

## 谱线多普勒致宽

· 辐射源内部原子的无规热运动、辐射源的整体运动（如转动）造成的谱线致宽。

## 如何寻找近距离恒星以测量其视差?

· F. 斯特鲁维判据:

- (1) 明亮;
- (2) 自行大;
- (3) 角距大的双星。

## 星等

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log(F_1/F_2)$$

$$M - m = -2.5 \log(F_{10}/F_d) = 5 - 5 \log d(\text{pc})$$

## 光谱

| 光谱型 | 表面温度(K) | 颜色 | 特征谱线                 |                    |
|-----|---------|----|----------------------|--------------------|
| O   | 30,000  | 蓝  | 强电离He线, 重元素多次电离线。    | } 早型<br>Early type |
| B   | 20,000  | 蓝白 | 中性He线, 重元素一次电离线, H线。 |                    |
| A   | 10,000  | 白  | H线, 重元素一次电离线。        |                    |
| F   | 7,000   | 黄白 | 重元素一次电离线, H线和中性金属线。  | } 晚型<br>Late type  |
| G   | 6,000   | 黄  | 重元素一次电离线, 中性金属线。     |                    |
| K   | 4,000   | 红橙 | 中性金属线, 重元素一次电离线。     |                    |
| M   | 3,000   | 红  | 中性金属线, 分子带。          |                    |

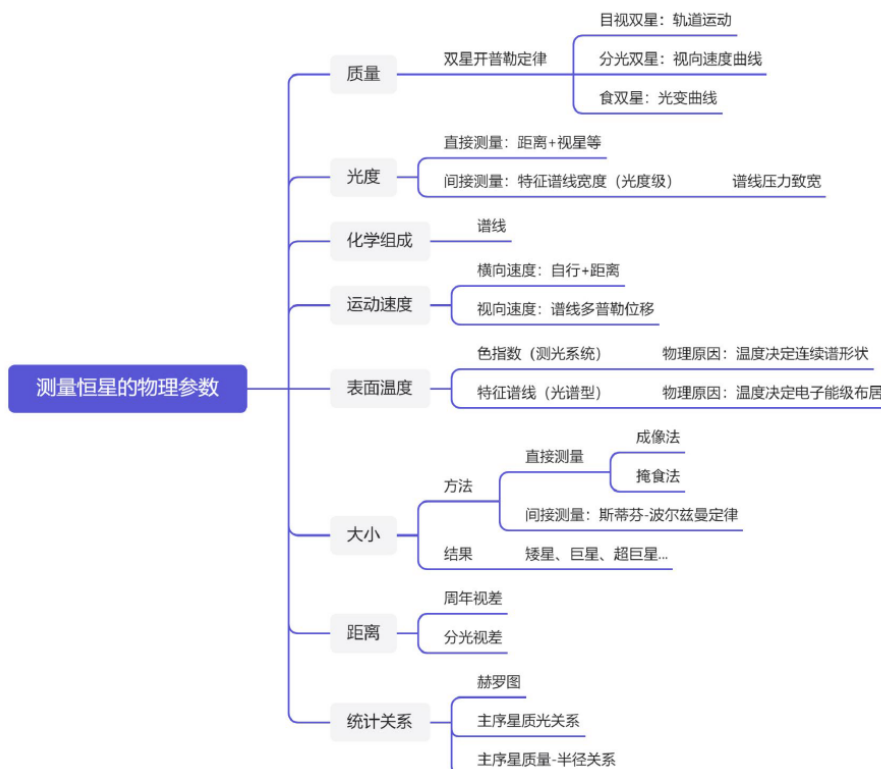
## 为什么A型星的巴耳末线最强?

- 对 H 原子，产生强巴耳末线要求电子大量布居于第一激发态。
- 电子的能级布居取决于温度的高低。
- 巴耳末线的强度取决于电子处于第一激发态的 H 原子在所有 H 原子和 H 离子中的比例

- 太阳光谱型：G2V

## 质量如何影响恒星结构?

- 质光、质量-半径、质量与密度分布
- 高质量的恒星明亮且高温，位于主序带的上部。
- 低质量的恒星黯淡且低温，位于主序带的下部。



## 二

### 恒星质量-光度关系的解释

- 质量越大的恒星引力越强，流体静力学平衡要求内部压强越高，状态方程表明内部温度越高，光度越高

### 恒星内部发生核反应：

- 由量子力学测不准原理，即使质子的动能不足以克服库仑势垒，它也有一定的概率穿越它，并与另一个质子发生碰撞。

### 恒星如何维持稳定的核燃烧？

- 恒星内部的核反应速率 $\epsilon$ 对温度十分敏感

$$\epsilon \propto T^4(PP), T^{20}(CNO)$$

- 恒星是稳定的气体球，其内部任意一点必须维持流体静力学平衡

振荡 ( $\epsilon$ 机制)

### 建立恒星结构模型

- 假设恒星是球对称的，
- 给定恒星的初始质量M和化学组成X, Y, Z,

· 对某一特定半径 $r$  处的球壳，求解由：

①流体静力学平衡方程，

②质量连续性方程，

③能量守恒方程，

④能量传输方程，

和产能率公式，物态方程，不透明度公式组成的方程组，

以及边界条件：

当 $r=0$ 时， $M(0)=0$ ， $L(0)=0$ ；

当 $r=R$ 时， $M(R)=M$ ， $T(R) = 0$ ， $P(R) = 0$ 。

### 电子简并压的物理成因：

· 泡利不相容原理：电子不可能占据两个相同的能态

· 海森堡测不准原理： $\Delta x \cdot \Delta p_x > \frac{h}{2}$

### 对流

· 随着恒星内部的不透明度或产能率增大，辐射温度梯度值增大，辐射不再是传递能量的有效方式，或辐射平衡是不稳定的，这时在恒星内部产生对流。

· 对流不仅传递能量，还起着混合物质的作用。

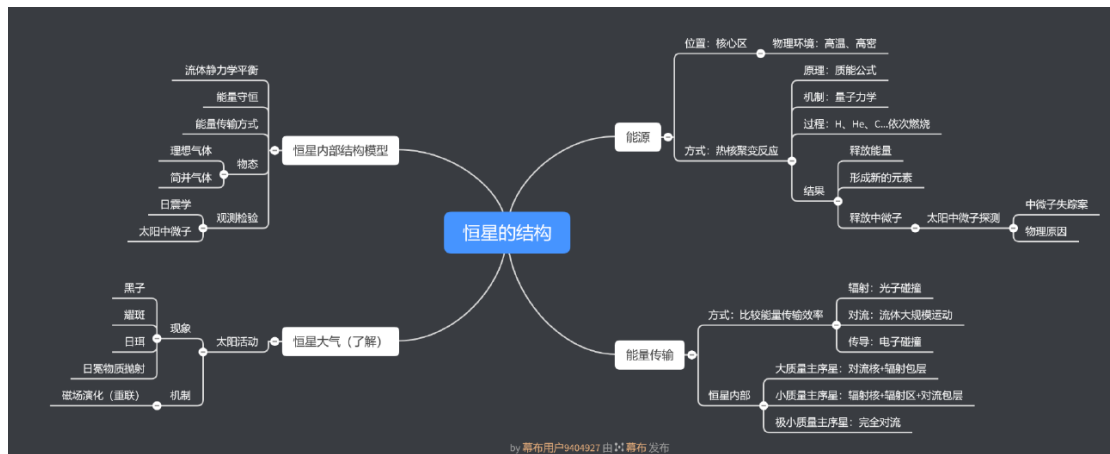
- 较大质量主序星：对流核区+辐射包层
- 较小质量主序星：辐射核区+对流包层
- 极低质量主序星：低温、整体对流

## 检验恒星模型

- 日震学、太阳中微子

## 为什么恒星振荡可以用来检验恒星结构模型？

- 振荡频率可以精确测定。
- 振荡频率依赖于恒星内部结构，不同模式的振荡发生在恒星内部不同区域。

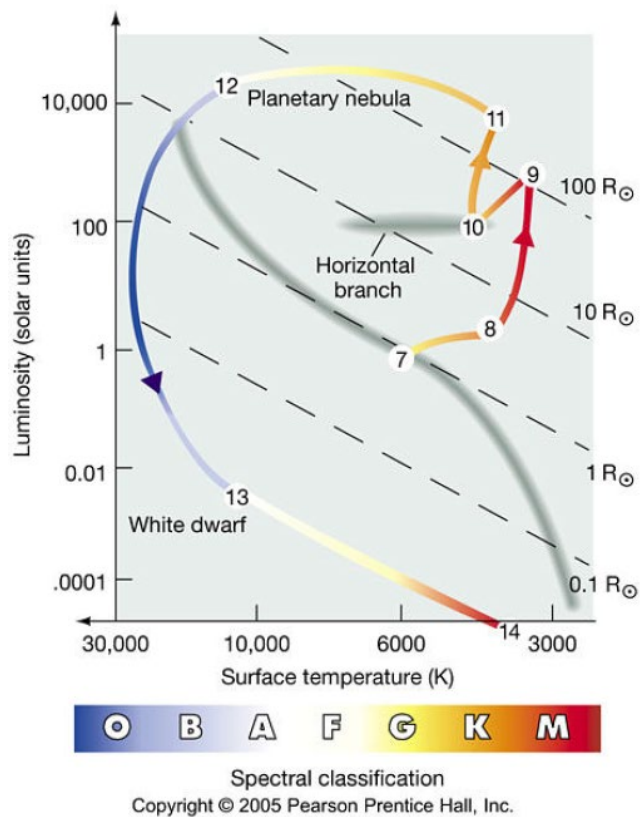


### 恒星为什么演化?

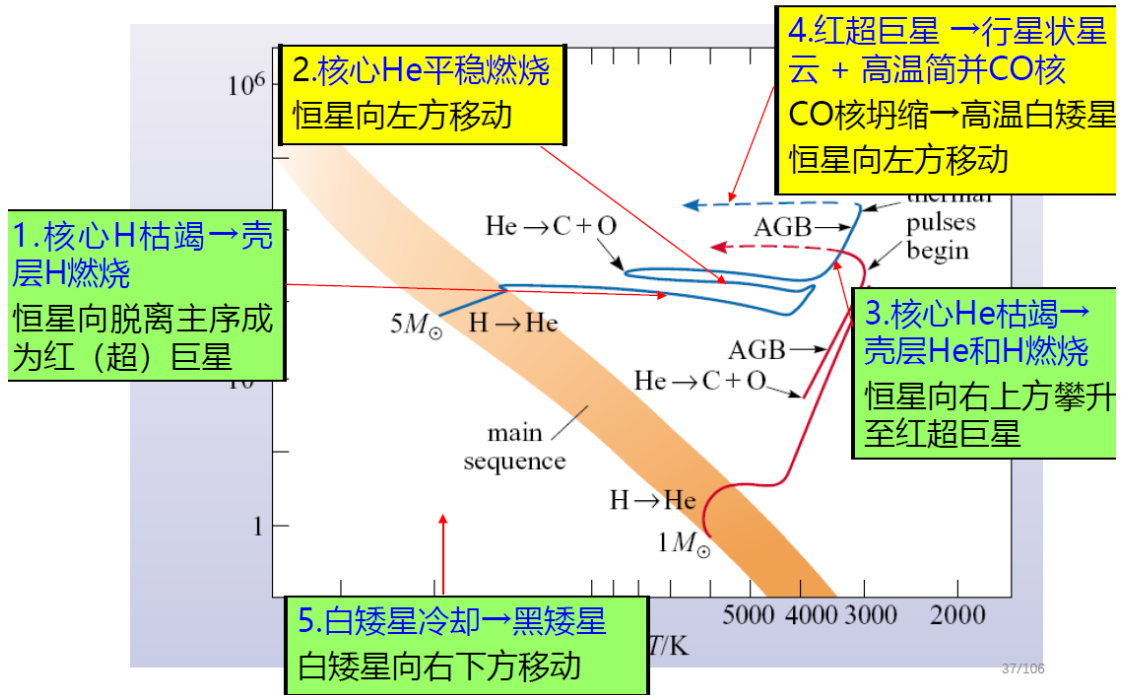
· 恒星总是试图处于稳定状态。恒星通过核反应产生能量，维持热平衡和流体静力学平衡，同时改变了自身的组成与结构。

### 恒星数目如何反映演化速率?

- 如果恒星的演化过程由初始质量决定，那么质量相同但光谱型不同的恒星处于不同的演化阶段。
- 如果恒星的诞生率和死亡率一致，某一类恒星数目的多少就反映了它们在该演化阶段所停留时间的长短。

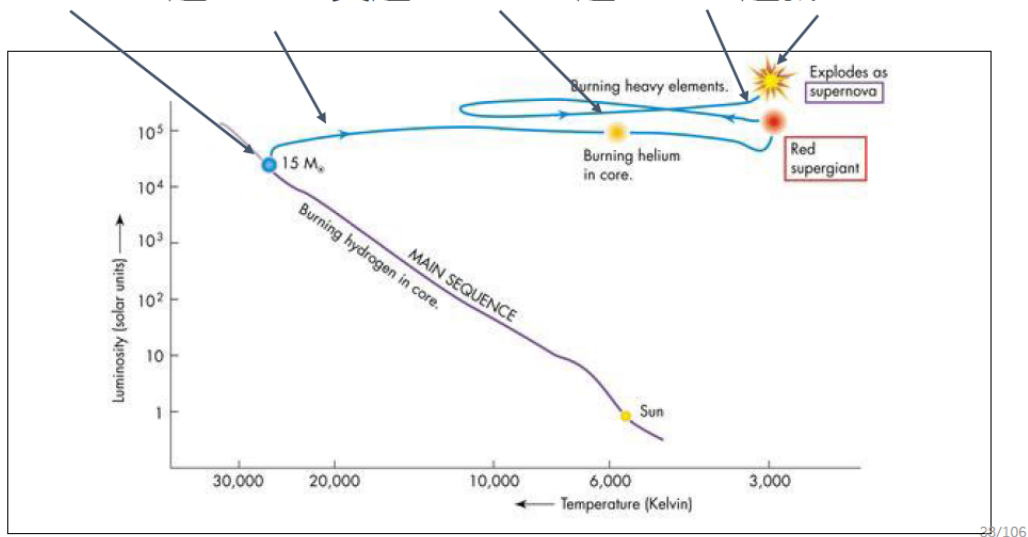


## 5M<sub>☉</sub> 恒星的演化轨迹与内部过程



高质量  $> \sim 8M_{\odot}$

O型星 → 蓝超巨星 → 黄超巨星 → 红超巨星 → 超新星



## 较高质量( $M > \sim 2M_{\odot}$ ) 恒星演化与低质量恒星演化的主要区别

- 恒星内部的H燃烧通过CNO循环进行，内部温度更高，辐射压对维持恒星的力学平衡起更大的作用，主序寿命更短。
- He核不再是简并的，C和更重元素的燃烧可以平稳进行。
- 核心区核反应产生的能量主要以对流的方式向外传递。

## Fe核之后形成什么？

核反应停止  $\rightarrow R_c \downarrow \rightarrow T_c \uparrow \rightarrow$  Fe核、He核光致离解

$\rightarrow$  e, p, n 电子俘获反应:  $e + p \rightarrow n + \nu_e \rightarrow n_e \downarrow +$  能量损失

$\rightarrow P_e \downarrow \rightarrow$  星核坍缩  $\rightarrow$  中子简并  $\rightarrow$  核坍缩停止，形成中子星

## 中子星之后形成什么？

- 由于信息传播速度（声速）远小于自由落体速度，包层物质继续下落。  $\rightarrow$  高速撞击导致激波反弹  $\rightarrow$  壳层抛射  $\rightarrow$  超新星爆发  $\rightarrow$  致密星+超新星遗迹

## 即时爆发实际上是不可能发生的

- 激波中的绝大部分能量被用来离解下落的铁原子核
  - 电子俘获过程产生的中微子带走了大部分能量
- $\rightarrow$  需要再次给激波注入能量

## 沃尔夫·拉叶星

- 高光度恒星通常有很强的星风，可以剥离恒星包层使氦核裸露。

### 为什么星团是研究恒星演化的重要工具？

- 星团中的恒星具有相同的距离、年龄和初始化学组成，但成员星的质量不同，因而演化的速度有快有慢。
- 星团中的恒星按照质量大小的次序先后脱离主序。

### 恒星脉动的原因是什么？

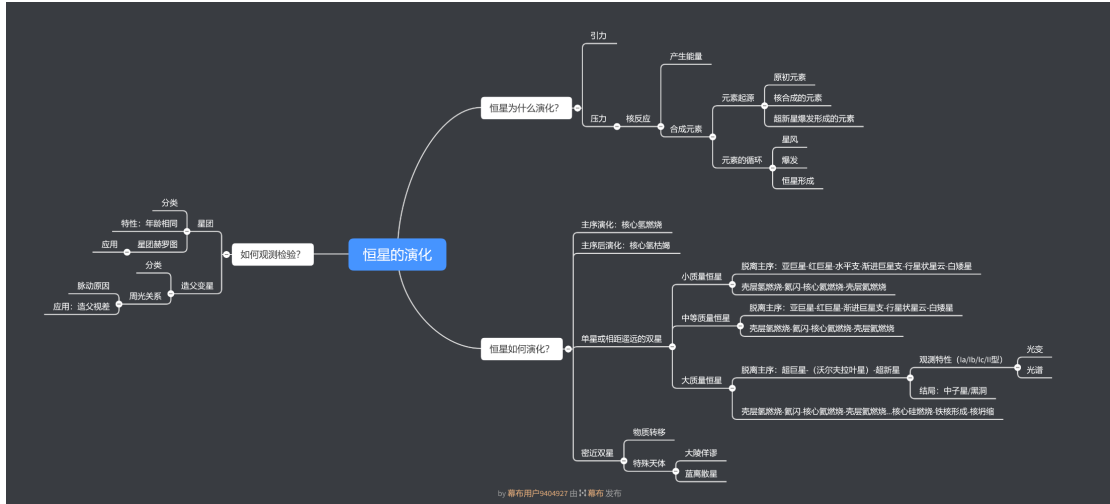
- 恒星演化到一定阶段，内部出现不稳定性，引力和压力失去平衡。
- 维持脉动要求恒星在收缩时内部压力增大，在膨胀时内部压力减小。

### 密近双星物质交流

- 星风俘获、洛希瓣溢

### 大陵伴谬

- 亚巨星的前身星是双星中质量较大的主序星，先演化充满洛希瓣。
- 物质传输使得两子星的质量逆转。
- 物质传输在初始阶段进行得较快，当两子星的质量逆转后进行得较慢，更容易观测到。



## 四

### 白矮星如何维持自身平衡

- 简并电子气，高温产生自由电子，高密产生简并压。
- 质量与半径成负相关
- 随着白矮星质量增大，简并电子气运动变成相对论性 → 当质量增大，引力比压力增大得更快 → 白矮星质量上限（钱德拉塞卡极限质量）

· 已知最好的标准烛光源： $I_a$ 超新星

· 中子星：中子简并

## 为什么脉冲星是中子星?

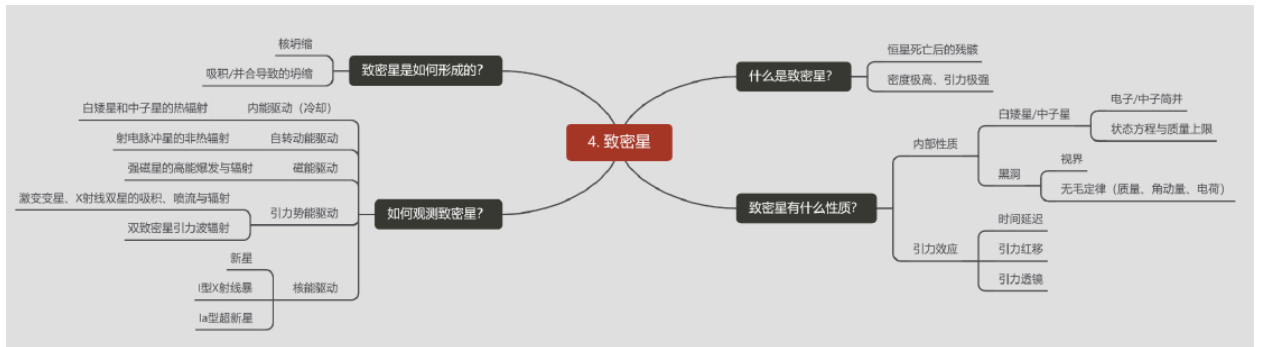
- 脉冲持续时间推算出辐射源大小应为中子星或白矮星，脉冲的规则性则可推出为中子星

## 证实黑洞的最直接证据

- 视界的存在
- X射线双星是搜寻吸积黑洞的最佳场所。

## 黑洞无毛定理

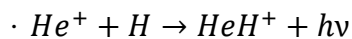
- 描述黑洞的物理参数只有质量、角动量和电荷。



## 小结：星际气体的主要性质

| 成分     | 观测证据                   | 温度 (K)                | 密度 (cm <sup>-3</sup> )             | 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 <sup>2</sup> -10 <sup>9</sup>   | 40%   |
| H I 区  | 21厘米谱线, 紫外吸收线          | 50-100                | 1-50                               | 40%   |
| H II 区 | 光学和红外发射线, 射电连续辐射       | 10 <sup>4</sup>       | 10-10 <sup>4</sup>                 | 极少    |
| 云际气体   | 21厘米谱线                 | 7,000-10 <sup>4</sup> | 0.2-0.3                            | 20%   |
| 云际冕气   | X射线 (OVI) 辐射           | 10 <sup>6</sup>       | 10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup> | 0.1%  |

### 宇宙中最早化学反应的产物



· 星际尘埃的证据——星际消光与红化

· 尘埃对蓝光散射较多而对红光散射较少, 因而造成星光颜色偏红。

### 星际尘埃观测:

· 光学观测——反射星云和暗星云

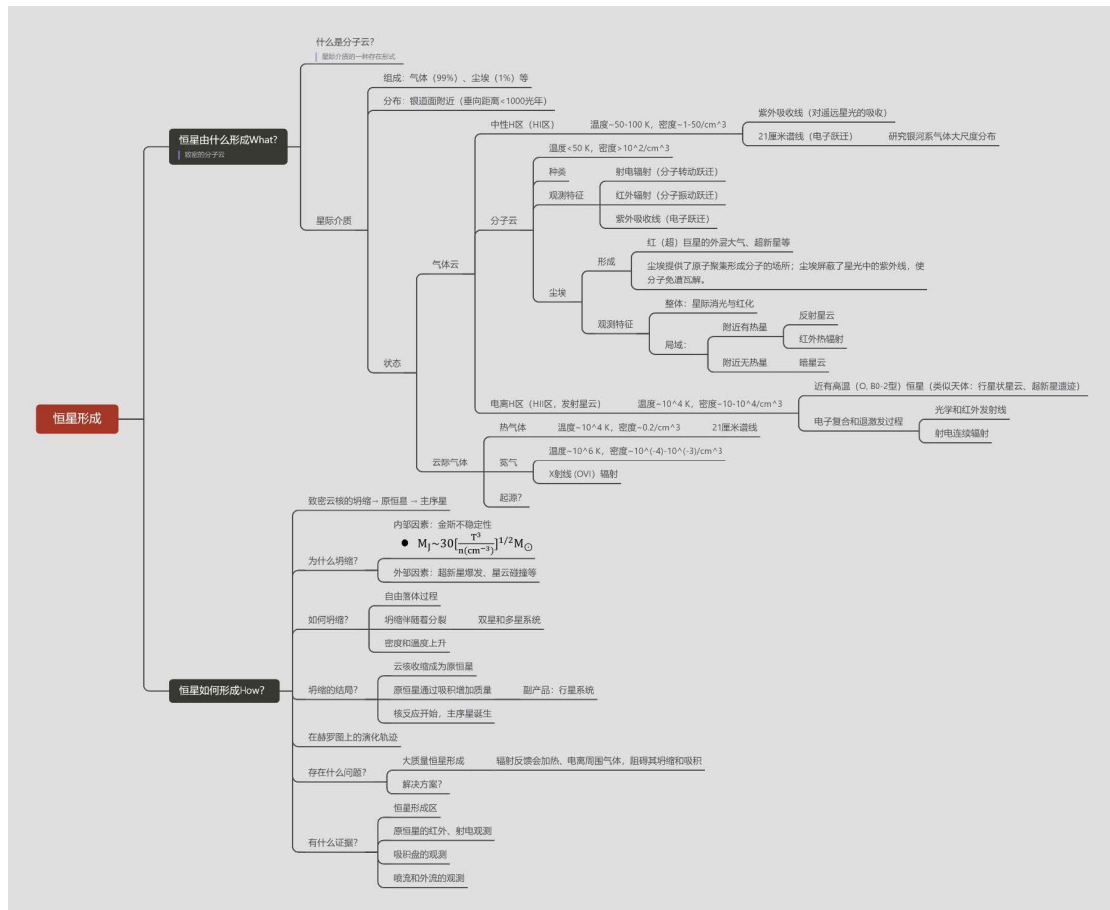
· 红外观测

## 金斯不稳定性

- 当星云的质量足够高时，（向内的）引力超过由热运动产生的（向外的）压力，引起星云的收缩。（只适用于均匀）

## 星云坍缩触发机制

- 激波压缩
- 星云碰撞→辐射→冷却→坍缩
- 磁场双极扩散或湍动耗散→自发坍缩



## 六

- 星族I 年轻的 富金属恒星 主要位于银盘中 绕银心规则圆运动
- 星族II 年老的 贫金属恒星 主要位于银晕和核球中 高偏心率椭圆轨道 取向随机

### 银河系转动测量

- 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）。

### 漩涡结构?

- 密度波理论
- 自传播恒星形成理论

### 暗物质存在证据?

- 银河系自转曲线、质光比

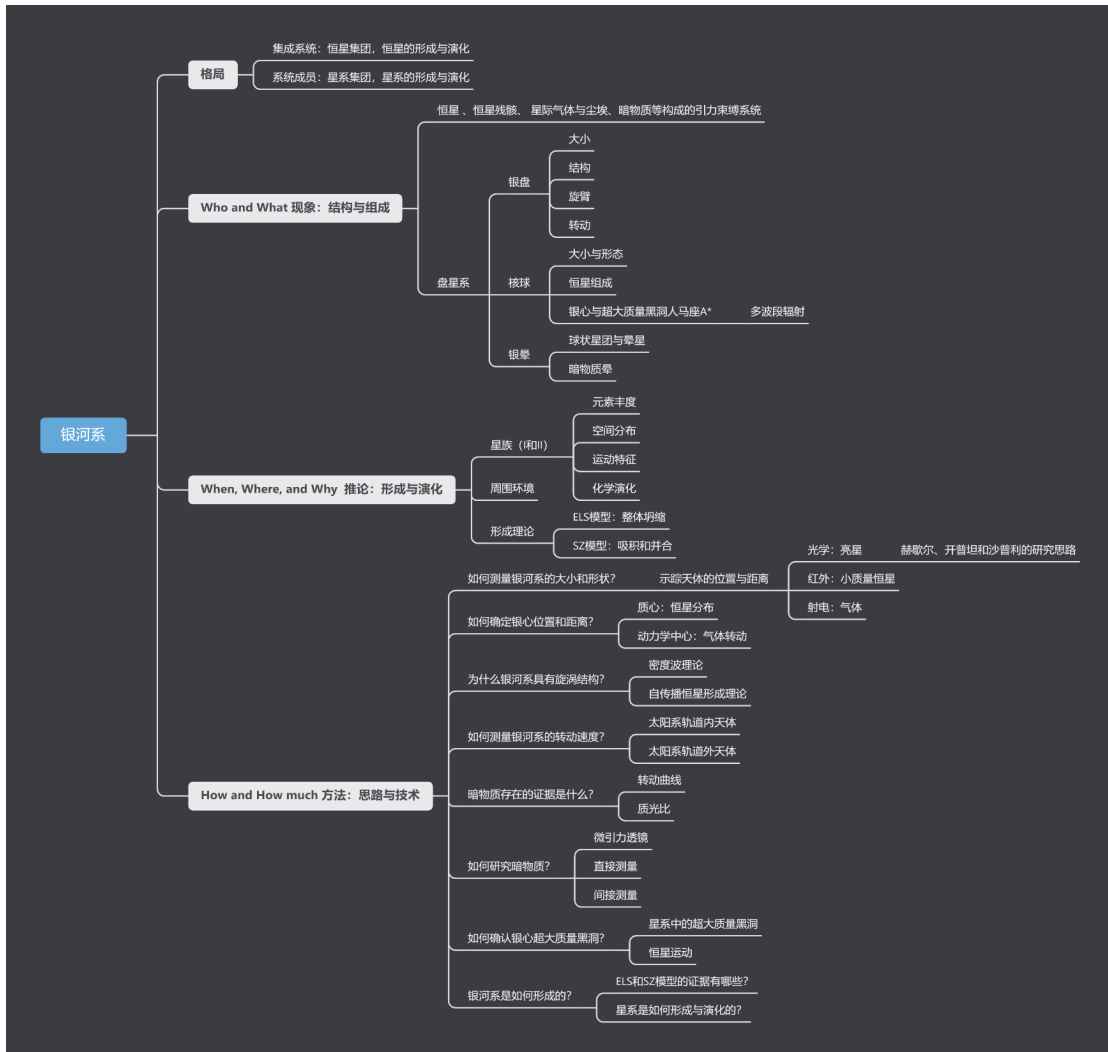
### 银河形成的理论模型?

- 整体坍缩模型 (ELS)
- 并合和吸积模型 (SZ) (星流)

中小质量恒星演化  
 →行星状星云  
 →C, N

大质量恒星演化  
 → Ib, Ic, II型超新星  
 →O

白矮星双星演化  
 → Ia型超新星  
 →Fe



## 七八九

| 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不规则轨道运动。 | 恒星绕星系核心作不规则轨道运动。           | 恒星和气体作不规则运动。 |

### 星系距离测量

- 绝对测量：三角视差、回光
- 标准烛光法
- 弥散-光度关系
- 谱线红移

### 星系质量测定

- 漩涡星系自转曲线
- 椭圆星系速度弥散、X射线晕

## 星系年龄测量

- 由Ca II的HK线吸收引起的4000Å流量跃变

|                    | 旋涡星系  | 不规则星系            | 矮椭圆星系            | 巨椭圆星系             |
|--------------------|---|------------------|------------------|-------------------|
| 直径 (ly)            | $90 \times 10^3$  | $20 \times 10^3$ | $30 \times 10^3$ | $150 \times 10^3$ |
| 质量 ( $M_{\odot}$ ) | $10^{11}-10^{12}$   | $10^6$           | $10^5-10^7$      | $10^{13}$         |
| 光度 ( $L_{\odot}$ ) | $10^{10}$   | $10^9$           | $10^8$           | $10^{11}$         |
| 颜色                 | 蓝 (盘)<br>红 (晕与核)  | 蓝                | 红                | 红                 |
| 气体百分比              | 5%  | 15%              | < 1%             | < 1%              |
| 恒星类型               | 年轻 (盘)<br>年老 (晕与核)  | 年轻               | 年老               | 年老                |
| 质光比                | $(M/L)_{\text{irr}} < (M/L)_{\text{S}} < (M/L)_{\text{E}}, (M/L)_{\odot} = 1$ |                  |                  |                   |

## 星系形成的理论模型

- 自上而下 (热暗物质)
- 自下而上 (冷暗物质)

## 哈勃定律

- 退行速度V与星系的距离D成正比  $V = H_0 \times D$ , 反映宇宙的膨胀

## 活动星系连续谱

- 热 (红外) 辐射+ 非热辐射 (幂律谱), 峰值能量位于远红外波段

|       | 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  |

#### 活动星系能源:

- 超大质量黑洞吸积过程中的引力能释放
- 一般认为赛弗特星系的允许线产生于离星系核较近的致密气体 (宽线区BLR) , 禁戒线产生于相对较远的稀薄气体 (窄线区NLR) 。
- 当目标天体、透镜天体和观测者在一条直线上时, 目标天体的引力透镜像表现为爱因斯坦环, 否则为弧形或分立像。

#### 物质不均匀性的形成条件

- 宇宙结构的形成不可能源于重子物质的密度涨落。
- 宇宙学常数在物理上等价于真空能。

## 大爆炸宇宙学观测证据

- 宇宙膨胀、轻元素丰度、宇宙微波背景辐射
- 辐射由于宇宙膨胀发生红移，因此辐射密度比物质密度随时间减小得更快

# 星系的形成与演化

## 星系是宇宙岛

星系是恒星集团

### 对星系认识的发展

旋涡星云的本质是什么?

### 描述星系的物理量

#### 距离

##### 几何测量法

##### 标准烛光法

标准烛光源 (造父变星、超新星等)

##### 光度函数

Tully-Fisher关系和Faber-Jackson 关系

##### 谱线红移法

哈勃-勒梅特定律

宇宙膨胀

#### 质量

整体转动: 旋涡星系

恒星速度弥散: 椭圆星系

X射线晕: 热气体

质光比

#### 化学组成

星族 (金属丰度、颜色、年龄、运动)

#### 形态

哈勃形态分类 (早型到晚型星系)

从中心到表面, 表面亮度、星族、颜色、质光比的变化

质量-颜色图分类 (蓝云、红序列、绿谷)

#### 随红移 (年龄) 的变化

高红移: 不规则小星系主导; 低红移: 规则大星系主导

## 星系不是宇宙岛

星系不是孤立的恒星集团

### 星系集团

本星系群

星系团

超星系团

宇宙大尺度结构

### 星系间相互作用

#### 方式

扰动

并合

吸积

#### 影响

气体 (形态、温度、驱散)

触发或抑制恒星形成

大质量星系形成

## 形成与演化 观测 vs. 理论

### 初始条件

暗物质密度扰动

冷暗物质模型

### 触发因素

暗物质引力不稳定性

重子物质成团

### 形成途径

自上而下top-down

自下而上bottom-up, 等级式模型

### 物理过程

恒星形成

气体循环

元素增丰

超新星反馈

### 驱动因素

#### 内部因素

引力坍缩

星系核活动的反馈

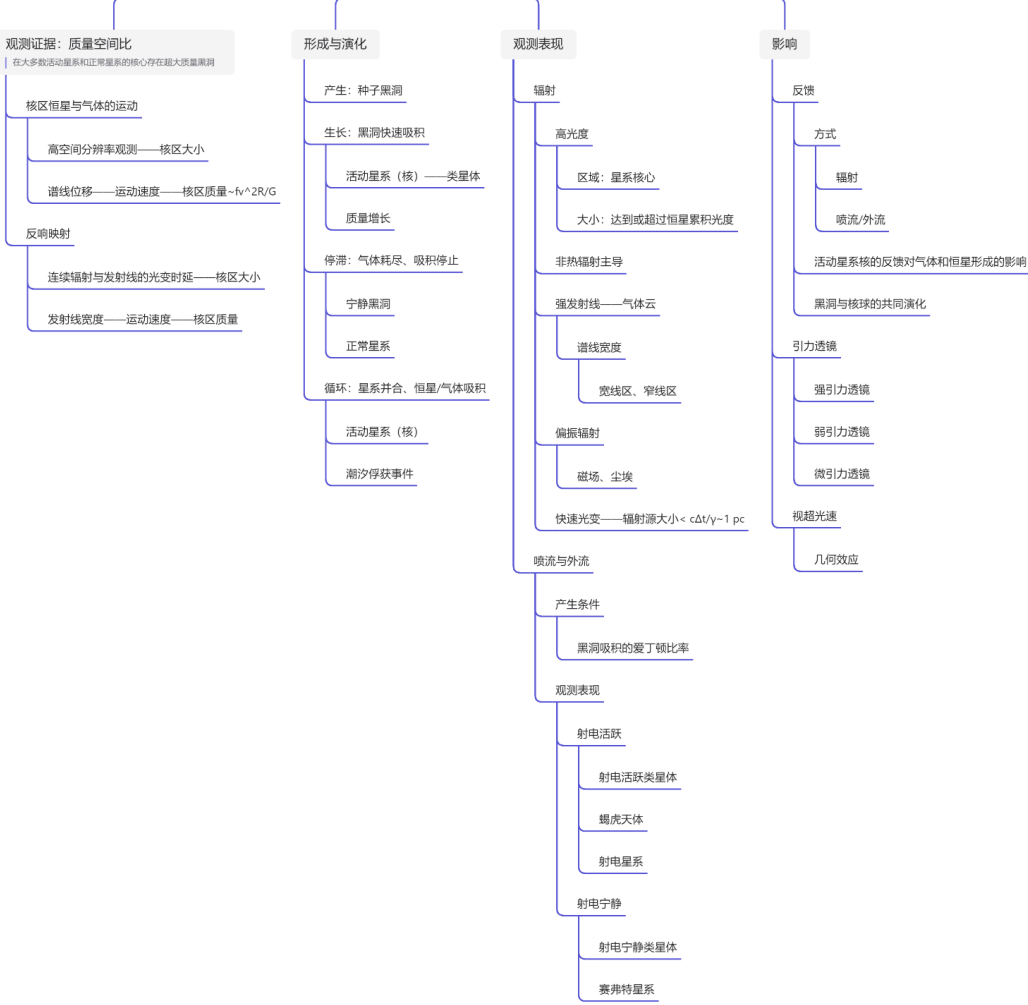
#### 外部因素

并合

吸积

扰动

# 超大质量黑洞



# 大爆炸宇宙学

## 宇宙由什么成分组成?

- 正常物质 4.9%
- 暗物质 26.8%
- 暗能量 68.3%

## 宇宙如何演化?

### 不同密度参数下宇宙的演化

#### 尺度演化: 膨胀

- 暴胀
- 减速膨胀
- 加速膨胀
- 高红移 $\alpha$ 型超新星
- 暗能量的本质

#### 能量密度变化

- 辐射主导 ( $\propto R^{-4}$ )
- 物质主导 ( $\propto R^{-3}$ )
- 暗能量主导 ( $\propto R^0$ )

#### 热演化: 冷却

- 普朗克时代
- 未知物理

#### 大统一时代

- 引力分离
- 强相互作用力分离
- 暴胀

#### 重子时代

- 物质创生

#### 轻子时代

- 电子产生

#### 核时代

- 原初核合成

#### 原子时代

- 复合导致辐射与物质脱耦

#### 星系时代

- 星系与大尺度结构形成

#### 恒星时代

- 恒星持续形成

## 大爆炸宇宙学有哪些观测证据?

### 宇宙膨胀

- 奥伯斯佯谬
  - 为什么宇宙不可能是无限的?
- 哈勃-勒梅特定律
  - 为什么星系退行反映了宇宙膨胀?

### 轻元素丰度

- 时间:  $< 10^3$  秒
- 原初核合成形成的氦元素和氘、锂元素的丰度

### 微波背景辐射

- 产生原因
  - 大爆炸残留的热辐射
- 产生条件
  - 电子复合 (温度 4500K, 年龄 38万年)
- 2.7K 各向同性黑体辐射
  - 宇宙学原理 (均匀和各向同性)

### 各向异性

- 本星系群运动  $1/10^3$
- 银河系尘埃热辐射
- 宇宙早期温度涨落  $1/10^5$ 
  - 重子声波振荡
  - 宇宙曲率
  - 重子物质密度
  - 暗物质密度
- 暗物质密度涨落
  - 正常物质凝聚
  - 大尺度结构形成

## 大爆炸宇宙学存在哪些问题?

### 视界问题

- 为什么微波背景辐射是高度各向同性的?

### 平直性问题

- 为什么宇宙始终是平直的?

### 解决方案

- 暴胀
  - 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。
  - 经过暴胀后宇宙位形会变为平直