

天体物理概观复习资料 by MHY

气体尘埃团-原恒星-主序星-红巨星-白矮星

"眼见为实"

只有核心才进行核反应，一个光子出来要一千万年

金星：浓密 CO₂ 大气，4-500 度

“凌日”

太阳风剥离火星大气：200g/s

地球有磁场，引到两极，产生极光

木卫一：火山

木卫二：冰

木卫三：最大

土卫六：第二大，浓密大气 惠更斯探测器

天王星光环 光环全是石头沙子

如何认识宇宙

肉眼+简单仪器

望远镜

太空考察&理论研究

银河系中央尘埃星团较多，阻挡光线，后面还是恒星

牛郎星&织女星 16 光年

全天肉眼可见约 6000 颗恒星（全年统计），88 个星座

北极星在小熊星座

北斗的斗指着北极星，指正北

地球自转轴有进动，26000 年周期

黄道十二宫

望远镜口径越大，分辨率越高（艾里斑）

反射望远镜&折射望远镜

折射望远镜已经停止使用，长度过长

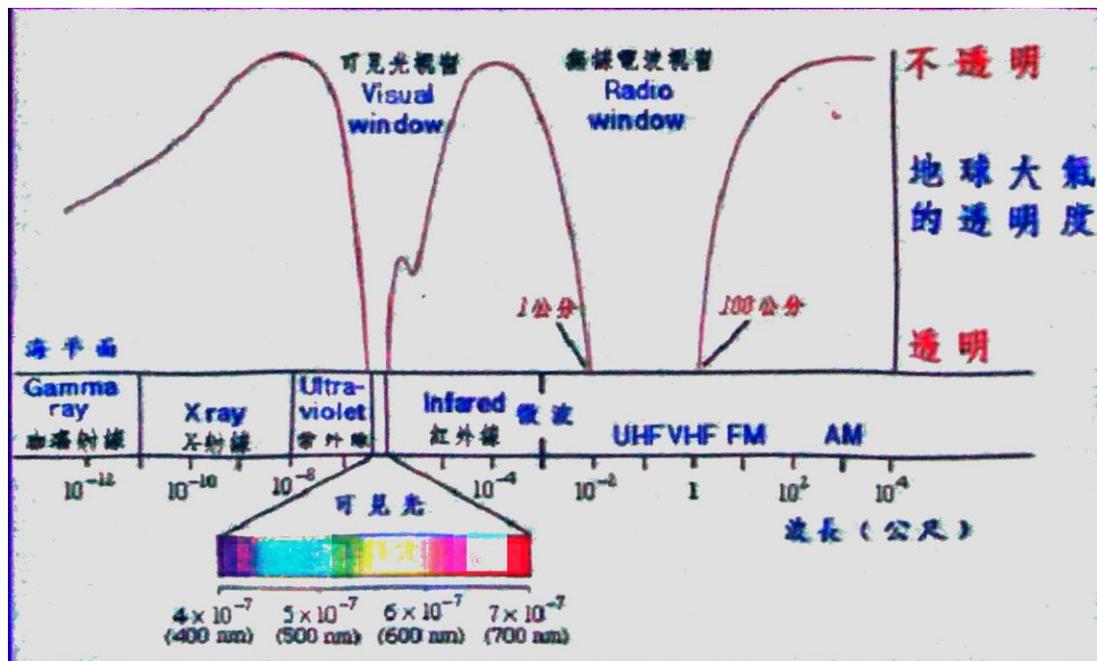
拼嵌式望远镜 多个晶片拼在一起，厚度仅 15cm，但需要精密控制

亮度明显提升

LAMOST 无需打孔事先获取位置，然后自动调动最近的光纤获得光谱图

观测 4 米不动，转动反射装置

地球大气窗口



指地球大气对不同波长的光的透明度

可见光窗口，红外窗口，射电窗口：透明度极高

太阳射电

分辨率： $\theta = 1.22\lambda/D$ (弧度) (艾里斑公式)

射电望远镜：直径较大 (100 多 m) 一开始精度不高 (直径 1000km)

四大发现：类星体，星际分子，宇宙微波背景辐射，脉冲星

FAST 500M

射电望远镜阵列 (利用不同仪器之间干涉)

“平方公里阵列” 15m 直径*3000 台

下一代空间望远镜 JWST 定位于拉格朗日 L2 点 6.5m 18 块六边形

观测效果提高很多倍

主要工作在可见光波段，还有少量红外

全波段

红外空间望远镜

紫外空间望远镜 空间分子

X 射线空间望远镜 (钱德拉 牛顿 伦琴 慧眼：硬 X 射线，发现了引力波的闪光)

γ 射线空间望远镜 (康普顿 SWIFT 费米)

原来用于观察苏联核爆实验，后来肚皮朝上观察宇宙

牛二在先，先有惯性质量后有引力质量

电力可以屏蔽，不可消除

中立可局部消除，不可屏蔽

时间 距离 质量没有明确定义

亮度

视星等：星等数越大，亮度越低

定量表示：

$$\frac{E_1}{E_2} = 100^{\frac{m_2 - m_1}{5}}$$

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log \frac{E_2}{E_1}$$

晴朗无月的旷野下一公里外的蜡烛亮度大致为一等星的亮度

10km 为六等星

人的感官大致呈指数分布

地面上最大望远镜可以看到+25

哈勃望远镜可以看到+30

望远镜可以看到几等星？

$$\text{肉眼} m \approx 7 + 5 \log D (cm)$$

举例：10cm 望远镜大致可见 12 等星

绝对星等

刚才的视星等只反映视觉亮度，但是举例会对亮度产生影响。

有的天体很亮，但是离得很远显得很暗，那么真实亮度？

$$\frac{E_{10}}{E} = 100^{\frac{m-M}{5}} = \frac{r^2}{10^2}$$

r: 距离

E: 实际亮度

E_{10} : 把该天体移动到10秒差距(pc,3.26光年)处的视星等

m: 视星等

M: 绝对星等，天体在 10 秒差距外的视星等，反映天体的真实亮度

因此有：

$$m - M = 5 \log r - 5$$

太阳绝对星等大概 5 等

温度

一开始人类对恒星的化学组成、温度

认识有着巨大的谬误

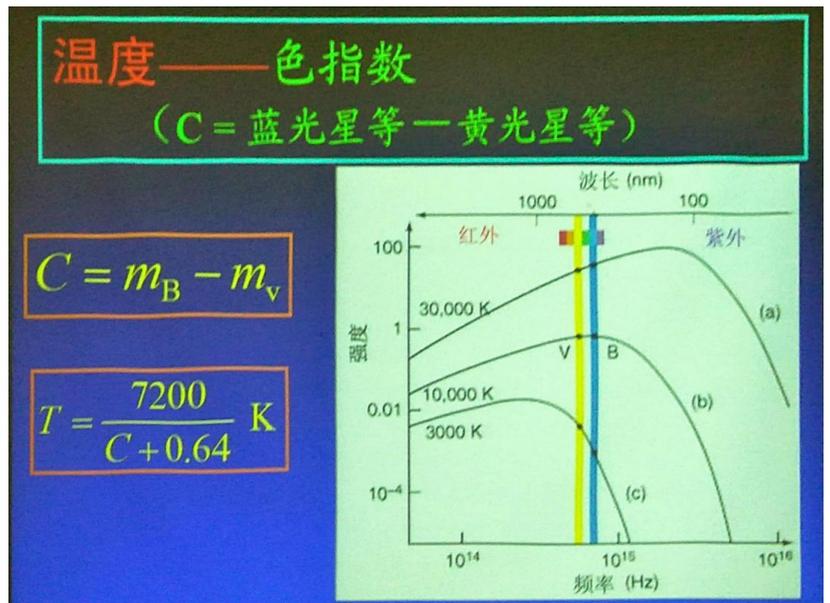
$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T}$$

颜色反映了温度

不同的光观察出来的星等是不同的

代入经验公式 $T = \frac{7200}{C+0.64} K$ 可得温度

其中 $C = m_B - m_V$



化学成分

观察光谱可得元素组成

He 是在太阳光谱中首次发现的

谱线红移：光的多普勒效应，显示宇宙正在膨胀，可以用于观察天体相对观测者的速度

双星相互旋转，因为相对地球速度不同，其波长会发生分裂，并周期性地分合

哈佛光谱分类

O B A F G K M

温度高->低

颜色蓝白->红

越往后，金属越丰富甚至出现分子谱线

无论哪门物理，书一翻，烦死人了！ ——向守平

注意电离氦（电离两个电子）和中性氦（电离一个电子）的区别

赫罗图

我们已经得到了亮度（绝对星等！）（纵坐标）和表面温度（横坐标）

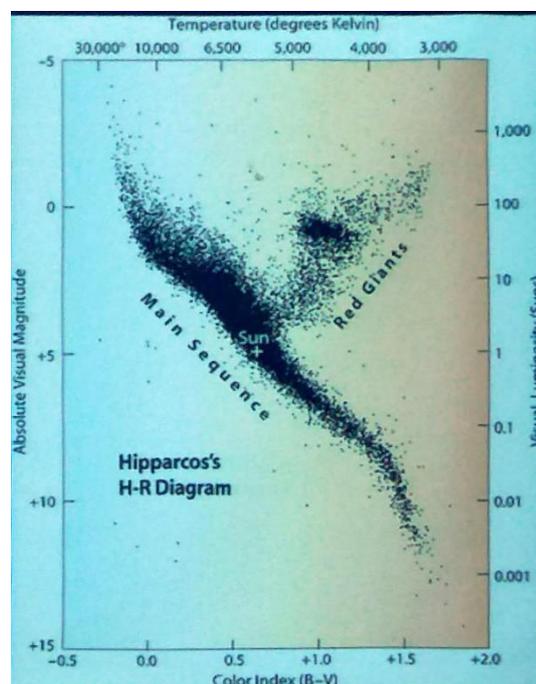
绘制一张图

主星序 主要恒星的序列 主序星/红巨星

左下方：白矮星

赫罗图上有一些斜的虚线：等半径线

利用黑体辐射可以得到其半径



测量距离——三角视差法

三角视差法：利用恒星周年视差

测量地球半径：

某日太阳直射某处地面，从另一地方测量影子长度，得太阳高度角，测量两地距离可得地球半径

测量地月距离：

视差法：从两个天文台观察同一个环形山，可得夹角，地球半径已知，可得弦长，三角函数计算得到结果

测量日地距离：

开普勒是怎么做的：

知道各大行星绕日公转周期

把距离之比转化为角度 \sin 之比

因此根据开普勒定律，只要知道日地距离，就可以知道整个太阳系所有行星距离

16 几几年，卡西尼测得地火距离最近时的距离，因此测得太阳系尺度

17 几几年，哈雷利用金星凌日，测量金地距离

请库克船长在南半球测，一堆天文学家在北半球测

现在用雷达测量

恒星距离测量：三角视差法

【 π 是视差】

一秒（角度单位）对应的视差是一秒差距

银河系的物质密度：大概 10km 一颗沙子

三角视差法只能测量大概 100pc，还是用了喜帕恰斯卫星的结果

测量距离——变星测距法、超新星测距法、宇宙学红移（量天尺）

造父变星的亮度周期性变化

造父变星具有周期-光度关系，用这个得到平均绝对视星等(M)，比较目视星等(m)，可得距离
哈勃利用这个证明仙女座大星云是河外星系

超新星也具有光变曲线

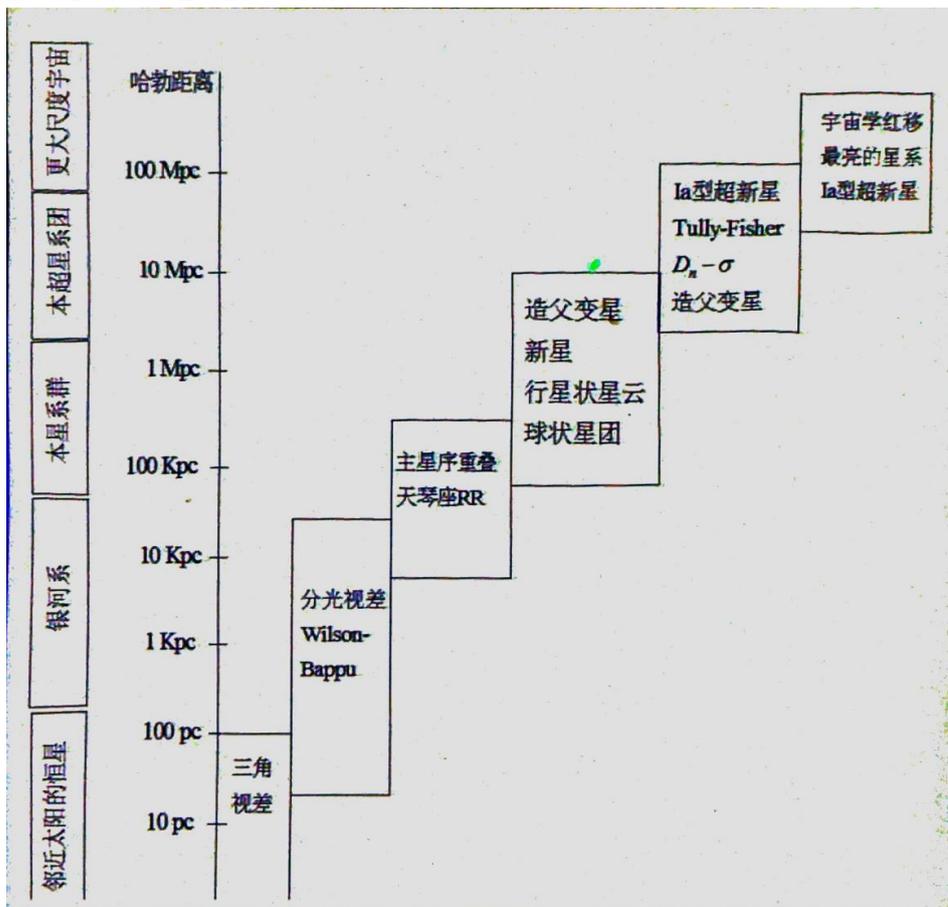
不同类型超新星光变曲线不同

I 型超新星：白矮星的产生

II 型超新星：中子星的产生，最大亮度较低

SNI 型：光极大时绝对星等大概-19 等

SNII 型：光极大时绝对星等大概-17 等



重合部分：相互对照，使可信

宇宙学红移：利用光的多普勒效应，谱线红移与距离成正比

雷达方法只适用于太阳系内

恒星质量测定

太阳的质量可以用万有引力定律测量

双星系统可以利用周期，距离测量质量之和

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2)$$

质量与光度有关，测的比较糙

恒星年龄测定

理论分析+观测

$$E \propto M$$

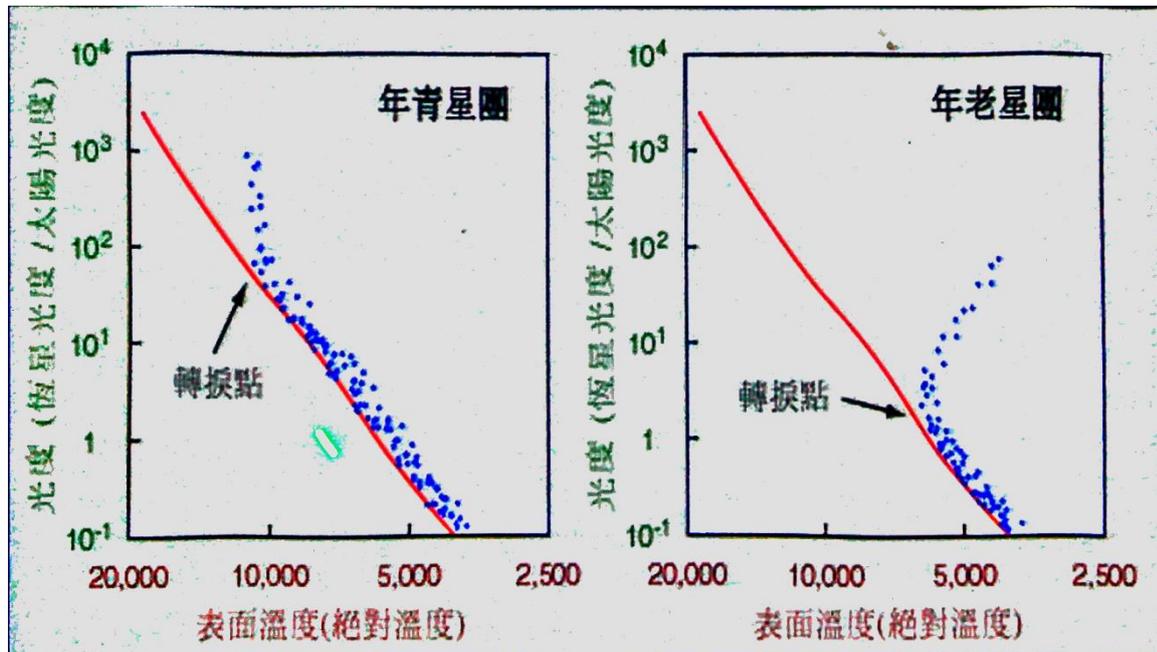
$$L(\text{光度}) \propto M^n$$

$$\text{年龄 } t \sim \frac{E}{L} \sim M^{1-n} = \frac{1}{M^{n-1}} (n > 1)$$

质量大，寿命短，质量小，寿命长

星团年龄测定

一个星团同时生成一堆恒星，质量不同，是一团气体凝聚



根据转换点可以计算时间（需要计算机模拟）

恒星各参数范围

光度	$10^{-4} \leq L_*/L_\odot \leq 10^6$
半径	$10^{-3} \leq R_*/R_\odot \leq 10^3$
质量	$10^{-1} \leq M_*/M_\odot \leq 10^2$
密度	$10^{-9} \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 10^{16} \text{ g/cm}^3$

恒星的演化

气体尘埃团-原恒星-主序星-红巨星-白矮星/中子星/黑洞

尺度：100 亿年

最初人们不知道核反应，认为：

星云-红巨星-蓝白主序星-沿主星序演化-红矮星

但是收缩热能释放只有三千万年，明显不对

一般来说，一大团气体可能同时诞生多颗恒星（成千上万都有可能）

星云质量一般在 $10^5 M_{\odot}$

恒星演化的快速收缩过程

一开始等温收缩、收缩除了凝聚之外还有碎裂过程

然后绝热收缩，密度增大

慢收缩过程

负热容体系，放热+温度升高

气体是自引力系统，全靠气体的分子自身的引力压缩

能量来源：收缩释放的引力能

$$L = -\frac{dE}{dt} = \frac{dU}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{dV}{dt}$$

辐射能	内能增加	引力能减少
-----	------	-------

热寂说：整个宇宙最终处于温度均匀的状态

为什么热力学第二定律不会导致热寂？

宇宙不是一个闭合系统

引力的作用：

运动是普遍存在的，宇宙的密度是不均匀的，有涨落，引力凝聚

宇宙是负热容系统，即使局部出现热平衡，也会很快打破

宇宙膨胀会打破平衡

因此，密度均匀-不均匀，热平衡-非热平衡

赫姆霍兹的担忧没什么道理

当开放系统远离平衡态时，会发生非线性，不可逆输运过程

无序结构发生突变形成有序结构

原恒星在诞生的过程中，外层对内层辐射不透明，内层辐射不出去，温度迅速升高

此时能量传输主要靠对流层进行

对流层演化越充分，内外层的温度越接近

原恒星质量越大，林氏阶段越短

原恒星经过林氏阶段收缩，进入主星序

两个太阳质量大小以内的恒星：

温度达到 $8 \times 10^6 \text{K}$ 到 $2 \times 10^7 \text{K}$ 时，开始热核反应，

四个氢原子编程一个氦原子，放出两个电子+两个中微子+26.20MeV

太阳 100 亿年的生命周期内，核心区域聚变成氦的氢的质量占太阳质量 1/10
两个太阳至八个太阳大小的恒星：CNO 循环

CNO 作为催化剂或中间生成物

一旦内部氢变氦核反应停止，则离开主星序

恒星质量与在主星序停留时间关系：见书 P90 表 3.1

主序星后：P102 图

内核堆积不反应的氦，核心收缩，放热，外壳膨胀，成为红巨星

氦核收缩，温度升高，氦开始燃烧。

核心变为碳氧，外面有燃烧的氦核氢，亮度很大，发红

然后外壳抛散，碳氧核变为白矮星

太阳变成红巨星，轨道会达到火星

抛散的外壳会形成行星状星云，观察到一个环。

形状为环的原因：观察角度比较薄，其他方向比较厚

恒星内部的力学平衡

通常的恒星：气体压力与引力平衡

白矮星：电子简并压与引力平衡

中子星：中子简并压与引力平衡

简并压：费米子的德布罗意波长与粒子之间的平均距离相近时出现排斥力（泡利不相容原理）

白矮星的钱德拉极限：1.4 个太阳质量，否则塌缩，爆炸，形成超新星

密度： 10^6

恒星演化的整个过程是引力操控的

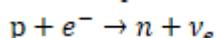
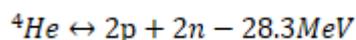
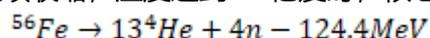
某一层核燃料消耗尽，引力导致收缩，温度升高，进行更深层的核反应

引力自然约束，人工只能硬来，强迫它们发生核反应

大质量恒星在演化过程中可能会反复一两次类似于震荡，但是很快变成红超巨星

为什么核反应到铁为止？铁的结合能最低

铁核继续收缩，温度达到 50 亿度时，核心迅速中子化，变为中子星，发生超新星爆发



中子星直径 10km， $2-3M_{\odot}$ ，密度 10^{15}g/cm^3

强烈的中微子束会破坏铁核，引起爆炸，中间剩个中子星

首次来自中国的对物理科学的实质性贡献：中微子震荡的第三种模式的测量

中子星具有辐射——脉冲星

太阳 25 天转一圈，磁场一个高斯，中子星由于塌缩过程中角动量守恒，一秒钟可以转好几圈

化学元素来源

H He Li Be B: 大爆炸合成

正常恒星内部核反应: \sim Fe

Co 往下: 超新星爆炸合成

因此, 太阳系一定生于超新星遗迹!

黑洞

$$\text{逃逸速度: } \frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = c$$

$$\text{则有引力半径 (视界半径, 事件穹界) } r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

视界 (无限红移面) 之内的区域成为黑洞

引力红移: 光子需要克服引力势能, 速度不变, 能量降低, 波长变短。

黑洞的密度不一定很大

$$\rho = \frac{M}{\frac{4\pi}{3}r_g^3} \propto \frac{1}{M^2}$$

史瓦西时空中光的传播 P158

取光速 $c=1$ $dt/dr = \pm 1$

黑洞是无毛的

经典黑洞只有三个参量: 质量, 角动量, 电荷

拖着周围空间一起转

黑洞热力学

两个黑洞合并, 质量守恒

黑洞的面积只能增大

由热力学第二定律, 熵和面积成正比, 且只有面积是变量

温度反比与质量

黑洞越小, 温度越高

然而根据量子隧道效应, 黑洞可以辐射。黑洞不黑

黑洞辐射强度和寿命成

小黑洞寿命短, 大黑洞寿命长

一个 100t 的黑洞, 寿命 0.3s

一个 10^{15} g 的黑洞, 寿命 10^{10} 年

太阳大的黑洞, 寿命 10^{68} 年

小黑洞很快爆发, 大黑洞 (星系黑洞)

哪些地方有黑洞?

星系中心/双星系统

$2GM/RC$ 是引力半径

类星体

中心是超大质量黑洞

黑洞的吸积盘旋转下落，加入，摩擦，发出强烈辐射

吸积盘产生磁场，并产生垂直于吸积盘的高速喷流

磁场被喷流至远处，加速电子，产生强辐射，形成射电瓣

喷流可以达到十几光年长，甚至能喷流 40 万光年长，比银河系还长

密近双星的演化

拉格朗日 L1-5 点

洛希瓣：由临界等势面包围的空间

一旦气体充满洛希瓣（比如红巨星膨胀），稍有扰动，气体就会通过拉格朗日 L1，被另一颗恒星吸过去

这时候，质量大的演化为致密星（eg 白矮星）

然后质量小的因为吸收了，质量变大，也开始演化，气体又被致密星倒吸过去，形成（白矮星的）吸积盘

最后，致密星的质量一旦大于 1.4 太阳质量（钱德拉塞卡极限），变成 IA 型超新星，爆炸

中子星吸积：变成 X 射线脉冲星

黑洞吸积

引力波的探测

引力波的间接探测

脉冲双星：周期变快，越来越近，认为能量以引力波的形式辐射出去

双脉冲星系统也可以进行间接验证，但是目前只发现一个（难以发现：脉冲方向有要求）

两个超大质量天体的相互碰撞也会引发引力波

不能拿引力波通信：爆炸一个氢弹，空间收缩 10^{-27}

宇宙学的观测事实

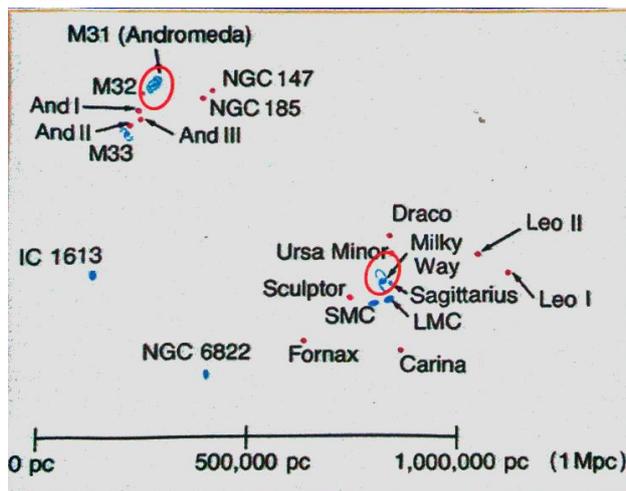
星系的大尺度分布 (>100Mpc, 一亿秒差距, 三亿光年) 是均匀的 (各向同性)

星系的哈勃分类 (椭圆星系, 棒旋星系, 漩涡星系, 不规则星系 大麦哲伦/小麦哲伦星系)

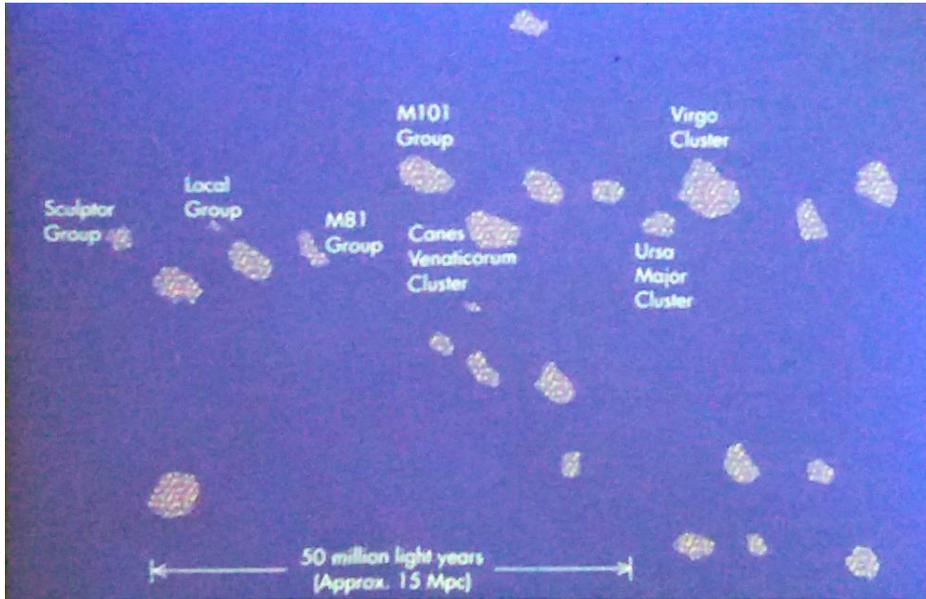
太阳和银心大概三万光年

周围有球状星团, 里面有百万颗恒星

本星系群



本超星系群



哈勃关系

宇宙中的恒星在远离我们。星系越远，速度越快

宇宙微波背景辐射：2.7K 黑体辐射

宇宙天体年龄：球状星团年龄在 100 亿年左右

元素丰度：H: 75%, He: 25%, 重金属 < 1%

反物质粒子数很少 (大概 10^9 倍)

光子数比重子数大得多 (大概 10^9 倍)

一维时间，三维空间

宇宙的有限与无限

奥尔伯斯佯谬 P244

三个假设：

宇宙中恒星无限，均匀分布

恒星密度基本不变

宇宙是静态的

可得：宇宙的星空是明亮如白昼的

然而，宇宙并不是明亮如白昼的

问题在哪？

宇宙并不是静态的

解释：

红移到无穷大，就看不到了

两个足够远的点的膨胀速度可能超过光速，就看不见了

(因为这根本不是狭义相对论，没有惯性参考系连接这两个点，是空间膨胀而不是相对运动)

宇宙的大小是有限的

宇宙的时间有开端

宇宙是在膨胀的

在爱因斯坦看来，没有引力，只有空间弯曲

所以有一种闭合宇宙模型

即认为宇宙空间是闭合的，但是没有边，类似于甜甜圈（←这个比喻是我自己加的...）

宇宙的诞生与发展（宇宙大爆炸理论）

宇宙大爆炸并不是一次爆炸没有压力、冲击波，而是宇宙空间从混沌演化为连续的过程

既然宇宙未来比现在大，那么以前一定比现在小

伽莫夫的观点（创新/智慧的火花一闪）

讥讽：如果这样，宇宙不就是一个大爆炸吗？

然而确实是一个大爆炸

宇宙中元素含量：H 约 75%，He 25%，其他只是零头

宇宙中所有恒星核反应的结果不能达到这个氦元素数量的 1/10

如果宇宙没有开端，那么宇宙可以诞生无穷多代恒星，重元素应该很多，因此时间是有开端的
气体行星表面基本全是氢

把时间倒推回去，宇宙一定有一个开端

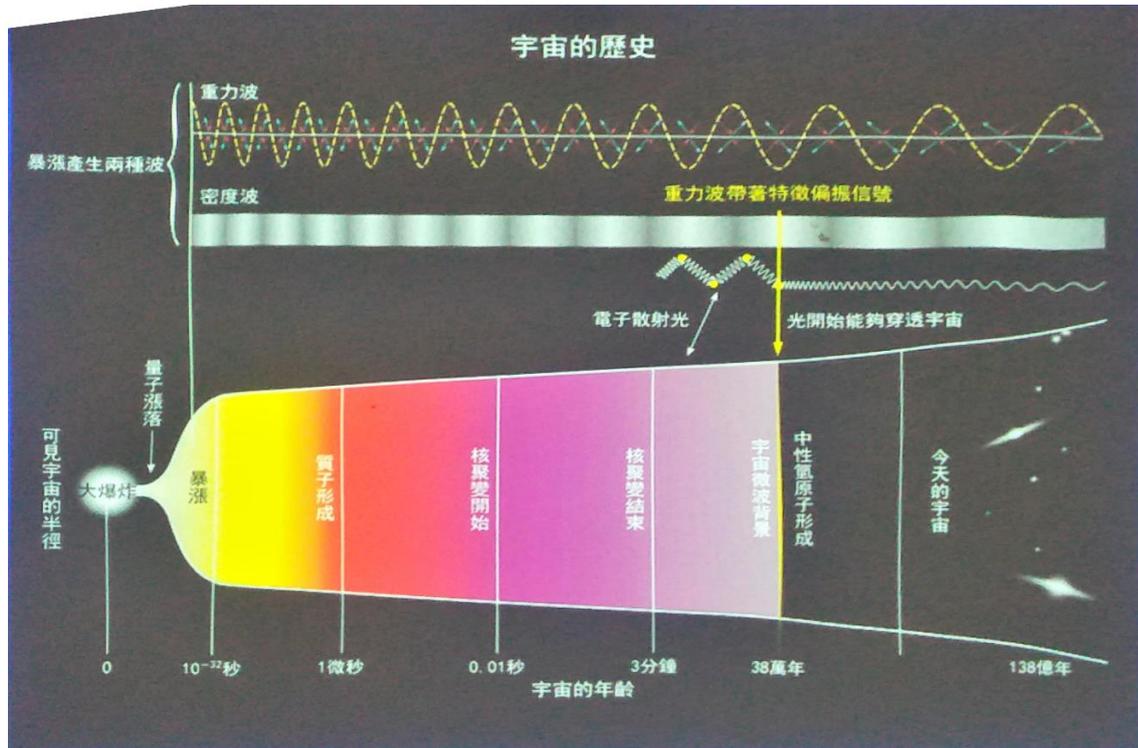
宇宙早期是高温高密度的

两个重要假设，已经得到验证：

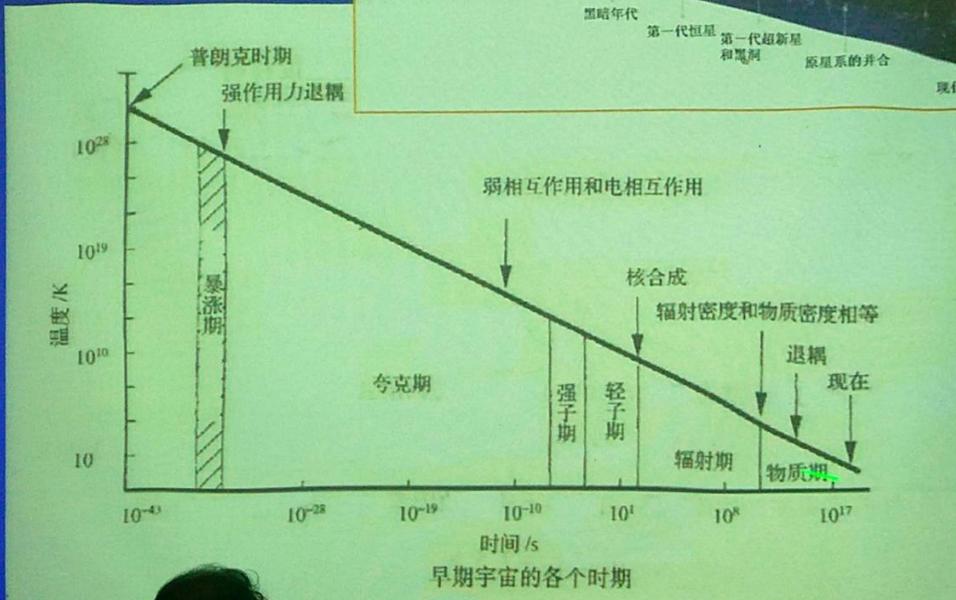
宇宙年龄在 200 秒时，温度十亿度，产生大量的氦

早期温度充满热辐射，遗迹到现在应该（宇宙微波背景辐射）是 5K（实际是 2.73K）

宇宙微波背景辐射 P254



早期宇宙演化简史



温度降到了 4000 度，产生大量中性粒子，光不再散射，可以透过宇宙，产生辐射

起伏：量子涨落， 10^{-5}

为什么是 4000K?

电子的电离能比这个高很多

普朗克分布的“高能尾巴”

宇宙中光子数是可见粒子是 10^9 倍，这些高能光子虽然只占很少，但足以电离所有电子直到 4000K 才能够抵消

宇宙的早期膨胀

普朗克时期-暴涨期（会产生偏振）-夸克期...

元素丰度

10^9 K 时，元素大量合成

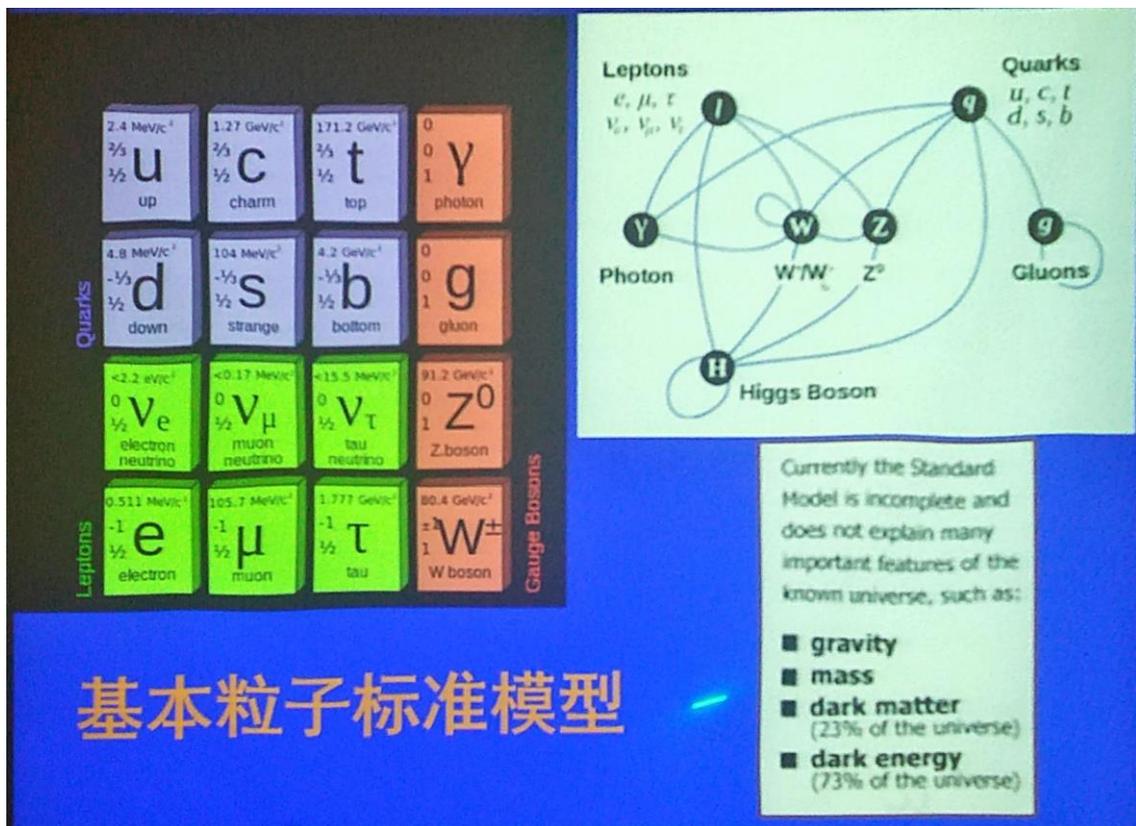
氦元素在大爆炸初期大量合成

基本粒子标准模型

宇宙中的夸克有六种味，每种味又有三种颜色，还有反夸克，一共 36 种

14 种中间玻色子

轻子：12 种



标准粒子模型（大统一理论）：62 种
 引力？质量？暗物质？暗能量？
 希格斯玻色子：提供质量，质量被解决了

宇宙的创生？

宇宙创生于物理真空
 大爆炸是一次巨大的真空潜能的释放
 普朗克时间之前(10^{-43} s)，时空是量子化的，不连续，无法追究

四种相互作用力

引力(10^{-40})、强相互作用(1)、弱相互作用(10^{-12})、电磁相互作用(10^{-2})
 弱电统一理论已经证明 (100GeV) (CERN 二十年前已经验证完毕)
 大统一理论: 10^{15} GeV (日地距离)
 超弦: 10^{19} GeV (10 光年)

引力迄今为止不能量子化

在宇宙极早期，如果正反物质粒子数相等，那么就全都湮灭了
 然而反物质数量有破缺（对称性破缺）， 10^{-10}

**这件衣服上面如果有两个兜，就有点傻，我就成了个傻老头了。
 女孩子牛仔裤有很自然的洞，这是破缺的美。**

——向守平

宇宙历史遗迹	时间	相应的物理学
时空拓扑	10^{-43}	超 x 理论 (超弦、超对称、超引力)

例子反粒子不对称	10^{-35}	大统一理论, 粒子物理
轻元素生成	3min	核物理
宇宙微波背景辐射	30 万年	原子物理
天体生成	1 亿年-现在	牛顿力学、现代物理

宇宙膨胀

只有相互之间引力作用可以完全忽略的物体, 它们之间的距离才会随宇宙膨胀而增大
凡是依靠引力、电磁力、核力等已经形成的稳定束缚体系, 都不再随宇宙膨胀而膨胀。比如: 原子、分子、地球等

我们不会因为宇宙膨胀而长胖。 ——向守平

通过对超新星光变曲线的观测可以发现, 宇宙正在加速膨胀
超新星是标准烛光, 是量天尺

目前计算结果: 宇宙年龄 137 亿年, 哈勃常数 $h=0.7$

爱因斯坦丢在废纸篓里的东西救了我们这些做宇宙学的人的命 ——向守平

宇宙演化模型

还有其他的替代模型:

光子老化模型 (中间星系多, 发生多次散射, 导致红移)

稳恒态模型 (宇宙是由一堆泉眼构成的, 是多点膨胀)

等

寻求自然事物的原因, 不得超出真实和足以解释其现象者——牛顿

如果某一种理论已经能解释所有现象了, 就没有必要把它复杂化。

这些替代模型不能解释的: 古老天体的年龄 100 亿年、宇宙微波背景辐射、氦丰度、光子数与重子数之比、正反物质之比

宇宙物质的成分

暗物质存在的证据?

动力学测量

假设一个旋涡星系的所有质量集中在核心, 那么其他恒星应该绕其旋转。旋转速度应该正比于 $\sqrt{\frac{1}{r}}$

然而实际观测发现, 距离星系中心越远, 转动速度没有下降

解释: 星系周围有巨大的暗物质晕

质光比

椭圆星系虽然不转, 但是其质量也可以测量。

质光比: 质量与光度 (单位时间内向所有方向发出的辐射的量) 之比 (质量是动力学方法测量的)

发现: 椭圆星系质光比 50~80。就算是不规则星系, 也有 5~10

结论：大部分质量是不发光的→有暗物质！

引力透镜

一个恒星的质量很大，会扭曲空间导致光线弯曲

一个恒星被一个大质量星系折射，会形成一个爱因斯坦环（或光弧）

被暗物质折射也有

什么是暗物质？

一定是粒子，可以形成成团结构，分布不均匀

暗物质不在 62 种标准粒子之中

暗能量？

是一种场，引起宇宙的加速膨胀，是真空场。

一定要有，否则宇宙年龄不够长

平行宇宙？

宇宙就像一个气泡，可以平行演化

目前为止没见到什么交集

时光隧道？

因果律是不可以打破的 ——爱因斯坦

更加深刻的问题：

物理规律是否可以外推到整个宇宙？

物理学常数是否真的是常数？

宇宙中最不可理解的事情，就是宇宙是可以被理解的。

—— 爱因斯坦