距大的双星

## 1.3 恒星大小

测量方法：直接测量

(1) 空间望远镜直接成像法 注意望远镜衍射极限 $\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$

(2) 地面望远镜光学干涉

(3) 掩食法

间接测量  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$  通过测量光度和表面温度得到

# 1.4 恒星光度

## 1.4.1 亮度与光度：

亮度L是天体单位时间内辐射的总能量；取决于恒星本身

亮度F是在地球上单位时间单位面积接收到的天体辐射量；取决于天体亮度、距离和星际物质对辐射的吸收和散射

## 1.4.2 视星等： $m_1 - m_2 = -2.5 \log(F_1/F_2)$ ，亮度的衡量

根据不同观测波段，分为目视星等、光电星等

全波段观测得到的星等称热星等  $m_{bol} = m_V + BC$

多色测光系统：U-紫外，B-蓝光，V-可见光，R-红光，I-红外

## 1.4.3 温度与颜色：

恒星温度越高，颜色越蓝（由维恩定律）

色指数：不同波段测量星等之差，例如B-V

天体颜色与连续谱形状取决于表面温度，因此色指数大小反映天体温度

//一般而言，色指数B-V与表面温度呈现负相关

## 1.4.4 绝对星等：实际上是光度而非亮度的衡量

定义：天体位于10pc距离处的视星等

$$M - m = 5 - 5 \log d(pc)$$

$$M_1 - M_2 = -2.5 \log(L_1/L_2)$$

**Wrap up** 通过星等系统可以获得：色指数→表面温度；亮度+距离→光度

光度+表面温度→半径

## 1.5 恒星温度

**1.5.1 哈佛光谱分类：**按温度由高到低分为O、B、A、F、G、K、M

恒星的特征谱线提供了恒星表面温度和化学组成的信息

原理：不同温度下元素电子能级分布不同，特征谱线强度不同

谱线等效宽度+生长曲线可确定大气中元素丰度

**1.5.2 赫罗图：**恒星光度与表面温度的分布图

//横坐标：温度、光谱型、色指数；纵坐标：光度、绝对星等

等半径线：由

$$M - M_{sun} = -2.5 \log(L/L_{sun}) = -5 \log(R/R_{sun}) - 10 \log(T/T_{sun})$$

$$\log(R/R_{sun}) = 8.47 - 0.2M - 2 \log T$$

**1.5.3 叶凯士光谱分类**

谱线等值宽度：与吸收（发射）谱线轮廓和连续谱之间所包围的面积相当的、归一化强度为1的矩形宽度。//影响因素：自然致宽、压力致宽、多普勒致宽、湍动致宽

在哈佛光谱分类后加罗马数字I-IV，数字越大，谱线越宽，光度越小

Ia-最亮超巨星；Ib-次亮超巨星；II-亮巨星；III-巨星；IV-亚巨星；V-矮星；VI-亚矮星；VII-白矮星

压力致宽：气体压力取决于表面重力  $g = \frac{GM}{R^2}$ ，R越大，对应L越大， $\rho$ 越小，宽度越小，光度级数值越小

叶凯士分类可以确定恒星在赫罗图上的位置（表面温度和光度）

**Wrap up** 通过光谱型可以获得：表面温度→表面亮度，大气压强→表面引力→半径；

亮度+半径→距离

## 1.6 恒星质量

**1.6.1 双星：**彼此引力作用下以椭圆轨道相互绕转的两颗恒星组成的双星系统

//银河系大部分恒星隶属双星、聚星系统中

恒星质量测量方法：
$$\frac{M_1+M_2}{M_{sun}} = \frac{a^3}{T^2}$$

(1) 双星半长径 $a$ 、周期 $T$ 可测； (2) 已知一颗恒星质量或质量比

**1.6.2 其他方法：**目视双星、天体测量双星（其中一颗太暗）、分光双星（多普勒频移）、食双星（互相交食的亮度变化）

**1.6.3 不同主序星在H-R图上分布：**沿一定曲线，可通过观测到的温度、光度反推

//主序星高质量高温明亮，低质量暗淡低温

---

## CHAPTER II 恒星内部结构

**List：**恒星定义？恒星发光原理？恒星统计规律？恒星内部物质状态与分布？恒星模型的检验？

### 2.1 恒星内部结构

**2.1.1 稳定气体球中的流体静力学平衡**

压强与引力的抗衡：
$$dP/dr = -GM(r)\rho/r^2$$

一般而言，恒星从表面到中心，密度、温度、压强单调上升

### 2.1.2 恒星质量与光度

解释：质量越大的恒星引力越强，要求内部的压强越高，由理想气体状态方程  $pV = NRT^3$  表明内部温度越高，对应光度越高

## 2.2 恒星能源

### 2.2.1 引力收缩机制

辐射 → 压力减小 → 收缩 → 温度升高 → 继续辐射

// 太阳内部压强  $p \approx 10^{14} Pa$ ;  $T \approx 5 \times 10^6 K$ ; 可知恒星内部处于高温、高压等离子体状态

### 2.2.2 热核反应

太阳内部温度不足以发生核聚变；由量子力学，即使质子动能不足以克服势垒，也有概率穿越它

氢燃烧：质子-质子链（主要发生于  $M < M_{sun}$  的恒星）碳氮氧循环（主要发生于  $M > M_{sun}$  的恒星）

恒星内部核反应速率对温度十分敏感  $\epsilon \propto T^4(PP), T^{20}(CNO)$

$\epsilon$  机制：T 增大， $\epsilon$  增大， $\rho$  增大，R 增大，T 降低

### 2.2.3 内部结构变化

由于更重元素燃烧要求更高的核心温度，热核反应导致恒星内部形成洋葱状结构；恒星核心区形成铁后，聚变由放热转为吸热，核反应停止（因此最内部结构为铁或更轻的元素）

## 2.3 恒星标准模型

恒星内部平衡条件

(1) 质量连续性方程 (质量与密度)  $dM_r/dr = 4\pi r^2 \rho$

(2) 流体静力学平衡 (压强与质量)  $dP/dr = -GM_r \rho / r^2$

(3) 能量守恒:  $L$  单位时间通过半径为 $r$ 的球面的能量;  $\epsilon$  单位物质在单位时间产生的能量

$$dL_r/dr = 4\pi r^2 \rho \epsilon$$

(4) 能量传输  $dT/dr = dT/dr|_{\text{rad}} = dT/dr|_{\text{conv}}$

物理参数: 压强、密度、温度、质量、光度、产能率、不透明度

## 2.4 恒星内部物态

压强来自两个部分, 气体压强+光子辐射压强  $P = P_g + P_{\text{rad}}$

**2.4.1 非简并气体:**

以理想气体为例  $P_g = nkT = \rho kT / \mu m_H$ , 其中 $\mu$ 平均分子量,  $m_H$ H原子质量

完全电离气体  $P_g = \rho kT(2X + 3Y/4 + Z/2) / m_H$ , 其中 $X, Y, Z$ 分别表示H、He、重元素质量百分比

$$P_{\text{rad}} = aT^4/3$$

**2.4.2 简并气体: 低温高密**

对非相对论电子  $P_e \propto \rho^{5/3}$ ; 相对论电子  $P_e \propto \rho^{4/3}$

$$\text{对离子 } P_e = \frac{\rho kT}{m_H} (X + Y/4)$$

//由于抗压缩性,  $P$ 与 $T$ 无关

## 2.5 恒星内部能量传输

恒星内部热量传输的三种形式：辐射、传导、对流（核心区主要通过辐射和对流）

**2.5.1 辐射：**恒星内部冷物质通过吸收热区的光子而加热

$$\text{温度梯度公式 } dT/dr = -(3/4ac)(\kappa\rho/T^3)(L_r/4\pi r^2)$$

$\kappa$ 不透明度的震荡机制： $k \downarrow \rightarrow dL \uparrow \rightarrow T_c \downarrow \rightarrow P \downarrow \rightarrow R \downarrow \rightarrow k \uparrow$

**2.5.2 对流：**气体中冷热区域之间大规模的循环流动

条件：随着恒星内部不透明度或产能率增大，温度梯度增大，辐射平衡不稳定；热气体膨胀上升，冷却后下沉，形成物质流动的循环和热量的传递

//温度梯度大于某值时对流，反之辐射

## 2.6 不同质量主序星内部结构

**2.6.1 较大质量主序星** ( $M > 1.5 - 2M_{sun}$ )

对流核区+辐射包层；核心区发生CNO循环核反应；能量产生于较小的对流核

**2.6.2 较小质量主序星** ( $0.8M_{sun} < M < 1.5 - 2M_{sun}$ )

辐射核区+对留包层；核心区发生PP链核反应；能量产生于较大的辐射核

**2.6.3 极低质量主序星** ( $0.1M_{sun} < M < 0.8M_{sun}$ )

整体对流、低温

## 2.7 太阳内部与磁场活动

**2.7.1 黑子：**由本影和半影组成，温度3000-4500K

原因：黑子下方的强磁场阻碍了物质对流，使得热量难以到达该处

**2.7.2 日震：**太阳对流区的扰动中内部产生各种形式的波动，表现为太阳表面气体起伏震荡和亮度变化

原理：震荡频率可以精确测定；依赖于内部结构

**2.7.3 太阳中微子：**地球收到的太阳中微子几乎实时产生，而光子被束缚在太阳内部

中微子振荡：太阳内部只产生 $\nu_e$ ，在离开太阳后转化为 $\mu$ 中微子和 $\tau$ 中微子

---

## CHAPTER III 恒星演化

**List:** 恒星演化原因？演化阶段？演化差异？演化结局？环境如何影响演化以及其理论检验

### 3.1 主序星演化

**3.1.1 罗素-沃格特原理：**如果恒星处于流体静力学平衡和热平衡，而且它的能量来自内部的核反应，它们的结构和演化就完全唯一地由初始质量和化学丰度决定。

核时标：通过核心区核反应的产能时间  $t_n = E/L = (10^{10} yr)(M/M_{sun})(L/L_{sun})^{-1}$

热时标：光子从恒星内部到达表面的时间

$$t_{th} = (0.5GM^2/R)/L = (2 \times 10^7 yr)(M/M_{sun})^2(R/R_{sun})^{-1}(L/L_{sun})^{-1}$$

动力学时标：内部压力突然完全消失，引力作用下恒星坍缩时间

$$t_d = R/v = (27 min)(R/R_{sun})^{3/2}(M/M_{sun})^{-1/2}$$

**3.1.2 主序星性质**

均匀初始化学组成、核心H燃烧、 $0.08M_{sun} < M < 100M_{sun}$ 、  
 $L \sim M^{2.5-4}$ ,  $R \sim M^{0.5-1}$

### 3.1.3 主序星演化

零龄主序：H-R图主序带最左侧，当核心开始H燃烧且流体静力学平衡时

演化使核心区H转变为He：n减少，P减小，核心收缩，密度升高，温度升高，产能率升高，光度升高，包层压力增大，恒星半径变大

//在赫罗图上表现为：L增大，半径增大，温度降低

主序演化结束后恒星核心形成一个等温氦核，质量上限0.1M

## 3.2 主序后演化

### 3.2.1 类太阳恒星

(1) 脱离主序：亚巨星支

核心收缩，壳层H燃烧；V增大，表面温度T降低；H-R图上右移

//镜像原理：壳层燃烧时，核收缩包层扩张；核扩张包层收缩

(2) 红巨星支

核心进一步收缩，核心温度升高，电子简并，壳层H燃烧产能率增大；R变大，表面温度T降低，对流区增大；H-R图右上方林中四郎线移动

(3) 氦闪

He开始燃烧，核心He爆燃，简并接触；H-R图的红巨星顶点

(4) 水平支

核心He燃烧，壳层H燃烧；核扩张，核心T减小，包层收缩，表面T增大；H-R图左下方移动至水平支

### (5) 渐进巨星支

He枯竭，壳层H He燃烧，L增大，R增大，T减小；H-R图右上方移动成为红超巨星

热脉冲：He闪恒星脉动，抛射红巨星包层，CO核；H-R图渐进巨星支顶点；

### (6) CO核坍缩成白矮星

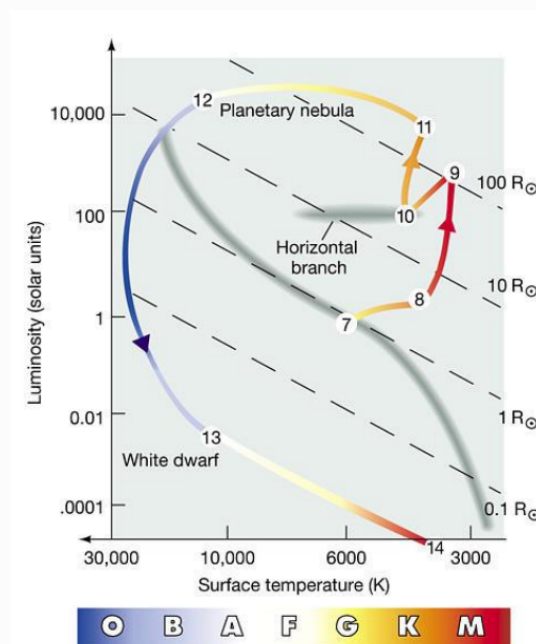
核心收缩，T增大，坍缩成白矮星；H-R图向左方移动

### (7) 白矮星冷却

冷却成黑矮星；H-R图右下方移动

行星状星云：低质量恒星死亡时抛射气体包层，受中心高温白矮星辐射电离发光

### Wrap up:



较高质量恒星与低质量恒星演化主要区别：内部温度更高，主序寿命更短；He不简并；核心区能量传递主要依靠对流

### 3.2.2 中等质量恒星

1.脱离主序，壳层H燃烧——2.核心He平稳燃烧——3.壳层He、H燃烧——4.红超巨星——5.白矮星——6.黑矮星

### 3.2.3 高质量恒星

观测表现：O型星——蓝超巨星——黄超巨星——红超巨星——超新星

物理过程：核心H——壳层H——核心He——壳层He、H——核心C——壳层C、He、H……  
——Fe核

超新星爆发：核反应停止，Fe、He核光致离解——坍缩——中子简并形成中子星

爆发产生致密星+超新星遗迹

### 3.2.4 特大质量恒星

强星风导致能量损失形成沃尔夫-拉叶星 (WR)

观测表现：O型星——蓝超巨星——红超巨星——WR星——Ib/Ic型超新星——中子星/黑洞

Wrap up:

恒星初始质量 ( $M_{\odot}$ )	演化结局
$M < 0.01$	行星
$0.01 < M < 0.08$	褐矮星
$0.08 < M < 0.25$	He白矮星
$0.25 < M < 8$	CO白矮星
$8 < M < 10 (?)$	ONeMg白矮星
$10 < M < 20 (?)$	超新星→中子星
$M > 20 (?)$	超新星→黑洞、中子星?

### 3.2.5 核坍缩超新星

特征：极大光度，爆发前后光度变化大

分类：I型与II型

光谱分类	Ia	Ib	Ic	II
谱线	无H线			有H线
	有Si线	无Si线		
		有He线	无He线	
极大星等	-19	-17	-16	-16~-17
分布	椭圆星系与旋涡星系	旋涡星系（恒星形成区）		
前身星	白矮星双星	沃尔夫-拉叶星	超巨星	
爆发机制	白矮星的核爆炸	大质量恒星的核坍缩		
致密产物	无	中子星或黑洞	中子星	

59

超新星遗迹：超新星爆发抛出物质在向外膨胀过程中与星际物质、磁场作用形成的气体星云

### 3.2.6 元素合成

原初元素大部分形成于宇宙大爆炸初期；比Fe轻的元素来源于恒星内部的核合成；比Fe重的元素来自中子俘获反应（快过程：超新星爆发；慢过程：恒星内部）

## 3.3 恒星演化观测证据

### 3.3.1 星团

星团是靠引力束缚的恒星系统，起源于同一个分子云，因此成员星通常具有相同的年龄。

疏散星团：不规则，年轻恒星，银道面附近

球状星团：球形或扁球形，年老贫金属恒星，银心周围

### 3.3.2 星团H-R图与恒星演化

利用同一星团中恒星具有相同距离、年龄、初始化学组成但质量不同的特点，分析质量对演化速度的影响：

星团在HR图上脱离主序点的位置反映了星团年龄核距离

### 3.3.3 脉动变星

造父变星：脉动周期越长，光度越高；光变主要来自表面温度变化且与半径变化反相位

原因：内部不稳定性，引力压力失衡

造父变星可以判断距离：周期 $P$ ——绝对星等——观测视星等——距离

## 3.4 致密双星演化

### 3.4.1 洛希瓣

由临界等势面包围的空间为洛希瓣。

当子星充满洛希瓣后，在内拉格朗日附近的物质处于不稳定状态，受到小扰动就会流向伴星，产生物质交流。

### 3.4.2 双星分类

不相接双星、半相接双星、相接双星

### 3.4.3 物质运输

(1) 星风俘获； (2) 洛希瓣渗溢

//大陵佯谬：主星主序星+伴星亚巨星，质量小的伴星演化快？

亚巨星前身大质量恒星，先演化充满洛希瓣——物质传输——质量逆转

### 3.4.4 其他证据

行星状星云形成：双极结构

蓝离散星形成：星团中比脱离主序点更蓝、更亮的恒星（双星碰撞合并、物质传输）

Wrap up:

# 小 结

- 恒星在主序阶段以核心氢燃烧作为能源。
- 当核心氢枯竭后，恒星脱离主序，依次燃烧更重的元素。
- 不同质量的恒星形成不同质量和化学组成的核。
- 恒星演化的结局是产生致密星。
- 不同年龄的星团提供了检验恒星演化的证据。
- 造父变星的周光关系是测量距离的重要工具。
- 双星演化提供了形成特殊天体的渠道。

---

## CHAPTER IV 致密星

致密星：恒星死亡后的产物，没有核心热核反应的能源，体积极小，引力极强

**List:** 性质？结构？如何观测？如何演化？

### 4.1 白矮星

1. 观测线索：观测到第一颗白矮星，既热又暗

对白矮星（简并气体）： $R \propto M^{-1/3}$

2. 基本参数：质量： $0.6M_{sun}$  半径： $5 \times 10^8 - 10^7 cm$  密度： $10^5 - 10^7 g/cm^3$

自转周期： $P > 10s$  外面包围着为50km由氢组成的大气

//随着白矮星质量增大，简并气体运动变成相对论性，引力比压力增大得更快，由此达到白矮星质量上限

### 3. 观测方式：

i. 通过白矮星冷却产生光学、紫外辐射（孤立白矮星、无物质交流的白矮星双星）

ii. 通过白矮星吸积产生紫外、X射线、爆发（发生物质交流的白矮星双星）

//激变变星：白矮星与低质量恒星构成的半相接双星，白矮星通过吸积伴星的物质产生（紫外和X射线）辐射。可以分为弱/强磁场白矮星

弱磁场白矮星中，

新星：在几天到几星期内亮度增加7-16星等，然后缓慢下降，经几个月或几年后回复到原先的状态。辐射波段在光学、紫外波段。

再发新星：物质传输导致新星爆发反复发生。典型的爆发间隔为10-100年。

//观测规律：菲利普关系：光度衰减越快，峰值光度越低

4. 理论模型：吸积白矮星的质量达到质量上限（钱德拉塞卡极限），白矮星内部C和O发生爆发性燃烧，产生Ni。整个星体被炸光，残骸高度向外膨胀。

## 4.2 中子星

对坍缩质量高于钱德拉塞卡极限的恒星，形成中子星：

1. 形成机制：逆 $\beta$ 衰变

2. 结构：中子星可以看作一个巨原子核，由简并态中子组成（中子简并压与引力抗衡）

由外至内依次为：表层大气、外壳（固态金属）、内壳（原子核、游离中子、电子）、内部（超流中子和超导质子）、核心（超子、夸克）

同样，质量越大、半径越小；有质量上限（奥本海默极限质量）

3. 观测方式：最强波段X波段（在地面无法观测）

4. 观测表现：高温、快速自转、强引力场、强磁场

脉冲星是中子星：由脉冲时间确定其大小，周期规律确定其是白矮星还是中子星

5. 辐射机制：快速自转+强磁场=强电场 --> 射电辐射

要求：灯塔效应（强磁场、倾斜转子）

为什么快速自转？为什么具有强磁场？为什么转轴不与磁轴重合

存在的中子星系统：双中子星系统、脉冲星-行星系统、强磁星、X射线双星

其中X射线双星能量来源：吸积物质引力势能——动能——热能——辐射

分为：高质量（年轻、强磁场）、低质量（年老、弱磁场、X射线暴）

## 4.3 黑洞

1. 引力半径：光子无法逃逸的半径（对于史瓦西黑洞  $R_g = R_s$ ）

致密程度表示： $R_s/R$

2. 黑洞无毛定理：形容黑洞的物理参数只有质量、角动量、电荷

3. 分类：

只含m：史瓦西黑洞 含m和Q：莱斯纳-诺德斯特洛姆黑洞 含m和L：克尔黑洞 含m、L、Q：克尔-纽曼黑洞

(1) 史瓦西黑洞：中心起点 < 视界 ( $R_s$ ) < 光层

(2) 克尔黑洞：视界半径  $r_h < R_s$  无限红移面半径  $r_{st}$

4. 视界：物质和辐射能由视界以外进入其内，但不能反过来。

黑洞附近现象：动钟变慢、动尺变短

5. 引力红移： $\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{1}{\sqrt{1-R_s/R}}$

6. 参考系拖拽：处于转动状态的质量会对其周围的时空产生拖拽，黑洞能层内的时空必须和它一同转动

7. 黑洞蒸发：真空中能量涨落导致基本粒子形成。量子真空被强引力场极化后虚粒子对--> 实粒子，其中反粒子被吸收使黑洞质量减小、正粒子逃逸带走黑洞能量

8. 黑洞观测：直接证据：视界 间接证据：引力场、光线偏移和红移、物质吸积、黑洞并合 引力波

其中一种观测途径为寻找黑洞X射线双星

途径：搜寻质量超过中子星质量上限的致密天体

X射线辐射——确定中子星或黑洞

光学观测其轨道运动——确定质量

---

## CHAPTER V 恒星形成

**List:** 星际介质成分、性质、观测方式？恒星形成环境、原料、过程？

### 5.1 星际气体

#### 5.1.1 星际物质与星际气体

星际物质：分布在星际空间的物质，包括星际气体、星际尘埃、宇宙线与星际磁场（约为银河系恒星质量的10%，主要分布在银道面1000ly的范围内）

星际气体：主要由H构成，空间分布不均匀（不同环境下H的存在方式不同）

#### 5.1.2 电离氢气体

发射星云：被高温（O）恒星紫外辐射电离的星际物质，称为HII区

特征：具有（容许和禁戒）发射线，颜色偏红

//容许谱线：星云原子中电子受高温恒星紫外辐射而激发或电离，电子复合或退激发产生（偏红） $H_{\alpha}$ 发射。

//禁戒谱线：发射星云低温、低密度的部分产生偏绿的辐射

### 5.1.3 中性氢气体

星际吸收线：星际气体中原子受恒星紫外光子的电离而产生的吸收线

星际气体低温——窄吸收线；星际气体不均匀、非静态

### 5.1.4 分子氢气体

暗星云主要由分子氢构成（少量尘埃与复杂分子）

分子辐射：（1）电子跃迁：紫外和可见光波段

（2）分子振动跃迁：红外波段

（3）分子转动跃迁：射电波段

//H分子不发射射电辐射，其他分子发射线大部分是因为氢分子热运动碰撞激发产生的。

分子云：星际分子聚集成团形成分子云；占据银盘内1%空间，占星际气体50%质量

巨分子云：10%的分子云足够致密，可以形成恒星

## 小结：星际气体的主要性质

成分	观测证据	温度 (K)	密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )	质量百分比
分子云	红外辐射, 紫外吸收线, CO射电和红外辐射	10-50	$10^2$ - $10^9$	40%
HI 区	21厘米谱线, 紫外吸收线	50-100	1-50	40%
HII 区	光学和红外发射线, 射电连续辐射	$10^4$	$10$ - $10^4$	极少
云际气体	21厘米谱线	$7,000$ - $10^4$	0.2-0.3	20%
云际冕气	X射线 (OVI) 辐射	$10^6$	$10^{-4}$ - $10^{-3}$	0.1%

## 5.2 星际尘埃

### 5.2.1 证据：星际消光与红化

星际尘埃对星光的吸收和散射造成星光强度的减弱，对蓝色光散射较多，因此星光颜色偏红

$m = M - s + 5 \log d + A_V$ ，其中银道面附近消光量为  $A_V/d = 2^m \text{kpc}^{-1}$

### 5.2.2 性质

成分：硅或石墨微粒，外层被冰或二氧化碳包裹

//星光极化现象是由于长条形尘埃

形成：部分形成于红（超）巨星的外层大气（低温气体凝结），在恒星演化晚期被吹向星际空间

//星际尘埃提供了原子聚集成分子的场所；屏蔽了星光中的紫外线，使分子免遭瓦解

### 5.2.3 观测

(1) 光学观测：

两种表现：反射星云：星云通过尘埃反射附近的热星星光而发光，颜色偏蓝

暗星云：大量尘埃遮挡星云内部或后面恒星的星光

(2) 红外观测：

观测的是尘埃粒子受宇宙线或附近热星辐射的加热后产生红外热辐射

## 5.3 恒星形成

### 5.3.1 观测线索

(1) 康德-拉普拉斯星云说：

太阳系起源于旋转的星云，由于冷却凝缩，旋转加快，离心力造成逐层分裂，中心凝聚成太阳

(2) 观测：

观测到分子云气体+原恒星——气体云引力坍缩形成恒星

坍缩原因：金斯不稳定性（质量足够高，引力>压强）

金斯质量： $M_J \approx 30 \left[ \frac{T^3}{n} \right]^{1/2} M_{sun}$

恒星在巨分子云中成群形成

触发坍缩的机制：(a) 激波压缩——压缩星云，密度增大——链式反应

(b) 星云碰撞——辐射——冷却——坍缩

(c) 磁场耗散

最后云核坍缩——原恒星——主序星

### 5.3.2 恒星形成理论

#### 1. 小质量恒星形成

(1) 分子云分裂阶段：分子云缓慢等温收缩——金斯质量减小，分裂成更小的云核并加快旋转——云核绝热坍缩——金斯质量增大，云核停止分裂开始坍缩

(2) 云核坍缩阶段：形成原恒星

(3) 原恒星成长阶段：吸积盘吸积气体——转动+磁场带走角动量——质量增大

(4) 主序前星阶段：质量不再增大，温度不足以点火H；吸积物质被辐射和星风驱散

(5) 零龄主序星阶段：热核反应开始

#### 2. 大质量恒星形成

云核直接坍缩 or 竞争吸积 or 小质量原恒星并合

### 3. 极小质量恒星/褐矮星形成

分子云核分裂 or 原恒星盘碎裂 or 多个原恒星相互作用抛出物体 or 原恒星核光致腐蚀

角动量损失：恒星形成过程中角动量大量损失

角动量转移：转动星云气体尘埃凝聚成星子——星子汇聚成行星

---

## CHAPTER VI 银河系结构

**List:** 银河系组成、结构？超大质量黑洞证据？银河系形成？

星系：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

### 6.1 银河系结构

#### 6.1.1 银河系基本信息

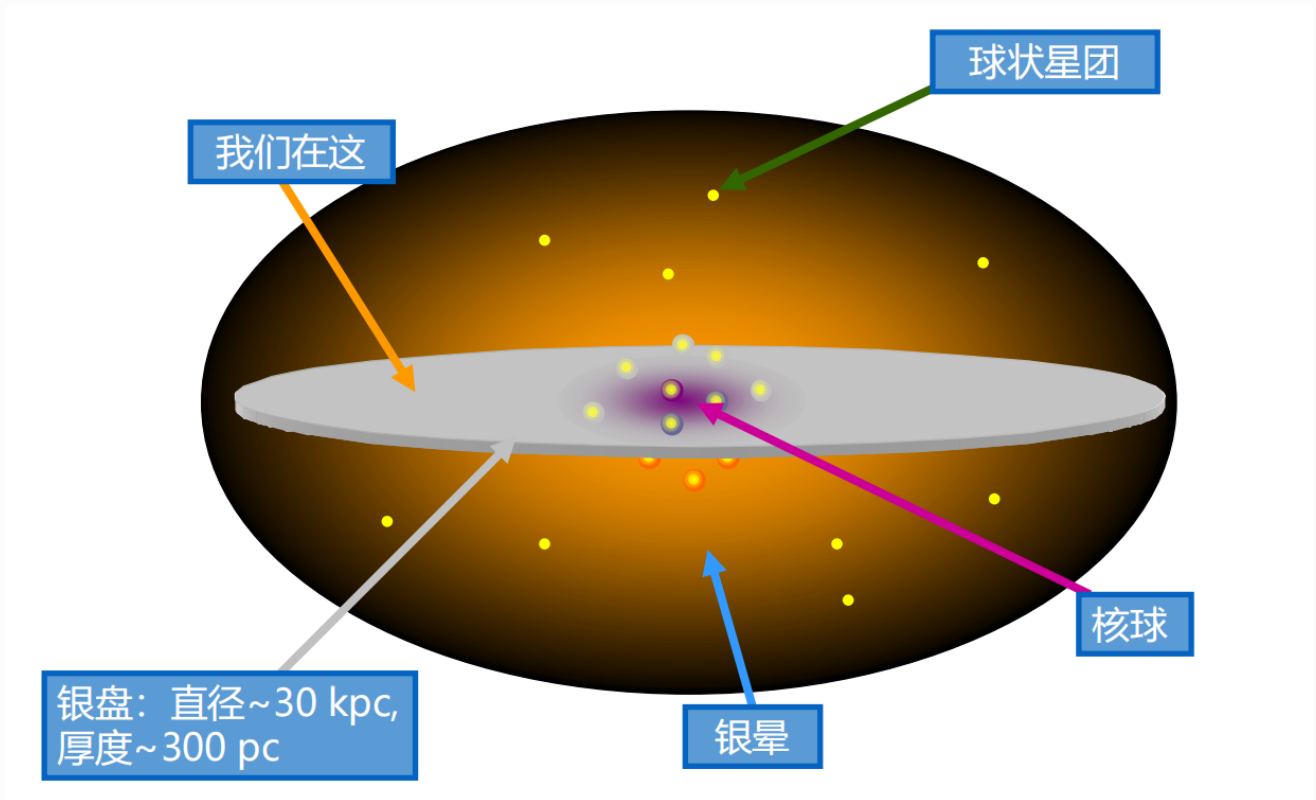
银河是天空中的一个环带，在人马座附近最亮、最宽，它的中心线近似为天球上的一个大圆。

银河系扁盘状，太阳位于中心附近

#### 6.1.2 银河系结构

银河系：直径20w光年、包含 $10^{11}$ 量级的恒星、具有旋涡结构的盘状星系

包括：银盘（旋臂）、核球、银晕



### 6.1.3 银道坐标系

原点：观测者 坐标系平面：银道面 （银经，银纬）

如何确定银心：射电源SgrA的位置

银心：银河系的质心和动力学中心

### 6.1.4 星族

星系晕与核球中的恒星比盘中的恒星颜色偏红

根据金属丰度（Fe与H的丰度比）大小提出星族的概念：

1. 星族I：年轻、富金属恒星，主要位于银盘中。如疏散星团。
2. 星族II：年老、贫金属恒星，主要位于银晕和核球中。如球状星团。

盘内星族I绕银心作规则圆轨道运动；晕中星族II绕银心作高偏心率的椭圆轨道运动，轨道取向随机。

Fe来源于超新星爆发，其含量大体反映天体的年龄；金属丰度越低的恒星离银道面越远

## 6.2 银盘

### 6.2.1 银盘构成

构成：星族I恒星、气体、尘埃；薄盘+厚盘

质光比：某个空间体积内的质量与光度之比 $M/L$ ，取决于恒星质量在总质量中所占的比例和恒星质量分布

### 6.2.2 银河系转动

通过测量太阳附近的恒星和气体云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。

恒星谱线位移表现出周期性蓝移与红移：银河系较差自转

离银心越远，转动速度越小

自转曲线：内区刚体转动，外区较为平坦

外区曲线特征暗示：银晕中存在大量暗物质

### 6.2.3 旋臂

#### 1. 光学观测

(1) 示踪天体：O、B型星，年轻疏散星团，发射星云，HII区、造父变星

(2) 方法：标准烛光、造父变星周光关系

(3) 限制：星际尘埃消光

#### 2. 射电观测

(1) 示踪天体：HI区、分子云

(2) 方法：三角视差法、多普勒频移

(3) 限制：非圆无规则运动

//太阳在猎户臂上

### 3. 理论解释

(1) 不是物质臂；

(2) 密度波理论：星系引力势扰动、轨道取向耦合、密度波传播导致物质压缩和恒星形成  
物质趋向于最低能态——轨道收缩——角动量损失，通过密度波传递

(3) 自传播恒星形成理论：下一代恒星诞生较差转动，——高密恒星和星际气体旋臂

密度波理论	自传播恒星形成理论
旋臂→恒星形成	恒星形成→旋臂
对称的整体旋臂 (the grand design)	粗糙的、绒毛状旋臂 (片断)

## 6.3 核球和银晕

### 6.3.1 核球

中心棒状结构、核心是盒形/花生形核球、恒星分布密集

光学观测：受星际气体、尘埃消光影响严重

红外观测、射电观测：主要途径

观测结果：银心是一个强射电源（人马座A\*）——超大质量黑洞

### 6.3.2 银晕

恒星晕：球状星团和晕星，年老的星族II恒星，以银心为中心球状分布

气体晕：银晕中存在大量的热气体

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

暗物质特点：不产生辐射，仅有引力和弱相互作用

可能的成分：MACHOs, WIMPs

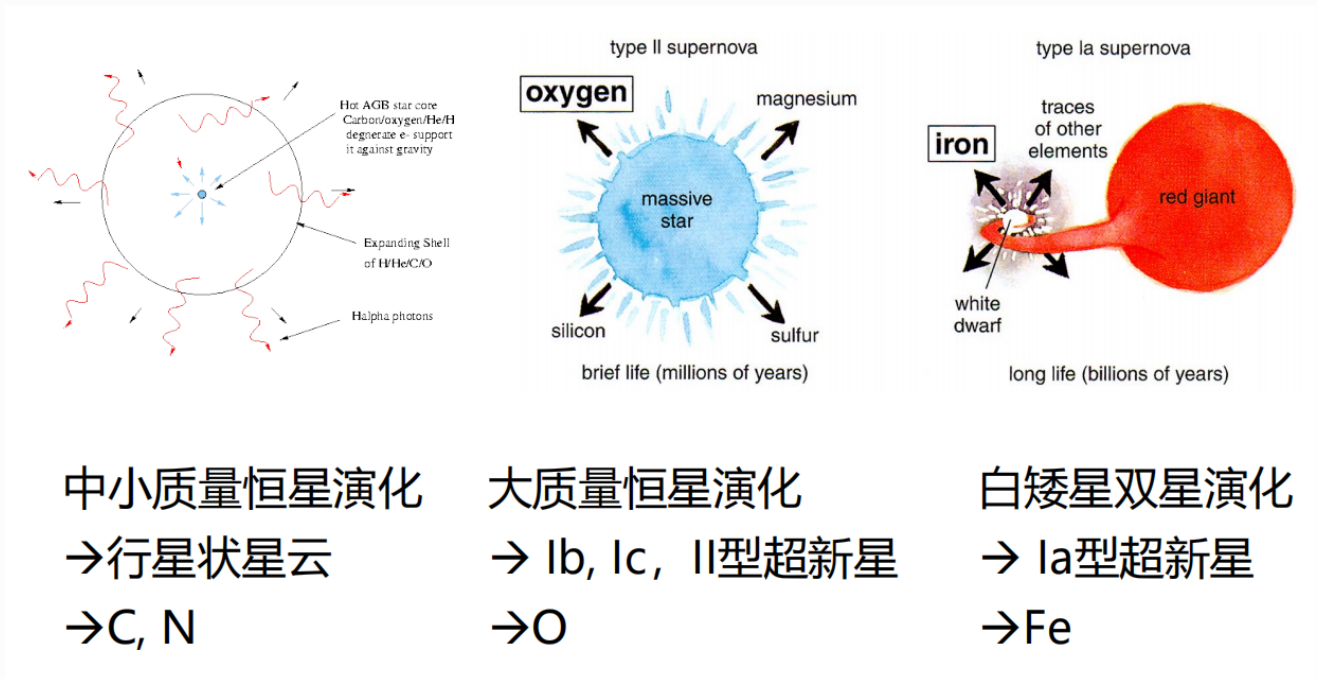
## 6.4 银河系起源

### 6.4.1 银河系结构特征

银盘	银晕	核球
扁盘状	近似球形	花生形
包含年轻和年老 (星族I) 恒星	只包含年老 (星 族II) 恒星	包含年轻和年老 (星族I) 恒星
包含气体和尘埃	无气体和尘埃	包含气体和尘埃
恒星形成	过去10亿年中没 有恒星形成	恒星形成
气体和恒星做圆 轨道运动	恒星做无规则轨 道运动	恒星整体做无规 则轨道运动，也 有绕银心的轨道 运动

87

### 6.4.2 重元素产生



### 6.4.3 银河系形成理论模型

- (1) 整体坍缩模型：起源于原初气体云，整体收缩
- (2) 并合和吸积模型：小星系合并

## CHAPTER VII 星系演化

**List:** 星系结构与形态？星系参数测量？星系分布？星系形成与演化？

### 7.1 星系分类

#### 7.1.1 哈勃分类

根据形态不同，分为椭圆星系、透镜状星系、旋涡星系、棒旋星系、不规则星系

1. 椭圆星系：符号E，按椭率大小（由小到大）分为E0-E7八个次型（ $n = 10(a - b)/a$ ）

主要由星族II恒星构成，没有星周盘，几乎没有星际气体和尘埃，偏红

恒星做无规则椭圆运动，星系中心最亮向边缘递减，大小质量相差悬殊

2. 漩涡星系：符号S，按核球大小（由大到小）分为Sa, Sb, Sc三个次型

核球<星系盘<旋臂<星系晕，星系盘、旋臂上主要是星族I恒星及气体和尘埃（偏蓝），核球和星系晕主要是星族II恒星（偏红）

3. 棒旋星系：符号SB，按棒大小（由大到小）分为SBa, SBb, SBc三个次型

旋臂位于棒的两端，银河系：SBb或SBc

4. 透镜状星系：介于椭圆星系和漩涡星系之间、无旋臂盘星系，有盘无臂

根据是否有棒状结构分为S0或SB0，年老恒星、气体很少

5. 不规则星系：符号Irr，无旋臂无核，富含星际气体、尘埃和年轻恒星

旋涡/棒旋星系 (S, SB)	椭圆星系 (E)	不规则星系(Irr)
由恒星和气体构成的扁盘（包含旋臂和核球）和星系晕。棒旋星系的核心有棒状结构。	球形或椭球形，除中心核区外无其他结构。	无明显结构。
盘包含年轻和年老的恒星，晕只有年老的恒星。	只有年老的恒星。	包含年轻和年老的恒星。
盘包含大量气体和尘埃，晕中的气体和尘埃很少。	没有或很少气体和尘埃。	富含气体和尘埃。
旋臂中有恒星形成过程。	近 $10^{10}$ yr没有明显的恒星形成过程。	强烈的恒星形成过程。
盘中的恒星和气体绕星系核心作圆轨道运动，晕中的恒星绕星系核心作无规则轨道运动。	恒星绕星系核心作无规则轨道运动。	恒星和气体作无规则运动。

## 7.2 星系测量

### 7.2.1 星系距离测量

(1) 绝对测量法：三角视差、回光法

(2) 标准烛光法：比较星系中可认证的某些标准明亮天体视星等与绝对星等来测距

//标准烛光源：造父变星、球状星团、行星状星云、超巨星、新星、HII区、Ia型超新星、明亮星系

//光度函数：星系在绝对星等间隔范围内( $M, M+dM$ )内的数目

### 7.2.2 星系速度测定

(1) 光度关系：Tully-Fisher关系（旋涡星系光度与谱线宽度的关系，即可见物质质量与转动速度的关系）

(2) 谱线红移法：哈勃定律（星系退行速度 $V$ 与星系距离 $D$ 成正比）

### 7.2.3 星系质量的测量

(1) 旋涡星系自转曲线：谱线位移——自转速度——质量

(2) 椭圆星系速度弥散：谱线位移——平均运动速度——质量

(3) 椭圆星系X射线晕：部分椭圆星系周围存在大量热气体

X射线辐射——气体温度——热运动速度——引力质量

### 7.2.4 星系年龄测量

星系光谱中Ca II的HK线吸收引起4000Å流量跃变与年老恒星年龄有关

## 7.3 星系集团

7.3.1 本星系群：银河系所处着的星系集团（60个成员星系，3个旋涡星系，其余为不规则星系和矮椭圆星系）

1. 银河系和仙女座星系M31是最大的两个星系

2. 大、小麦哲伦云富含年轻恒星与中性气体，不规则星系

3. M31: 本星系群最大星系, Sb型, 正在接近银河系
4. M33: 第三大星系, Sc型, 大量星族I天体和恒星形成区
5. 星系团90%质量是暗物质提供

### 7.3.2 星系间相互作用

影响因素: 质量比、相对运动速度、距离

方式: 并合、扰动

(1) 形变、星暴与恒星形成终止: 潮汐作用带来形变; 气体压缩带来星暴; 气体受热导致恒星形成终止

(2) 并合与吞噬: 形成巨椭圆星系 (延展的晕、多核、星系团中心区域)

### 7.3.3 超星系团

由多个星系团组成; 处于膨胀或松散束缚状态; 间呈网状相互连接; 巨洞

## 7.4 星系形成与演化

### 7.4.1 观测结论

哈勃序列演化: 红移 $z > 2$ 处, 大质量星系主要为不规则星系; 盘星系和椭圆星系在更低红移处主导;  $z > 1$ 处大质量星系还在持续吸积;

星系并合: 星系并合比例随红移增加而增大

### 7.4.2 理论模型

(1) 自上而下模型: (热暗物质主导) 原始气体坍缩成薄饼——薄饼沿一个方向坍缩形成丝状结构——进一步内部碎裂成更小尺度结构

(2) 自下而上模型: (冷暗物质主导) 小、不规则星系首先形成——星系并合——产生星系团

//星系的形态与原初气体云密度与角动量有关

(3) 降序模式：大质量星系形成早于小质量星系；大质量星系中恒星形成早、持续时间短

//驱动过程：环境驱动、质量驱动、干湿并合

1. 密度高，气体坍缩早，星系形成早；密度低，气体坍缩晚，星系连续形成
  2. 大质量星系在高密区先形成；小质量星系晚形成
  3. 湿并合：星暴、盘再塑造；干并合：没有恒星形成，形成巨椭圆星系
- 

## CHAPTER VIII 活动星系

**List:** 星系活动性表现与解释、超大质量黑洞？

### 8.1 活动星系

#### 8.1.1 活动星系

定义：部分星系（核）表现出强烈的活动性，称为活动星系或活动星系核

连续谱特征：光度高+非热辐射（峰值能量位于远红外波段）

//解释：同步加速辐射：相对论带电粒子在磁场中做加速运动会产生连续辐射

谱线特征：强发射线、偏振辐射

光变特征：大幅度、快速光变

形态特征：特殊形态

#### 8.1.2 塞弗特星系

类型特征：亮核、宽发射线，几乎都是旋涡星系；强发射线；分为I与II型

I型允许线宽度远超禁戒线宽度；II型宽度相当且较窄

### 8.1.3 射电星系

辐射能力主要在射电波短，主要来自射电瓣

绝大部分活动星系是射电星系，光度远超正常星系；符合非热同步加速谱；绝大部分为椭圆；

通常为星系团中最大、最亮的星系

### 8.1.4 类星体

光学形态与恒星相似；具有强且宽的未知发射线（红移后的巴尔默线）；人们观测到最遥远、年老、辐射功率最大的河外天体

实际上是活动星系核，亮度盖过宿主星系

### 8.1.5 耀变体

活动星系核的一类，光学激变源+蝎虎BL天体，宿主星系都是椭圆星系

	射电星系	赛弗特星系	耀变体	类星体
光学形状	椭圆	旋涡	不明	类星
射电形状	喷流与双瓣	核区有弱辐射	核区有弱辐射	喷流与双瓣
连续谱	非热辐射 + 热辐射			
发射线	宽	宽与窄	无（弱）	宽与窄
谱线红移量	0.01-0.3	0.003-0.06	0.05-0.4	0.2->7
吸收线来源	恒星	无	无（?）	前景气体云

### 8.1.6 统计规律

- (1) 20-40% 星系有核活动
- (2) 距离越远，活动性越频繁

(3) 绝大部分为椭圆星系

(4) 高光度，时标短，是一个演化阶段

## 8.2 活动星系核理论

### 8.2.1 统一模型

普遍特征：高光度、非热连续谱、快速光变、形态特殊、宽发射线

理论模型：星系的活动性源于星系的核心区域（活动星系核）超大质量的黑洞，黑洞的物质吸积提供了活动星系的能源。（超大质量黑洞吸积过程引力能释放）

//爱丁顿光度确定吸积天体质量范围

吸积——（可能）双极喷流——喷流与星系际物质作用形成射电瓣

解释塞弗特星系：允许线（宽线）发生于较近的致密气体；禁戒线（窄线）产生于较远的稀薄气体；II型塞弗特星系宽线缺失可能由于观测者视线取向、宽线区缺失

组成成分：黑洞、吸积盘、喷流、宽线区、窄线区、尘埃环、宿主星系

不同方向观测表现特征不同：

$\alpha$	中心 黑洞	宽发射 线区	窄发射 线区	喷流	射电瓣	观测天体
$\sim 90^\circ$	不可 见	不可 见	可 见	可 见(?)	可 见(?)	II型赛弗特星系 或窄线射电星系
中等	可 见	可 见	部 分 可 见	可 见(?)	可 见(?)	类星体或I型赛弗 特星系
$\sim 0^\circ$	可 见	不可 见	不可 见	不可 见	不可 见	视超光速类星体 或蝎虎座BL天体

### 8.2.2 观测证据

观测活动：核区的恒星与气体运动、核区的巨脉泽、反响映射

观测方式：高分辨率观测——大小；周围天体运动——质量；质量空间比判断其为黑洞

反响映射：黑洞连续辐射电离宽线区气体产生发射线；存在光变延迟 $t$ ；由此求出宽线区大小与气体运动速度

### 8.2.3 活动星系演化

观测证据：类星体数密度随红移增大而增大，在红移 $z \sim 2$ 附近达到峰值后下降

演化路径：类星体——活动星系——正常星系（活动性逐渐降低，可供消耗原料减少）

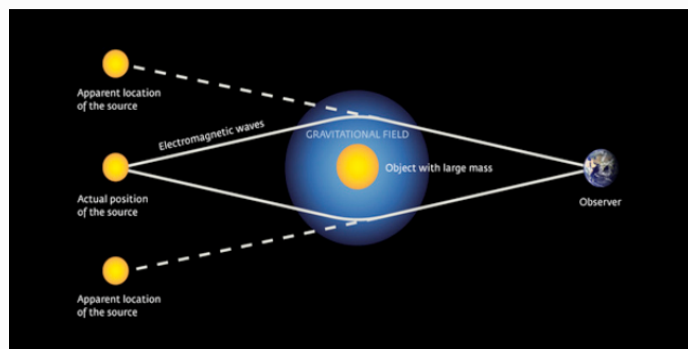
富气体星系并合，激发星暴和超大质量黑洞增长，类星体被尘埃遮挡；黑洞主导核区能量，反馈活动驱散周围气体尘埃，类星体出现；驱散、加热气体后恒星形成被抑制、终止；随着气体逐渐耗尽，核心光度减小，成为活动星系；气体进一步加热、驱散，核心活动无法维持，成为正常星系（包含一个核球与超大质量黑洞），辐射主要来源于恒星热辐射

不时的星系间相互作用可以为黑洞提供吸积原料，触发星系活动

## 8.3 引力透镜与视超光速运动

### 8.3.1 引力透镜

即引力场源对位于其后的背景天体（如类星体）发出的电磁辐射所产生的会聚或多重成像效应



观测效应：*强引力透镜——多重像，弧、环；弱引力透镜：变形；微引力透镜：光变*  
引力透镜没有焦点，只有焦线；天体距离越远，像的半径越大

研究星系团对背景类星体或星系产生的引力透镜现象，可以得到星系团内的（暗）物质分布和宇宙大尺度结构的信息。

### 8.3.2 视超光速运动

天体抛射物以超光速运动的现象。由观测几何效应引起。

---

## CHAPTER IX 宇宙起源

**List:** 大爆炸宇宙学观测证据及其问题？宇宙组分？暗能量观测证据？

# 9.1 宇宙膨胀论

## 9.1.1 牛顿宇宙观

宇宙永恒、稳定，无限大

//奥伯斯佯谬：宇宙空间上无限大，时间上不变化，恒星均匀分布→任何方向上天空亮度完全相同

现代解释：恒星寿命、宇宙年龄、宇宙视界、光子退行红移

## 9.1.2 宇宙学原理

(1) 宇宙在大尺度上均匀→无边界

(2) 宇宙各向同性→无中心

观测证明：宇宙微波背景辐射

## 9.1.3 膨胀宇宙

1. 爱因斯坦：

爱因斯坦广义相对论引力场方程给出：宇宙无限大、均匀的前提下，宇宙膨胀或收缩

→引入排斥力作用“宇宙学常数”使其保持静态

2. 弗里德曼：

宇宙密度参数 $\Omega_o, \Omega_k, \Omega_o + \Omega_k = 1$

$\Omega_o > / = / < 1$ 分别对应封闭/平直/开放宇宙，演化分别为先膨胀后收缩/无限膨胀/无限膨胀

宇宙位形：平直

3. 勒梅特

宇宙膨胀→宇宙起始点：“原始原子”→大爆炸核合成

### 9.1.4 加速膨胀与暗能量

引力→膨胀减慢

哈勃定律标准烛光更暗淡→实际上加速膨胀→暗能量（长程斥力）

暗物质：负压强，近乎光滑，不结团

## 9.2 宇宙微波背景辐射

### 9.2.1 发现

宇宙冷却→爆炸残留辐射→宇宙背景辐射→红移至微波波段

### 9.2.2 特征

各向异性：偶极不对称性

## 9.3 宇宙热演化

### 9.3.1 物质与辐射

物质包括：可见物质+暗物质；辐射来自：微波背景辐射

演化：宇宙膨胀使物质、辐射密度减小（辐射密度减小更快）

物质产生：光子产生正反粒子，正反粒子湮灭→光子不再产生正反粒子，正反粒子湮灭→正反，正粒子留存：质子、中子、电子

### 9.3.2 热演化

Planck时代→大一统理论时代→重子时代→轻子时代→核时代→原子时代→星系时代→恒星时代

## 9.4 暴胀宇宙

### 9.4.1 两个问题

视界问题：宇宙具有相同温度，但宇宙不同区域如何与视界之外进行信息交换

平直问题：为什么宇宙始终平直

### 9.4.2 暴胀宇宙论

宇宙在极早期发生过尺度爆增

对两个问题的解释：在暴胀前宇宙的大小远小于视界大小，因而具有相同的温度，导致暴胀后的宇宙依然具有相同的温度；即使宇宙早期位形是高度弯曲的，经过暴胀会变为平直。

//暴胀论推论：暴胀重复发生时，会产生数量无限的多重宇宙，且相互之间完全隔离

## 9.5 宇宙大尺度结构

### 9.5.1 物质不均匀性形成条件

宇宙结构形成不源自于重子物质密度涨落

重子与辐射冻结在一起，物质不均匀会导致微波辐射涨落，与事实不符

### 9.5.2 暗物质

大尺度结构形成主要作用：暗物质

暗物质只有弱作用和引力作用，不与辐射耦合

成分：热暗物质（质量小、接近光速）→大尺度结构

冷暗物质（质量大、速度慢）→小尺度结构

//暗物质确定宇宙总体分布、大尺度结构；可见物质形成星系、星系团

---

## WRAP UP 课程总结

Note: 考试题型: 选择题+判断题+说明题

详见: 普通天文学重点复习提纲