

# 从赫罗图看恒星生命历程

欧阳博丁

oybdooo@mail.ustc.edu.cn

中国科学技术大学

“地球系统科学导论——行星空间”课程汇报

2023 年 4 月 7 日

# 目录

1 引言

2 赫罗图

3 恒星生命历程

4 结语

# Section 0

## 引言

# 引言

*Zwei Dinge erfüllen das Gemüth mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht, je öefter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschaeftigt: der bestirnte Himmel über mir und das moralische Gesetz in mir.*

伊曼努尔·康德的墓志铭原文（出自其著作《实践理性批判》）



# 引言

**有两种东西我们对它们的思考愈是深沉和持久，它们所唤起的那种惊奇和敬畏就会愈来愈大地充溢我们的的心灵，这就是繁星密布的苍穹和我们心中的道德律。**

原中国科学技术大学副校长、天体物理中心主任  
(1936.2.12-2012.4.6) 译

三尺讲坛，授物理、天文、宇宙学，先生是莘莘学子良师  
一介书生，举人权、自由、民主旗，斯人为吾国吾民前驱

# 引言

夜晚仰望星空，看到的星光点点即是一颗颗恒星。几千年来，绝大部分恒星的位置和发光的强度，可以说没有任何变化。

恒星真的永“恒”吗？答案当然是否定的。我们今天就来聊聊恒星的生命历程。



# Section 1

## 赫罗图

# 光度

表示恒星实际亮度的物理量，定义为恒星整个表面发射的所有波段的总辐射频率（总辐射流量）。由于恒星发出的电磁辐射近似为黑体辐射：

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

（注：按照天文学的历史来看是先通过观测定义了星等，通过距离计算其绝对星等，进而定义出光度，再由黑体辐射规律定义其绝对温度，本篇报告由于时间有限，只能讲一种比较容易让大家理解的方式）



# 温度

我们只能通过间接方法测量恒星温度。

- 恒星发出的电磁辐射近似为黑体辐射，随波长而变的强度分布为普朗克分布。根据黑体辐射的维恩位移定律：



$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

- $\lambda_{max}$  为黑体辐射能量分布曲线最大值对应波长， $T$  为黑体温度， $b$  为维恩位移常量。
- 所以，恒星的颜色告诉我们恒星的温度。哈佛分类法把恒星主要分为 O, B, A, F, G, K, M (R, N, S) 等光谱型，从左到右温度依次递减，颜色从蓝白到红。
  - 恒星的光谱分类是发现赫罗图的基础。

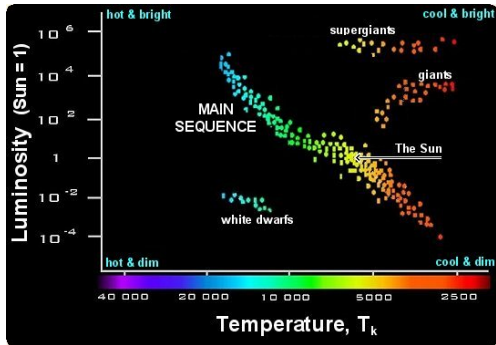
# 温度

哈佛分类法是由哈佛大学天文台台长爱德华·皮克林发起的，但是光谱分类主要由一些女性天文学家完成。



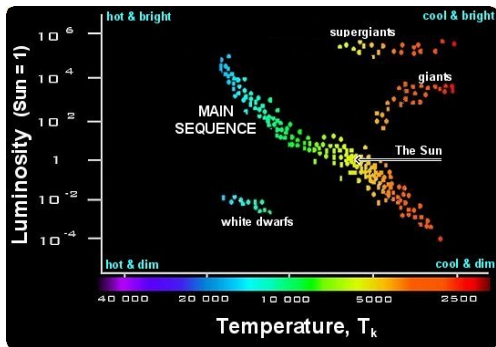
# 赫罗图

丹麦天文学家埃纳尔·赫茨普龙与美国天文学家亨利·诺利斯·罗素分别想要研究恒星光度与温度的相关性，将温度作为横坐标，光度作为纵坐标，也就产生了赫罗图（H-R Diagram）。



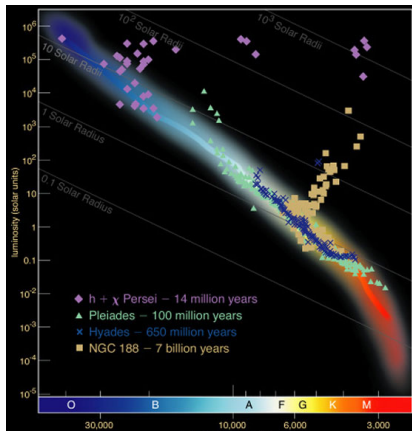
# 赫罗图

观测到的 90% 以上的恒星位于主星序上，图的右上角为红巨星或红超巨星，左下角为白矮星。



# 赫罗图

由  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$  可知，将纵坐标（光度）取对数后可画出等半径线。



# Section 2

## 恒星生命历程

# 恒星生命历程——能源

恒星的能源是什么？

- 1 化学能？（如果这样，太阳早该熄灭了）
- 2 引力能？（如果这样，太阳早该熄灭了）
- 3 核能！

**恒星的一生就是核反应炉从点燃到熄灭的过程。**

## 恒星生命历程——星云阶段

- 宇宙空间里弥漫着许多星际物质，大多是氢原子和氦原子。
- 星际物质受到扰动或刺激后，就会聚集起来，形成星云。





# 恒星生命历程——星云阶段

- 当星云的温度不是很高，经计算当气体的质量大于金斯质量时，星云会发生坍缩：



$$M_J \propto T^{\frac{3}{2}} \rho^{-\frac{1}{2}} \mu^{-\frac{3}{2}}$$

- $\mu$ : 平均分子量

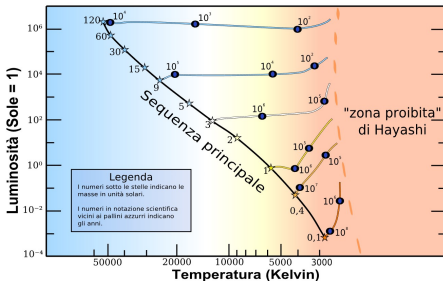
- 在坍缩的过程中，伴随着碎裂的过程。



图为詹姆斯·韦伯太空望远镜拍摄的船底座大星云正在形成恒星的过程。

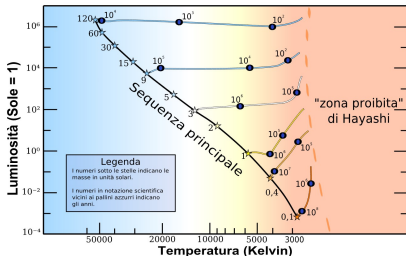
# 恒星生命历程——原恒星阶段

- 当星云坍缩结束，开始慢收缩，此时的星云称为原恒星。它发出的能量来自于收缩释放的引力能。
- 对于小质量的恒星，由于内部对流比较充分，表面温度与内部温度基本一致，收缩时表面温度基本不变，在赫罗图上也就是几乎垂直的林氏线。这一阶段被称为林忠四郎阶段。



# 恒星生命历程——原恒星阶段

- 进一步引力收缩使得温度整体升高后，中心处的氢聚变为氦反应的开始，标志着原恒星正式转变为恒星。
- 当中心部分温度达到  $10^6 K$  时，氦核反应首先开始：
  - $2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
  - $2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n}$
  - $2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + \text{p}$
  - $\gamma$ : 光子,  $\text{n}$ : 中子,  $\text{p}$ : 质子

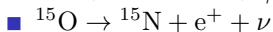
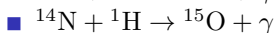
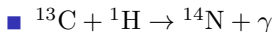
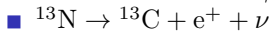
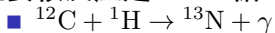


# 恒星生命历程——主序星阶段

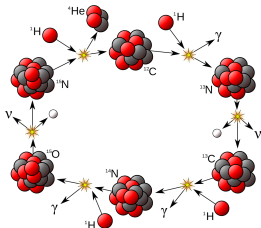
- 中心温度达到  $\sim 10^7 K$  时, 首先开始 pp 链式反应和 CNO 循环反应。
- 对于质量  $M \leq 2M_{\odot}$ , 中心温度  $7 \times 10^6 K \leq T_c \leq 2 \times 10^7 K$  的主序星, 核心处发生的反应主要为 pp 链式反应。
- 第一个分支 pp-1:
  - $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu + \gamma$
  - $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$
  - $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2^1\text{H}$
  - $\gamma$ : 光子,  $e^+$ : 正电子,  $\nu$ : 中微子
- pp-1 总结:  $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 26.20\text{MeV}$
- pp-2:  $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 25.67\text{MeV}$  (中间生成物 Li, Be)
- pp-3:  $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 19.23\text{MeV}$  (中间生成物 Be, B)

# 恒星生命历程——主序星阶段

- 对于质量  $M \geq 2M_{\odot}$ ，中心温度  $T_c \geq 2 \times 10^7 K$  的主序星，主要核反应是 CNO 循环。



- 第一个分支 CNO-1:  $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$



# 恒星生命历程——主序星阶段

## ■ 第二个分支 CNO-2:

- $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$
- $^{16}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^{17}\text{F} + \gamma$
- $^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu$
- $^{17}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + ^4\text{He}$

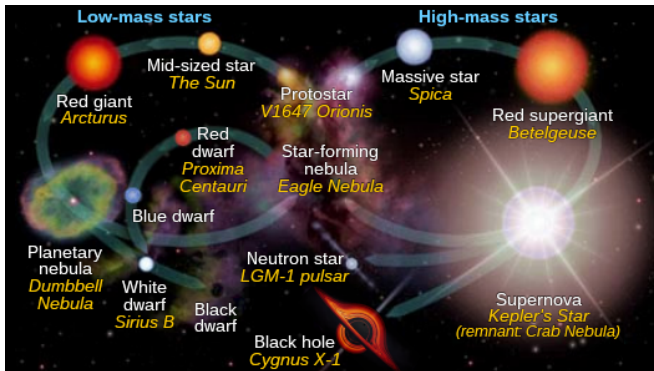
## ■ 总结果为:

- CNO-1:  $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 25.01\text{MeV}$
- CNO-2:  $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 24.80\text{MeV}$

恒星在主星序上停留的时间取决于中心区域氢燃烧的时间，当氢燃烧完后，恒星会离开主星序。经过物理推导，质量越大的恒星在主星序上停留时间越短。太阳约在主星序上停留  $1.0 \times 10^{10} y$ 。

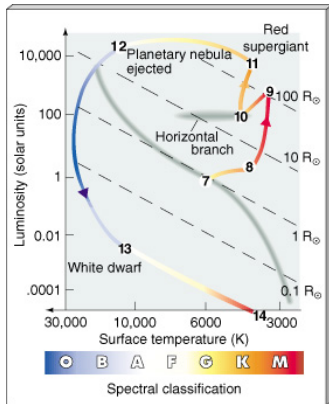
# 恒星生命历程——主序后演化

由于篇幅限制，本报告主要讲解类太阳恒星的演化 ( $M \sim M_{\odot}$ )。



# 恒星生命历程——主序后演化

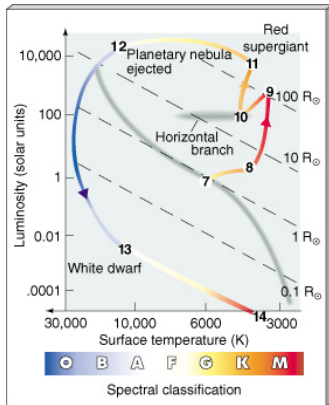
- 7-8: 核心氢枯竭, 氢核收缩, 壳层氢燃烧, 体积膨胀, 表面温度降低。最终变为**亚巨星**。
- 8-9: 外层气体阻挡光子逃逸, 表面温度几乎不变, 但膨胀继续。最终变为**红巨星**。
- 9: 核心氢开始聚变, 温度上升, 由于电子处于简并态, 绝热膨胀, 压力不减小, 氢进行爆炸式燃烧, 也就是**氢闪**。
  - $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + 7.27\text{MeV}$   
( $3\alpha$  反应)
  - $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$





# 恒星生命历程——主序后演化

- 9-10：核心燃烧氦，核层燃烧氢，此阶段为**水平分支**。
- 10-11：核心氦枯竭，核层分为氢层与氦层，都在燃烧，此阶段为**渐进巨星分支**。此分支过程中，由于半径不断增加，会形成**红超巨星**。
- 11-12：大量抛射外层物质。 $\text{CO}$  核坍缩成**白矮星**，**行星状星云**向外弥散。
- 13-14：白矮星冷却，最终形成**黑矮星**。（由于宇宙年龄限制，目前无法证实其存在）



# 恒星生命历程——演化结局

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
$8 < M < 12$ (?)	ONeMg白矮星
$12 < M < 25$ (?)	超新星 → 中子星
$M > 25$ (?)	超新星 → 黑洞

# Section 3

## 结语

## 结语

**恒星演化的整个历程是从弥漫的物质中来，又逐渐回到弥漫物质中去，由生而死，死而再生，是宇宙的不停顿运动中的一个环节，每一次循环都比前一次有所发展、有所前进。**



## 参考资料

- 1 向守平. 天体物理概论. 中国科学技术大学出版社, 2008.
- 2 方励之. 恒星是怎样演化的?. 方励之文集第一卷. 华夏文摘, 2018.
- 3 鲁道夫·基彭哈恩. 千亿个太阳. 湖南科学技术出版社, 2012.
- 4 李向东. 基础天体物理学课程讲义. 南京大学.
- 5 Lecture 22. Astronomy 110. University of Hawaii, 2005.
- 6 Bethe, Hans Albrecht. "Energy production in stars." Physical Review 55.5 (1939): 434.
- 7 维基百科, 自由的百科全书

# 感谢

# 感谢大家的聆听