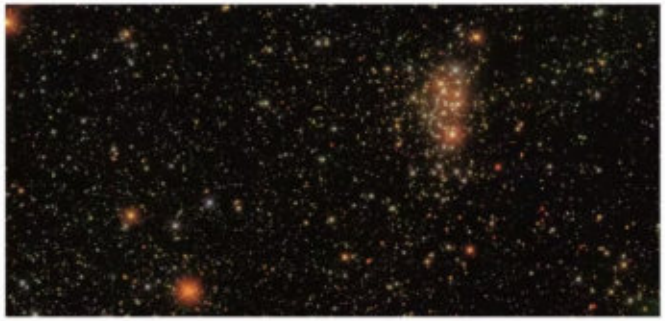
第六章：恒星的性质

为什么研究恒星与银河系

恒星是我们宇宙中的基本单元

- 恒星物理
  - 普通的恒星是银河系的砖块，它们的信息就是银河系的普查信息
  - 不普通的特殊恒星蕴含着我们尚不知晓的秘密
  - 恒星是元素熔炉，它的产物形成了我们所熟知的一切，包括人类自身
  - 双/多星系统演化是全局性的，但我们的理解还没有上升到这样的高度



- 银河系科学
  - 恒星是追踪银河系空间结构、运动学、动力学、化学演化的示踪器
  - 银河系考古解开早期宇宙的秘密，它需要借助恒星来完成
  - Ia型超新星是宇宙学阶梯中的主要一环（标准烛光）

（闫宏亮）

本章内容

- 恒星的各种性质是怎样的？如何测量？
  - 光度
  - 距离
  - 颜色、表面温度
  - 光谱及分类
  - 赫罗图
  - 大小、质量、密度
  - 寿命

恒星光度

- 恒星的本征光度(热光度)：所有频率辐射能量的总和
- 太阳的光度：

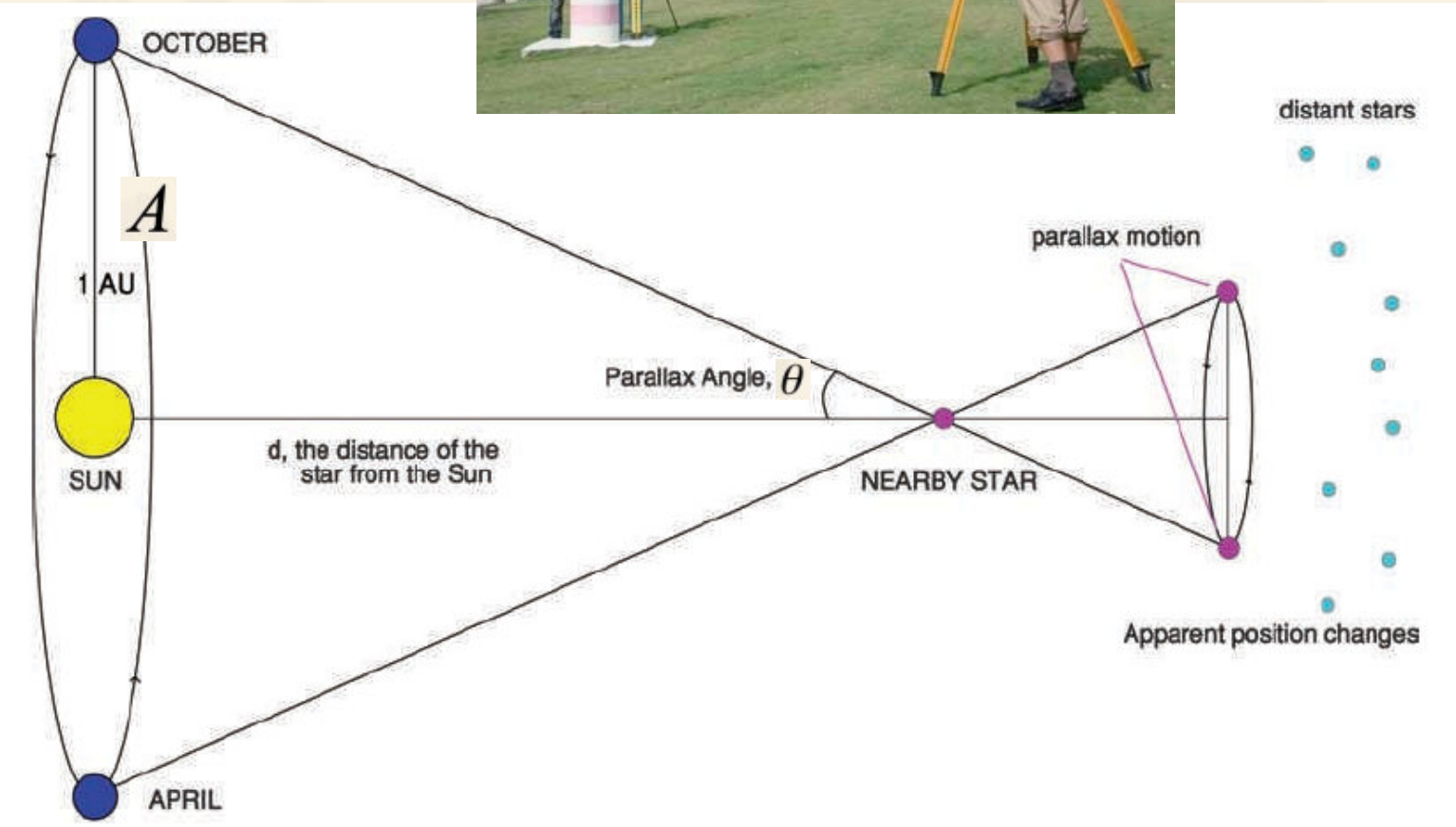
$$L_{SUN} = 3.86 \times 10^{26} W$$

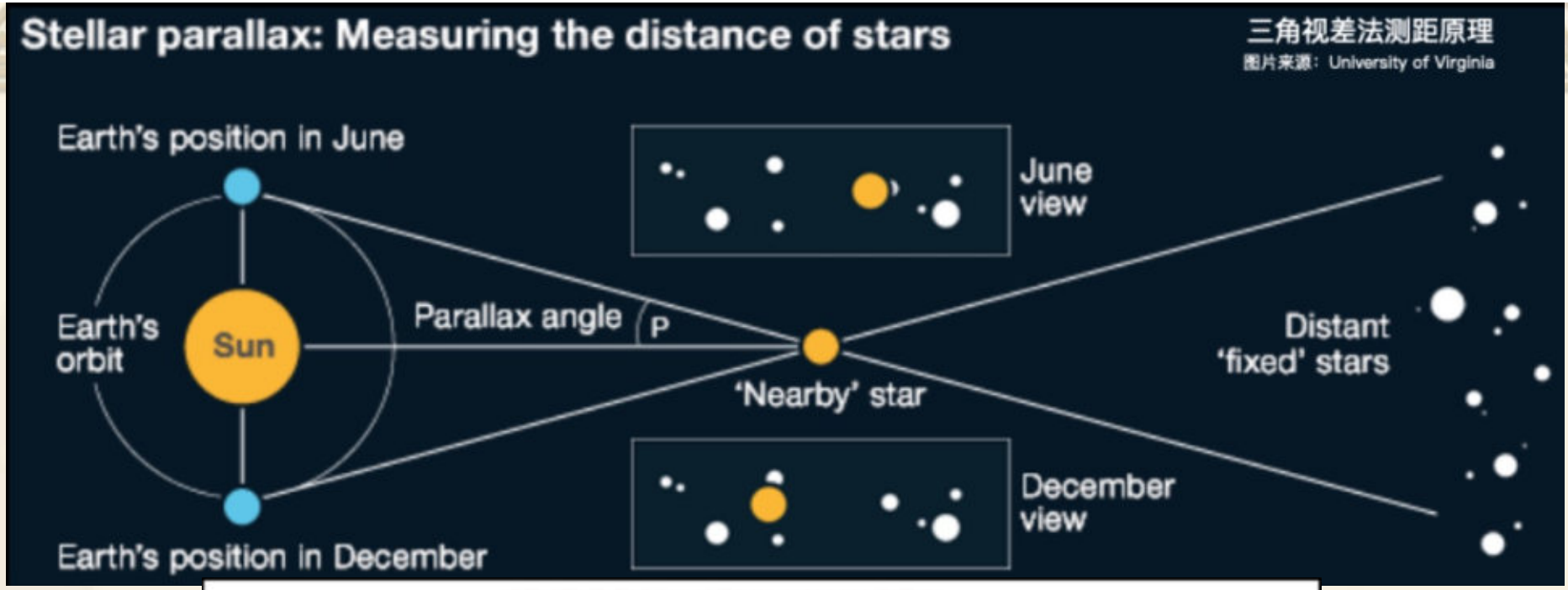
- 视光度（视星等）并不反映恒星的本征光度，还依赖于恒星的距离

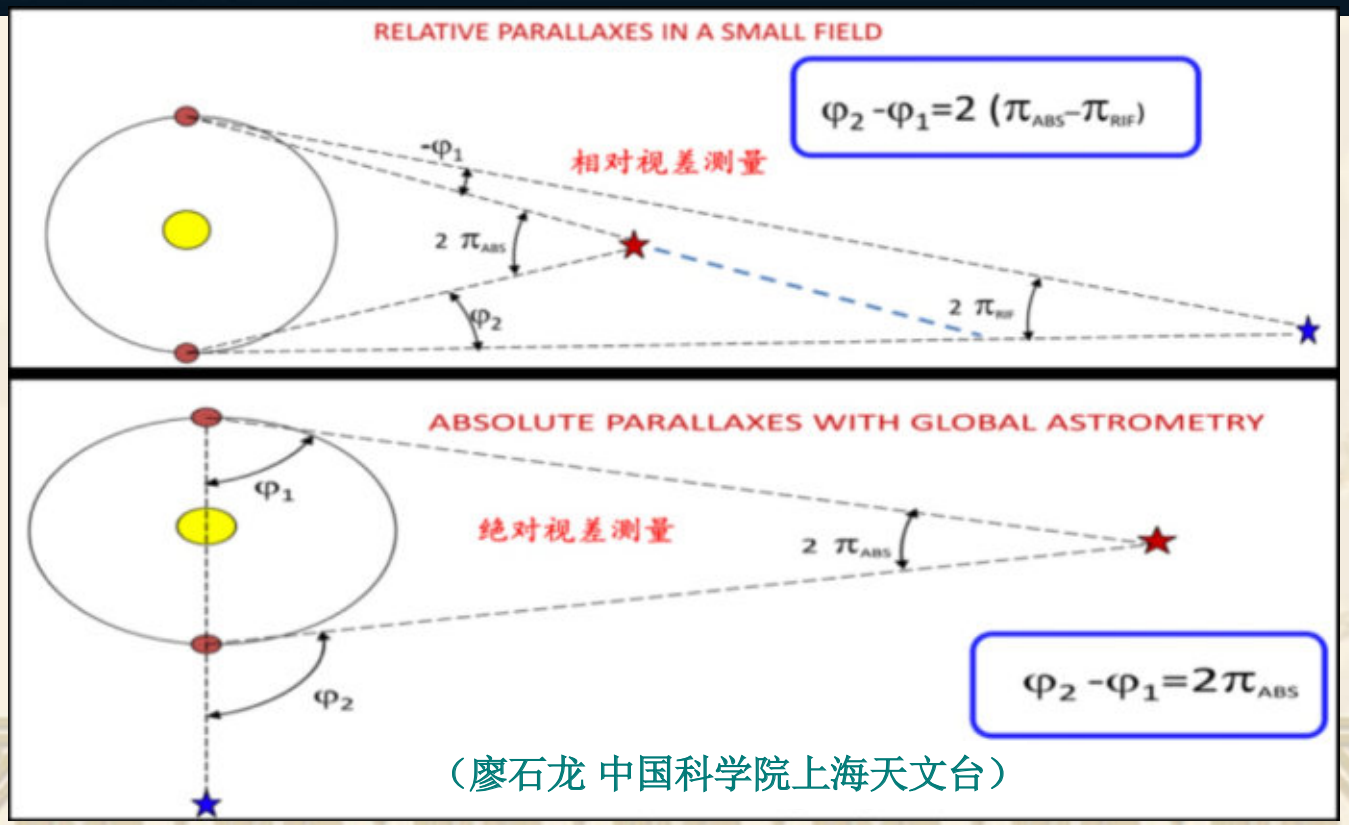
恒星的距离

- 三角视差法

$$d = A / \theta$$







（廖石龙 中国科学院上海天文台）

一个例子：

$$\theta = 0.1''$$

$$\theta = 0.1/(3600\times 57.3)rad = 4.85\times 10^{-7}$$

$$A = 1.49598\times 10^{8} km$$

$$d = A/\theta = 1.49598\times 10^{8}/4.85\times 10^{-7} km = 3.084\times 10^{14} km = 32.6ly$$

$$1ly = 9.46\times 10^{12} km$$

秒差距：

$$d = 1/p$$

$$1pc = 3.26ly$$

最近的恒星：
比邻星

$$\theta = 0.772''$$

$$\begin{aligned} d &= 1/0.772 \text{ pc} \\ &= 1.295 \text{ pc} \\ &= 1.295 \times 3.26 \text{ light years} \\ &= 4.22 \text{ light years} \end{aligned}$$

Article | Published: 30 March 2022

A highly magnified star at redshift 6.2

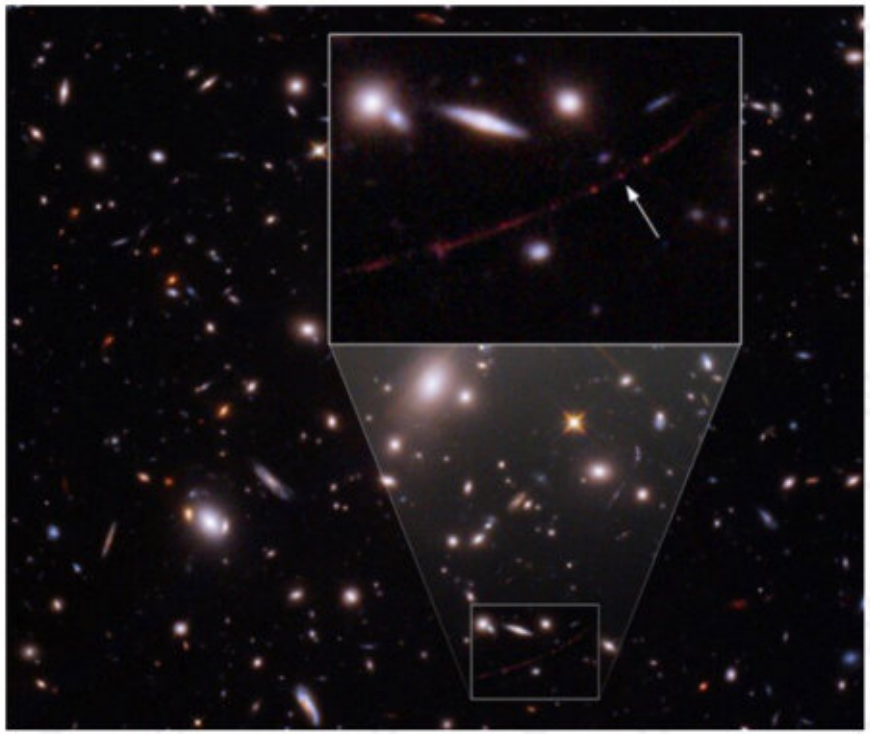
Brian Welch, Dan Coe, ... Tom Broadhurst + Show authors

Nature **603**, 815–818 (2022) | Cite this article

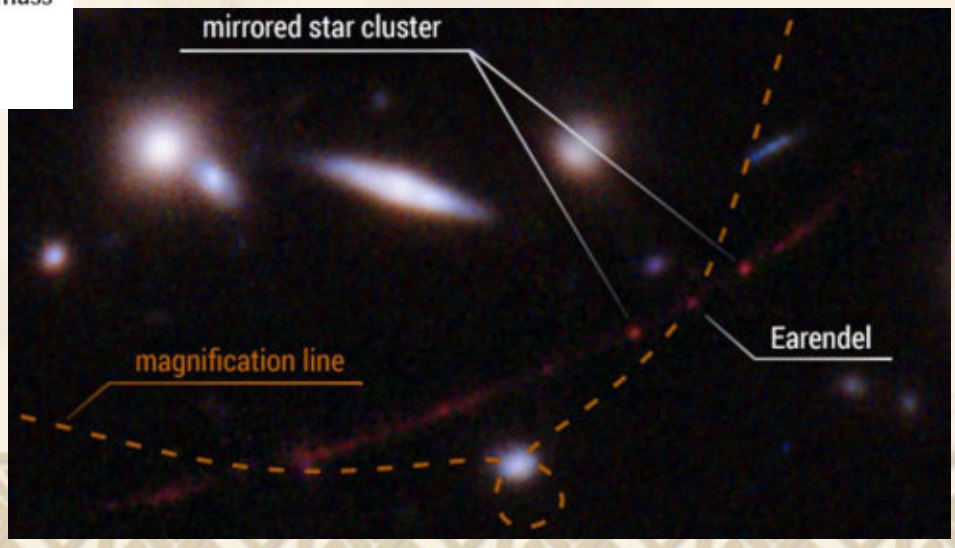
7734 Accesses | **2925** Altmetric | Metrics

Abstract

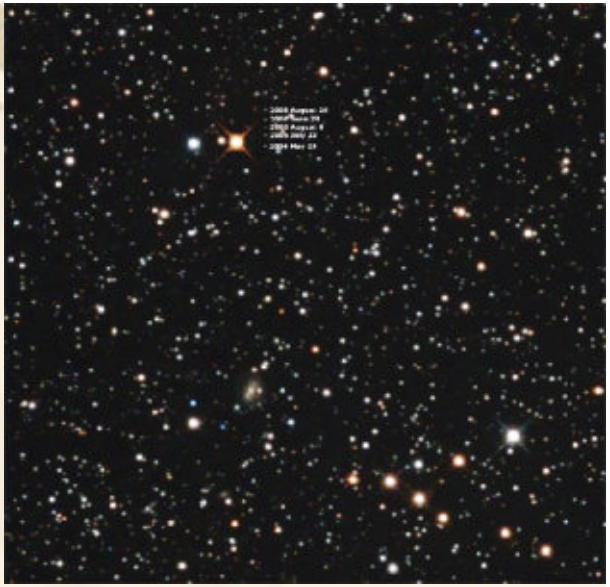
Galaxy clusters magnify background objects through strong gravitational lensing. Typical magnifications for lensed galaxies are factors of a few but can also be as high as tens or hundreds, stretching galaxies into giant arcs[1,2]. Individual stars can attain even higher magnifications given fortuitous alignment with the lensing cluster. Recently, several individual stars at redshifts between approximately 1 and 1.5 have been discovered, magnified by factors of thousands, temporarily boosted by microlensing[3,4,5,6]. Here we report observations of a more distant and persistent magnified star at a redshift of 6.2 ± 0.1, 900 million years after the Big Bang. This star is magnified by a factor of thousands by the foreground galaxy cluster lens WHL0137–08 (redshift 0.566), as estimated by four independent lens models. Unlike previous lensed stars, the magnification and observed brightness (AB magnitude, 27.2) have remained roughly constant over 3.5 years of imaging and follow-up. The delensed absolute UV magnitude, −10 ± 2, is consistent with a star of mass greater than 50 times the mass of the Sun. Confirmation and spectral classification are forthcoming from approved observations with the James Webb Space Telescope.



由哈勃太空望远镜拍摄的这张照片中，箭头指示了迄今为止我们所看到的最遥远的单个恒星——厄伦德尔（Earendel），借用前景星系团的引力透镜哈勃捕捉到了 129 亿光年外的这颗恒星。（图片来源：NASA、ESA、B. Welch (JHU)、D. Coe (STScI)、A. Pagan (STScI)）



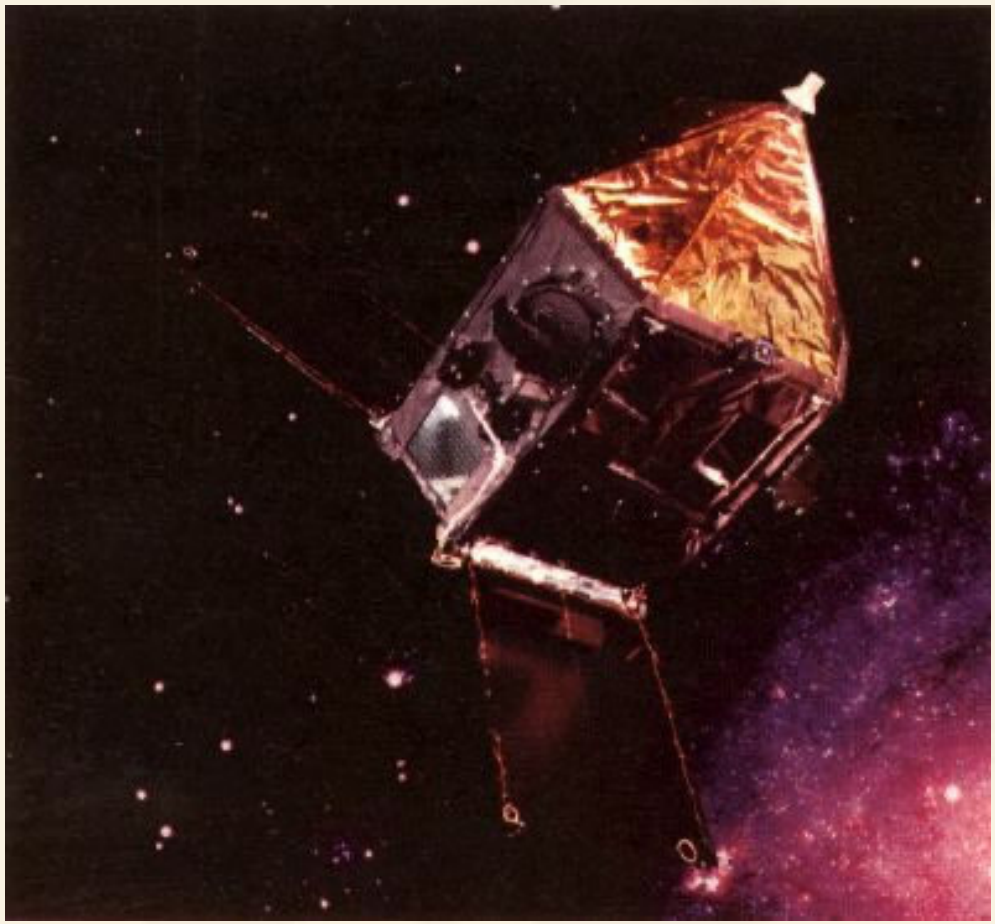
恒星的自行



巴纳德星的自行
2004-2008：每年10.3”

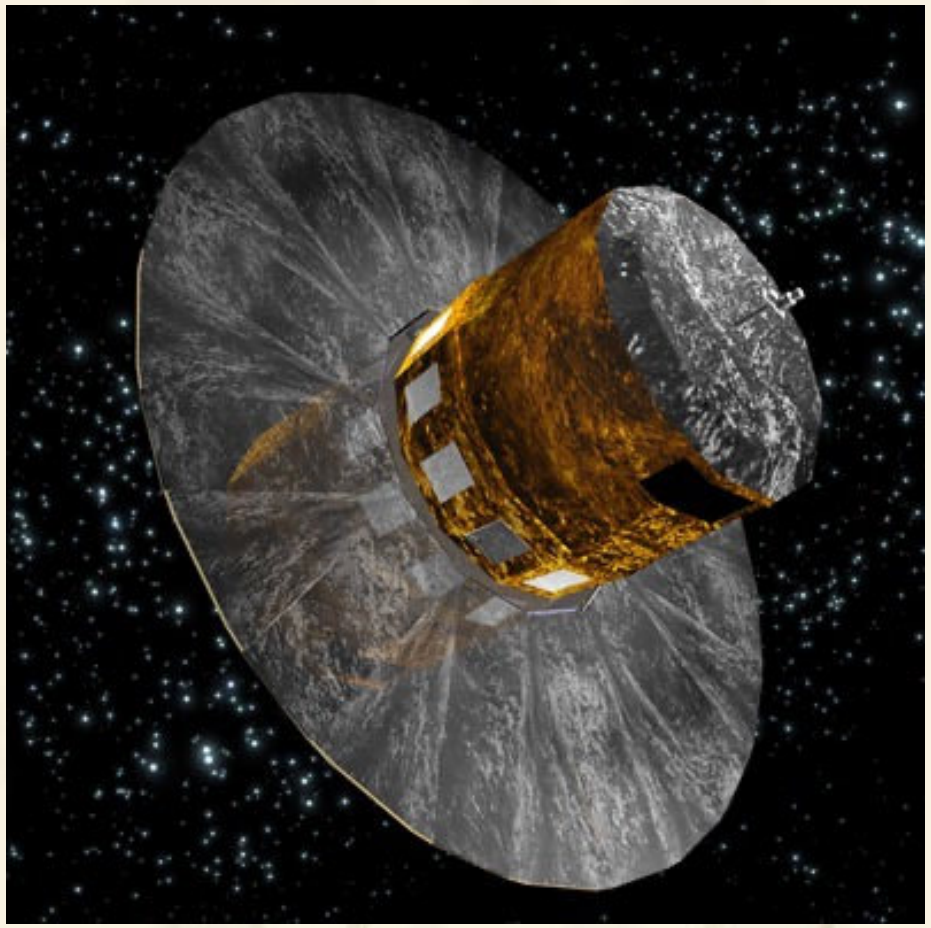
- 自行对三角视差法测距的影响
- 自行（角秒/年）的测定
- 地面测量了几千个恒星视差，d<40pc
- Hipparcos卫星（1989.8.8）
  - Hipparcos=High Precision Parallax Collecting Satellite
  - 位置测量精度：～0.001角秒
  - 3年的观测：118 000个恒星的视差和自行，d~90pc
  - 帮助预言彗星Shoemaker-Levy 9何时与木星碰撞；另外还表明几十亿年前，银河系吞并了大量的恒星
- GAIA卫星（2013.12.29）
  - 对15等星可达20微角秒位置精度

Hipparcos卫星



观测区域：~1%银河系大小

GAIA卫星



- 2013/12/19发射，观测精度提高100倍
- 银河系中~1%的恒星（>10亿）！
- 系外行星；小行星，冰球；类星体

gaia

esa

Gaia » Data » Early Data Release 3 » Gaia EDR3 content

Gaia EDR3 overview | Gaia EDR3 content | Gaia EDR3 papers | Gaia EDR3 documentation | Gaia (E)DR3 passbands | Gaia EDR3 Python code | Gaia EDR3 known issues | Gaia EDR3 events | Gaia EDR3 Stories

Archive

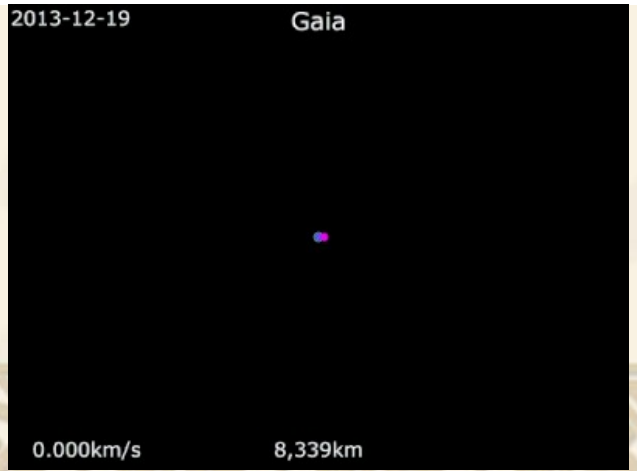
GAIA EARLY DATA RELEASE 3 (GAIA EDR3)

Gaia Data Release 3 is split into two installments: the early release called Gaia Early Data Release 3 (Gaia EDR3) and the full Gaia Data Release 3 (Gaia DR3). Gaia EDR3 was released on 3 December 2020 at 12:00 CET. The full Gaia Data Release 3 (Gaia DR3) is planned for the first half of 2022.

As for previous releases, the Gaia (E)DR3 data is made available through the Gaia Archive and partner data centres. A description of the contents of Gaia Early DR3 is given below. An overview page for Gaia Early Data Release 3 helps to find all relevant information for the Gaia EDR3 release. More detailed information on the expected contents for the full Gaia DR3 release will follow later.

CONTENTS OF GAIA EDR3

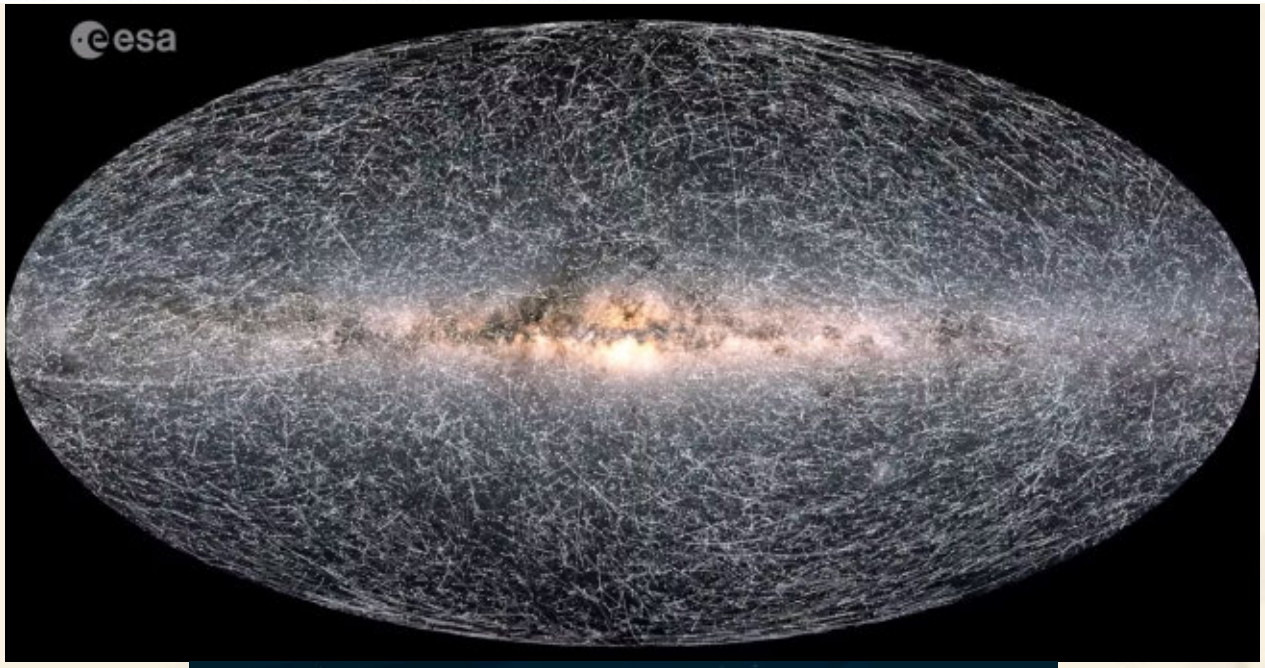
- The full astrometric solution (5 parameters) - positions on the sky (α, δ), parallaxes, and proper motions - for around 1.468 billion (1.468 10^9) sources, with a limiting magnitude of about G ≈ 21 and a bright limit of about G ≈ 3. The astrometric solution wil be accompanied with some new quality indicators, like RUWE, and source image descriptors.
- The full astrometric solution has been done as 5-parameter solution for 585 million sources and as 6-parameter solution for 882 million sources. In the 6-parameter solution, the additional fitted quantity is the so-called pseudo-colour that had to be included for sources without high-quality colour information.
- In addition, two-parameters solutions - positions on the sky (α, δ) - for around 344 million additional sources.
- G magnitudes for around 1.806 billion sources.
- G_{BP} and G_{RP} magnitudes for around 1.542 billion and 1.555 billion sources, respectively.
- Please be aware that the photometric system for the G, G_{BP}, and G_{RP} bands in Gaia EDR3 is different from the photometric system as used in Gaia DR2 and Gaia DR1.
- Full passband definitions for G, G_{BP}, and G_{RP}. More information is available here.
- About 1.614 million celestial reference frame (Gaia-CRF3) sources.
- Cross-matches between Gaia EDR3 sources on the one hand and Hipparcos-2, Tycho-2 + TDSC merged, 2MASS PSC (merged with 2MASX), SDSS DR13, Pan-STARRS1 DR1, SkyMapper DR2, GSC 2.3, APASS DR9, RAVE DR5, allWISE, and URAT-1 data on the other hand.
- Additionally, a Gaia DR2 to Gaia EDR3 match table.
- Simulated data from Gaia Object Generator (GOG) and Gaia Universe Model Snapshot (GUMS).
- The commanded scan law covering the Gaia EDR3 data collection period. Also the major periods where data was not sent to the ground or could not be processed are identified.

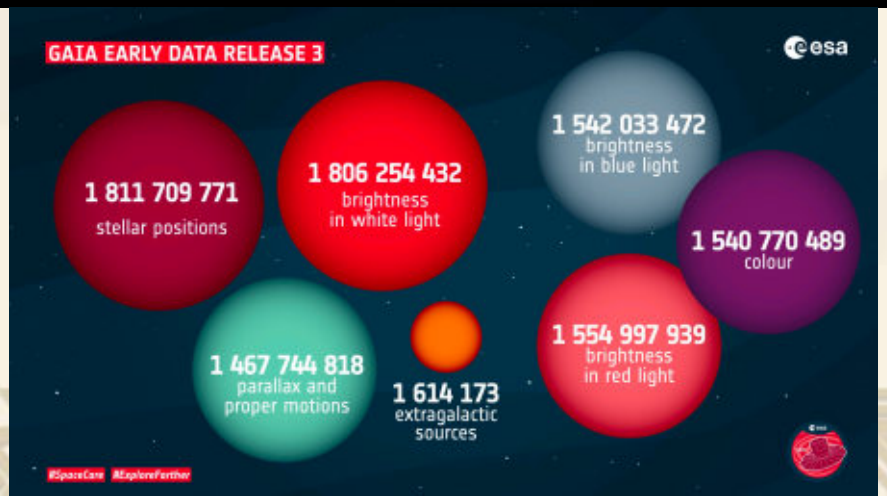


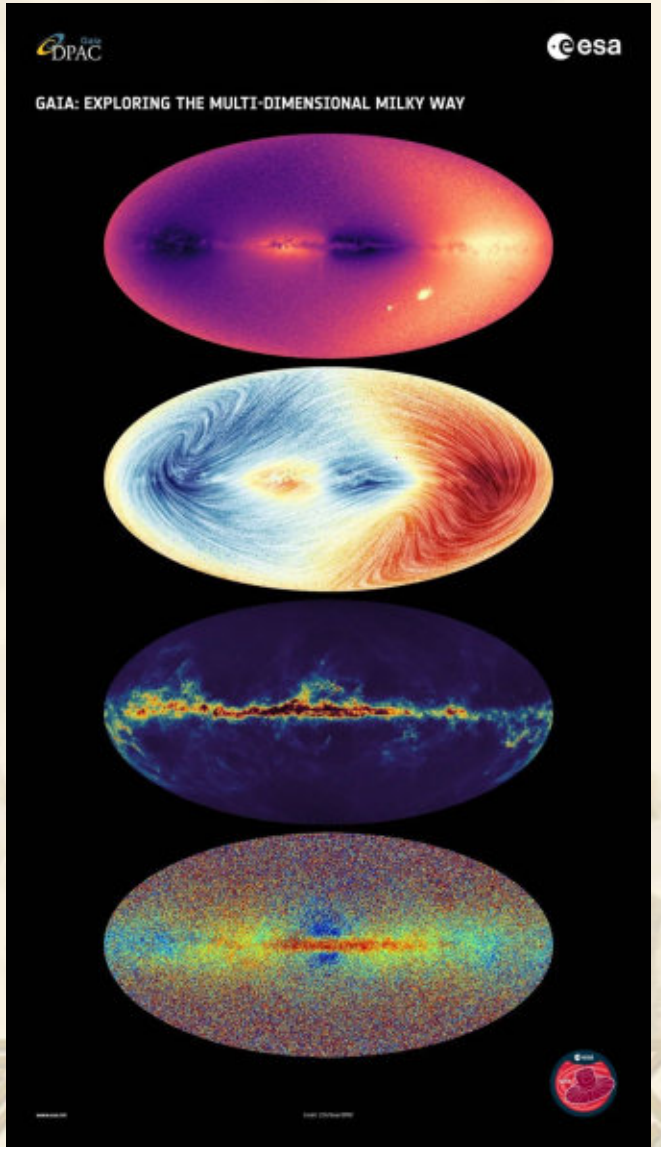
5年内每个恒星平均被观测70次

GAIA DATA RELEASE 3 (GAIA DR3)

Gaia Data Release 3 (Gaia DR3) will be released on 13 June 2022. The data will become available through the Gaia Archive (and through the partner data centres). The Gaia DR3 catalogue builds upon the Early Data Release 3 (released on 3 December 2020) and combines, for the same stretch of time and the same set of observations, these already-published data products with numerous new data products such as extended objects and non-single stars. The full contents of Gaia DR3 is described below.







科学家发现银河系“飞毛腿”恒星

日期 2015-03-09　来源：新华网　作者：林小春　【大 中 小】　【打印】　【关闭】

遇到爆炸，想必你会尽力逃得远远的，有些星星也一样。一颗编号为ＵＳ７０８的恒星在其伙伴发生大爆炸后，以每秒１２００公里的银河系最高速度“逃离”。

包括中国科学家在内的一个国际团队在6日出版的美国《科学》杂志上报告了这一发现。

ＵＳ７０８的奔跑速度到底有多快？参与研究的夏威夷大学的尤金·马尼耶发表声明说：“以此速度，５分钟就可以从地球飞到月亮。”

类似ＵＳ７０８这种跑得超快的恒星有一个专门名字叫做超高速星，其速度足以脱离银河系的引力束缚，未来将飞出银河系。

对于超高速星的形成，当前的主流观点是，一个双星系统在路过银河系中心时，被大质量黑洞俘获了一颗，另一颗却“因祸得福”获得加速度而逃离，最终成为超高速星。但黑洞加速机制无法解释ＵＳ７０８的形成。

欧洲南方天文台斯特凡·盖尔领导的观测小组利用地面望远镜获得ＵＳ７０８的距离、视向速度和切向速度，从而得知，该恒星的空间速度为每秒１２００公里，这个速度远远高于在银河系发现的其他超高速星。

与其他超高速星相比，ＵＳ７０８还有一个特殊特征：它是一颗快速转动的致密氦星。氦星是大质量恒星失去外层氢后的残骸。

研究人员据此认为，ＵＳ７０８原先与一颗大质量白矮星构成双星系统，但白矮星不断从它那里夺走氢，最后因“吃得太撑”发生Ｉａ型超新星爆炸。ＵＳ７０８虽然仅剩氦核，却在超新星爆炸时获得了一个很高的速度，最终逃逸到目前的位置。

在这一研究中，中国科学院云南天文台韩占文小组主要负责理论诠释。早在２００９年，该小组就提出了氦双星前身星模型，预言了出身于超新星的超高速氦星的存在。

2017年新当选中国科学院院士名单

（共61人，分学部以姓氏笔画为序）

数学物理学部（11人）

序号	姓名	年龄	专业	工作单位
1	马余刚	49	原子核物理	中国科学院上海应用物理研究所
2	王小云（女）	50	基础数学	清华大学
3	方复全	52	数学	首都师范大学
4	汤 涛	54	计算数学	南方科技大学
5	李儒新	47	光学	中国科学院上海光学精密机械研究所
6	何国威	54	流体力学	中国科学院力学研究所
7	陈志明	51	计算数学	中国科学院数学与系统科学研究院
8	徐红星	48	分子光谱和纳米光学	武汉大学
9	龚新高	55	计算物理	复旦大学
10	韩占文	51	天体物理	中国科学院云南天文台
11	蔡荣根	52	引力理论和宇宙学	中国科学院理论物理研究所

双星演化与双星相关天体
（云南天文台 韩占文）

中国科学院云南天文台
YUNNAN ASTRONOMICAL OBSERVATORY CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

Yunnan model: EPS models with binary interactions

天文学家发现速度最快的恒星，正以超高速从银河系逃跑

(2019/08)

最近，一颗神秘的“超高速星”引起了科学家的注意，因为这颗代号为“S5-HVS1”的恒星运行速度实在太快了。

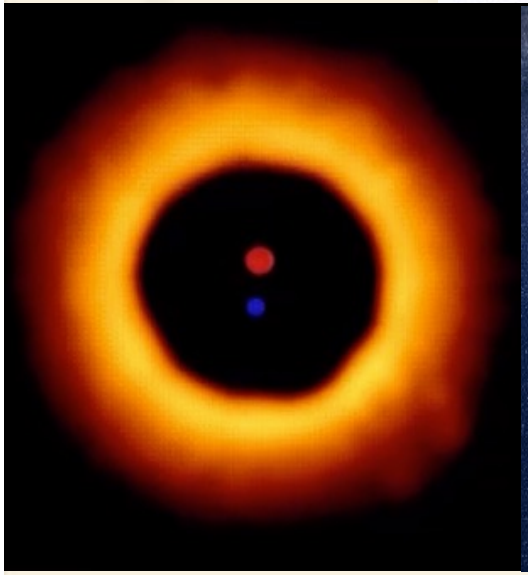
根据观测，“S5-HVS1”正在以每秒1700公里的速度远离银河系中心，而它也是人类目前发现的运行速度最快的主序星。

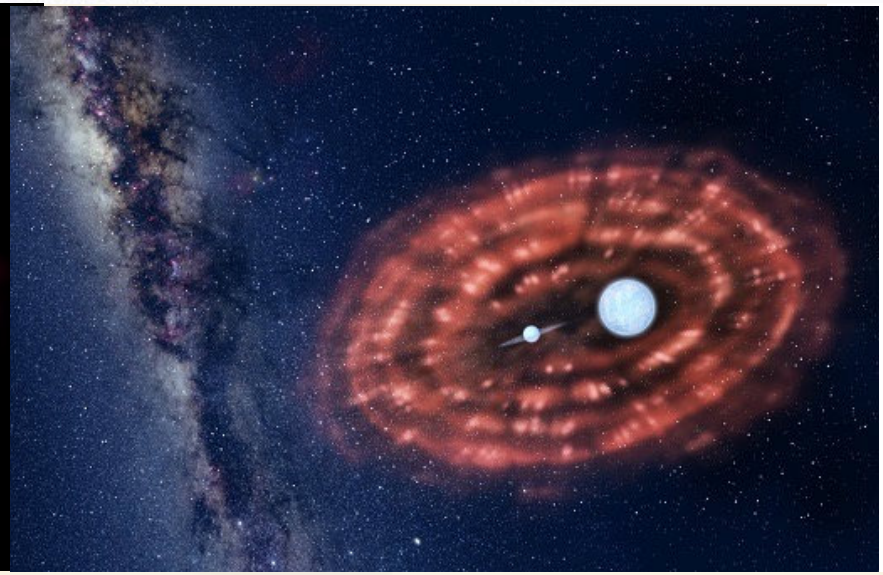
论文主要作者谢尔盖·科波索夫（Sergey Koposov）表示，“S5-HVS1”原本应该是一个双星系统，当这个系统运行到一个质量超大的黑洞附近时，黑洞吞噬了其中一颗组成恒星，而另一颗组成恒星则被黑洞巨大的引力“甩”了出去，就像发射弹弓一样，“S5-HVS1”就此开始了流浪之旅。

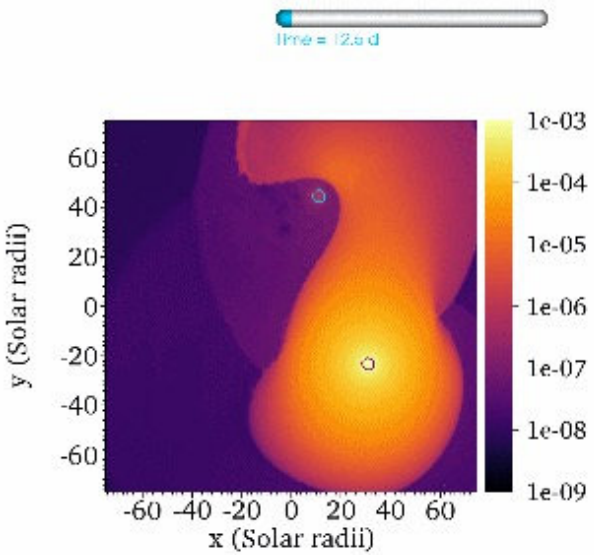
同时他还表示，由于“S5-HVS1”的速度远大于银河系中心黑洞的引力，所以它必然会在某一天“逃离”银河系。

首次直接观测“宇宙双黄蛋”“蛋清”被抛射 双星演化研究取得重大突破

央视新闻客户端 | 2022-07-07 00:02:37 浏览量188160







近日，中国科学院云南天文台韩占文团队和澳大利亚国立大学团队合作，发现了一颗刚刚完成共有包层抛射的双星，被抛射的共有包层正在以大约每秒200公里的速度离开双星系统。这是科学家第一次在观测上发现双星共有包层演化这一关键过程的直接证据：看到了被双星抛向太空的膨胀的共有包层——如同“宇宙双黄蛋”的“蛋清”正在被抛射的过程。这一重要发现将开启人们通过天文观测精确刻画双星共有包层演化这一重要过程的研究。该成果于北京时间7月7日在国际学术期刊英国《皇家天文学会月刊》发表。

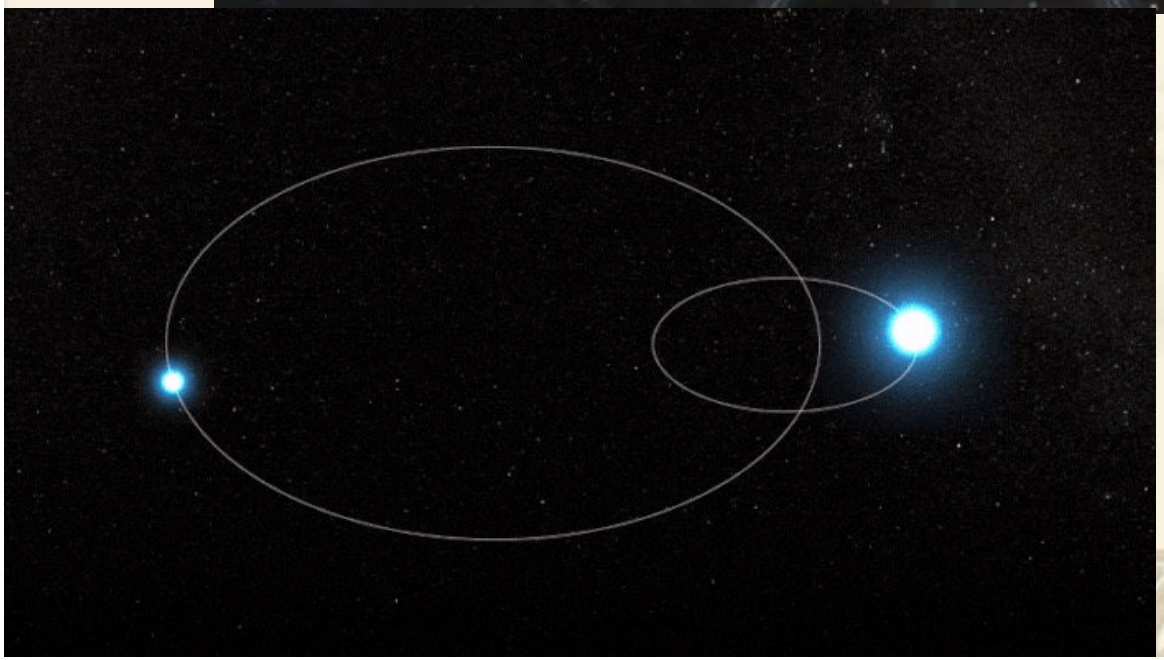
双星演化有一个至关重要的过程被称之为双星共有包层演化：双星中的一颗恒星由于物质损失剧烈膨胀，将另一颗恒星包裹在外包层内，形成一个共有包层。恒星的演化命运由共有包层演化过程决定，共有包层有可能被抛射，形成短周期双星，或者两颗恒星并合成一颗恒星。双星共有包层演化过程由天文学家在1976年提出，近半个世纪以来一直没有被真正观测到。

在此次研究中，科研团队通过澳大利亚国立大学2.3米宽视场望远镜和开普勒卫星等观测数据，在南半球发现了一颗距离我们23000光年的密近热亚矮星双星J 1920，两颗星之间的距离越来越近，它们的周围有一个正在膨胀的壳层，以大约每秒200公里的速度离开双星。这个膨胀的壳层被证明是大约1万年前被双星抛射的共有包层。

中国科学院院士韩占文介绍，这一发现的重要意义，在于把一个理论设想变成了现实。科学家们不仅在观测上首次看到了双星共有包层演化的证据，还可以通过观测来精确刻画这一关键过程，这是本领域一个里程碑的发现。

詹姆斯·韦布空间望远镜发布非凡的太空图像

原创 NASAITACHI NASA航天爱好者 2022-08-31 09:44 发表于吉林



~5600光年外的一对稀有大质量双星系统（WR星+O型星）：WR星风损失质量显著，二者相互作用产生精确的周期性（双星的轨道周期为7.94年）尘埃喷发，其红外辐射被韦布捕捉。尘埃随后被星风吹出，部分尘埃壳膨胀；大约有20个环，因此最外层的尘埃环大约有160年的历史。

绝对星等

绝对星等的定义：10pc处恒星的视星等

$$R = (d/10)^2$$
$$M = m - 2.5\log_{10} R$$

2.512^5=100

参宿七(Rigel):
（蓝超巨星）

$$d = 237\,pc, m = 0.12$$

$$M = 0.12 - 2.5\times\log_{10}(237/10)^2 = -6.7$$

太阳:

$$d = 4.86\times10^{-6}\,pc, m = -26.75$$

$$M = -26.75 - 2.5\times\log_{10}(4.86\times10^{-6}/10)^2 = 4.82$$

参宿七与太阳光度差：

$$\Delta m = |-6.7 - (+4.82)| = 11.52 \text{ magnitudes}$$

$$R = 2.512^{11.52} = 40\ 571$$

比邻星与太阳光度差：

$$\Delta m = 15.5 - 4.82 \text{ magnitudes} = 10.68 \text{ magnitudes}$$

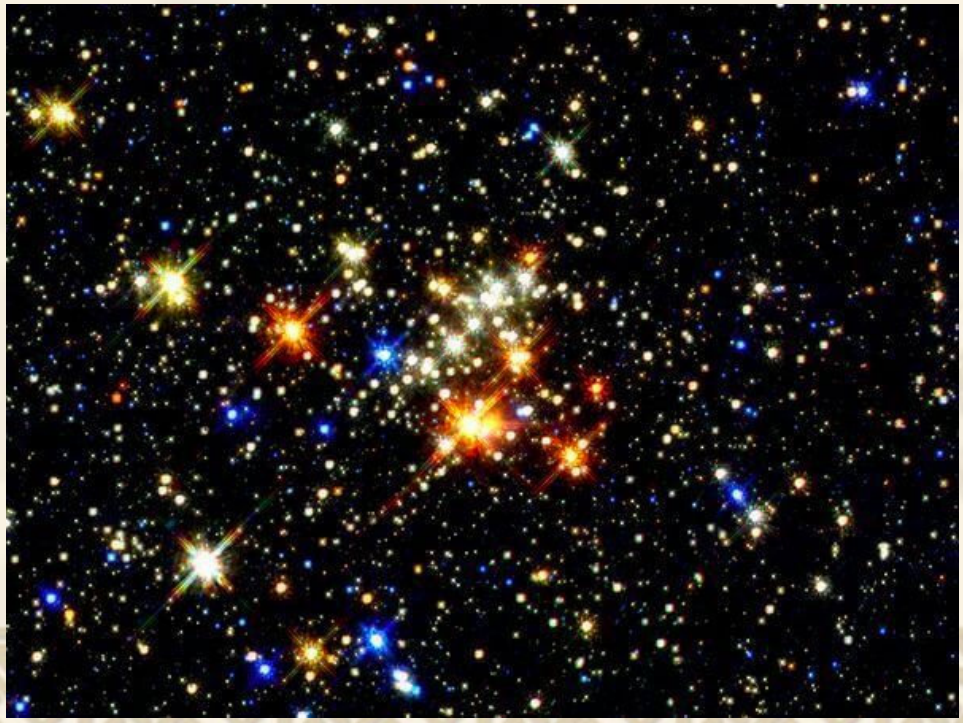
$$R = 2.512^{10.68} = 18\ 715$$

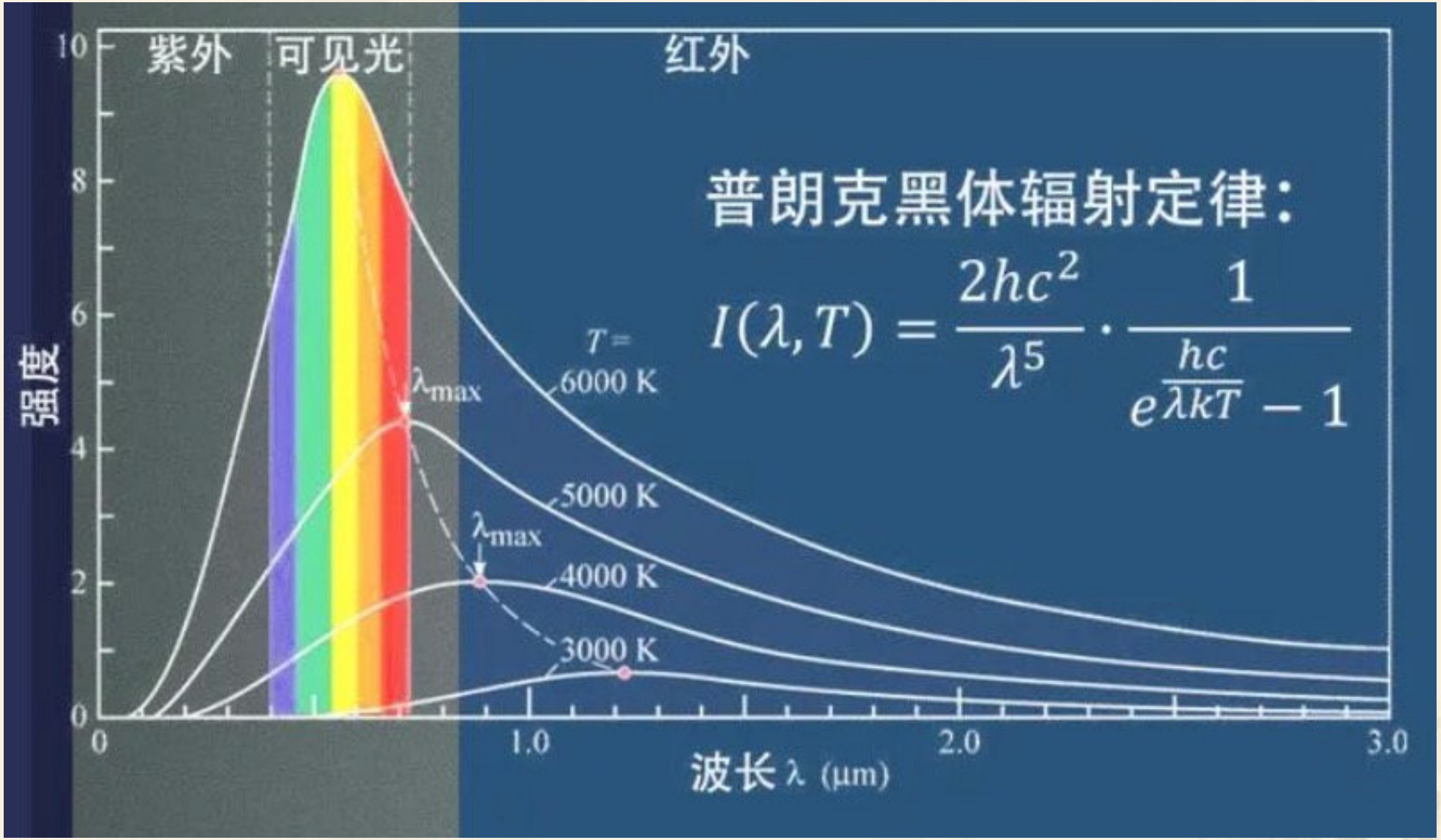
比邻星与参宿七光度差：

40 500 X 19 000 = 769 500 000

恒星的颜色和表面温度

Figure 6.3 Impression of Brocchi's Cluster. The effect of a 'soft-focus' filter has been used to spread the stellar images so that star colours are more easily seen.



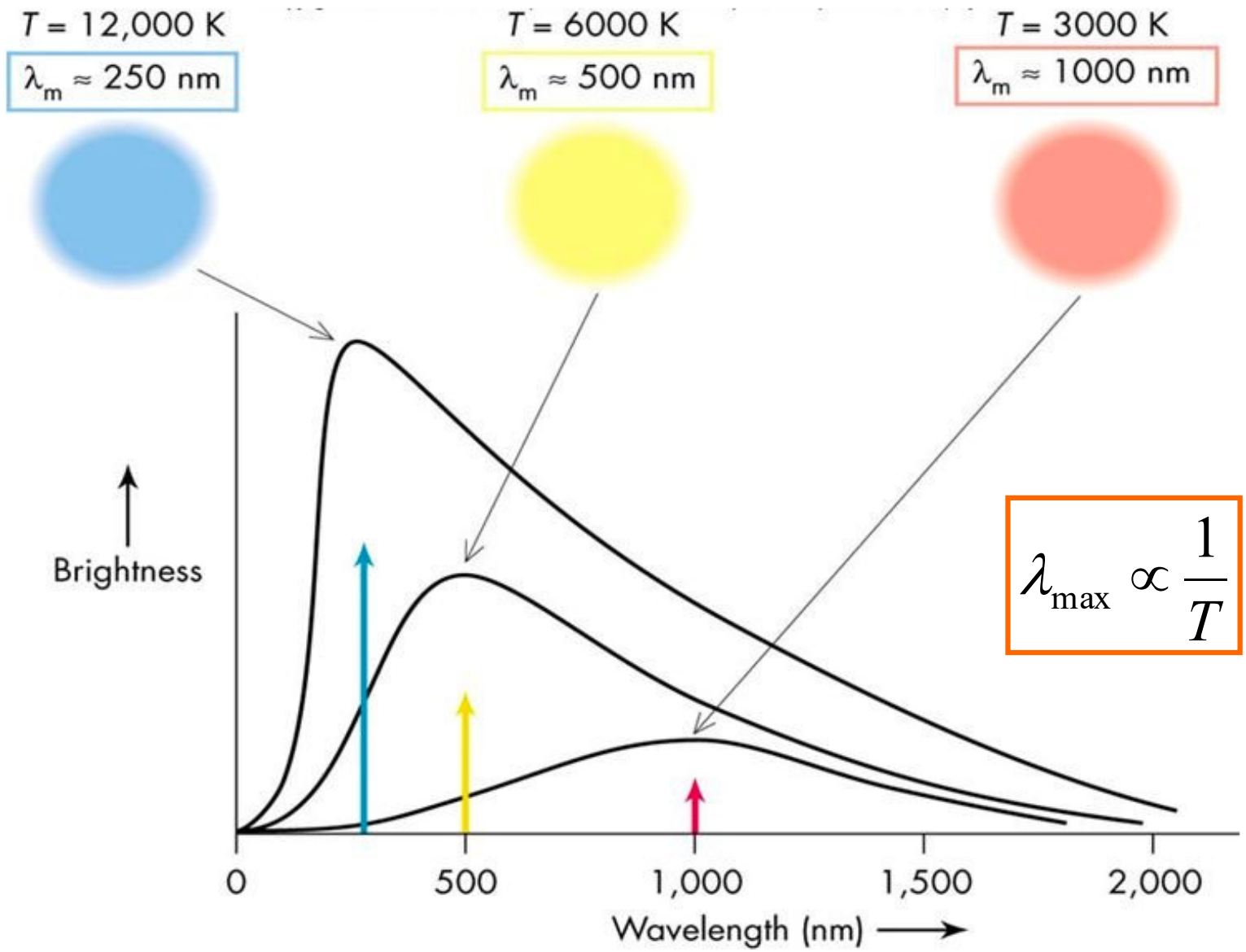


普朗克黑体辐射定律：

$$I(\lambda,T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

- The peak wavelength of a blackbody spectrum is inversely proportional to temperature:

Wien's Law



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

Temperatures of stars and planets are measured using Wien's law.

比邻星的温度：

$$L = \sim 4 \times 10^{26}/19\,000\,\mathrm{W}$$
$$= 2.1 \times 10^{22}\,\mathrm{W}$$

$$R = 1/7 R_{SUN} \approx 1 \times 10^{8}\ \mathrm{km}$$

$$L = \sigma A T^4$$
$$= 5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (1 \times 10^8)^2 \times T^4$$

1/4

$$T = \{2.1 \times 10^{22}/[5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (1 \times 10^8)^2]\}^{-4}$$
$$= (2.1 \times 10^{22}/7.1 \times 10^9)^{-4}$$
$$= 1300\,\mathrm{K}$$

1/4

$$T_{PC}/T_{Sun} = [(1/19\,000)/(1/49)]^{-4}$$

$$T_{PC} = 0.22 \times 5800\,\mathrm{K}$$
$$= 1300\,\mathrm{K}$$

1/4

参宿七的温度

$$T_{Rigel}/T_{Sun} = (45\,000/3800)^{-4}$$

$$T_{Rigel} = 1.85 \times 5800\,\mathrm{K}$$
$$= 10\,700\,\mathrm{K}$$

色指数（C：不同波段星等差）

$C=m_B-m_V$

$$T=\frac{7200}{C+0.64}K$$

色温度

别的常用双色测光：

照相星等m_{photo}，仿视星等m_V

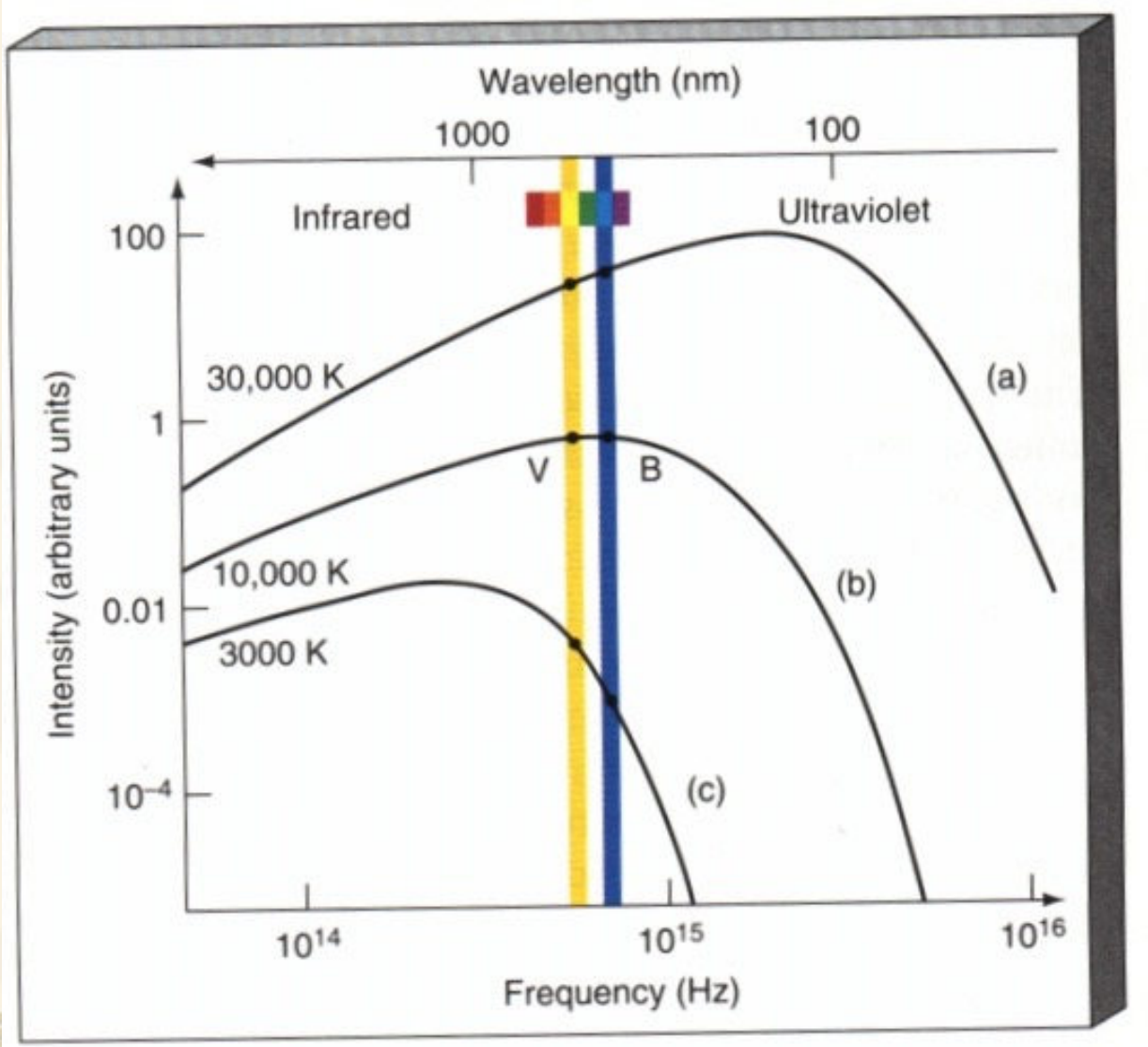
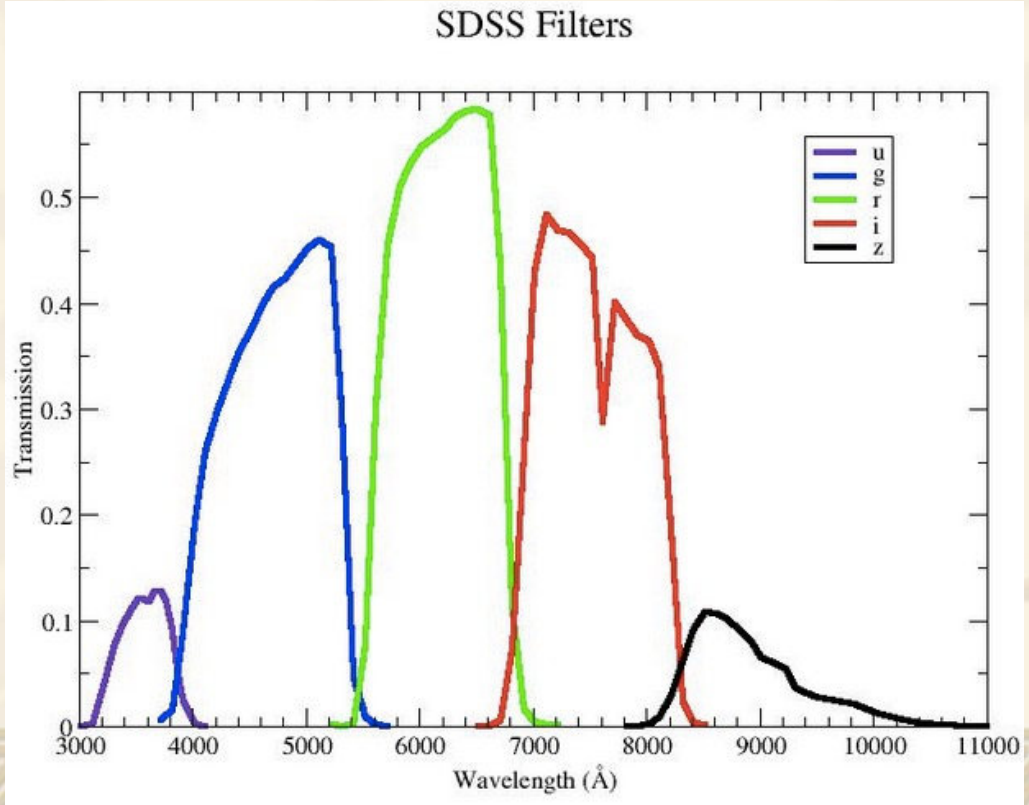
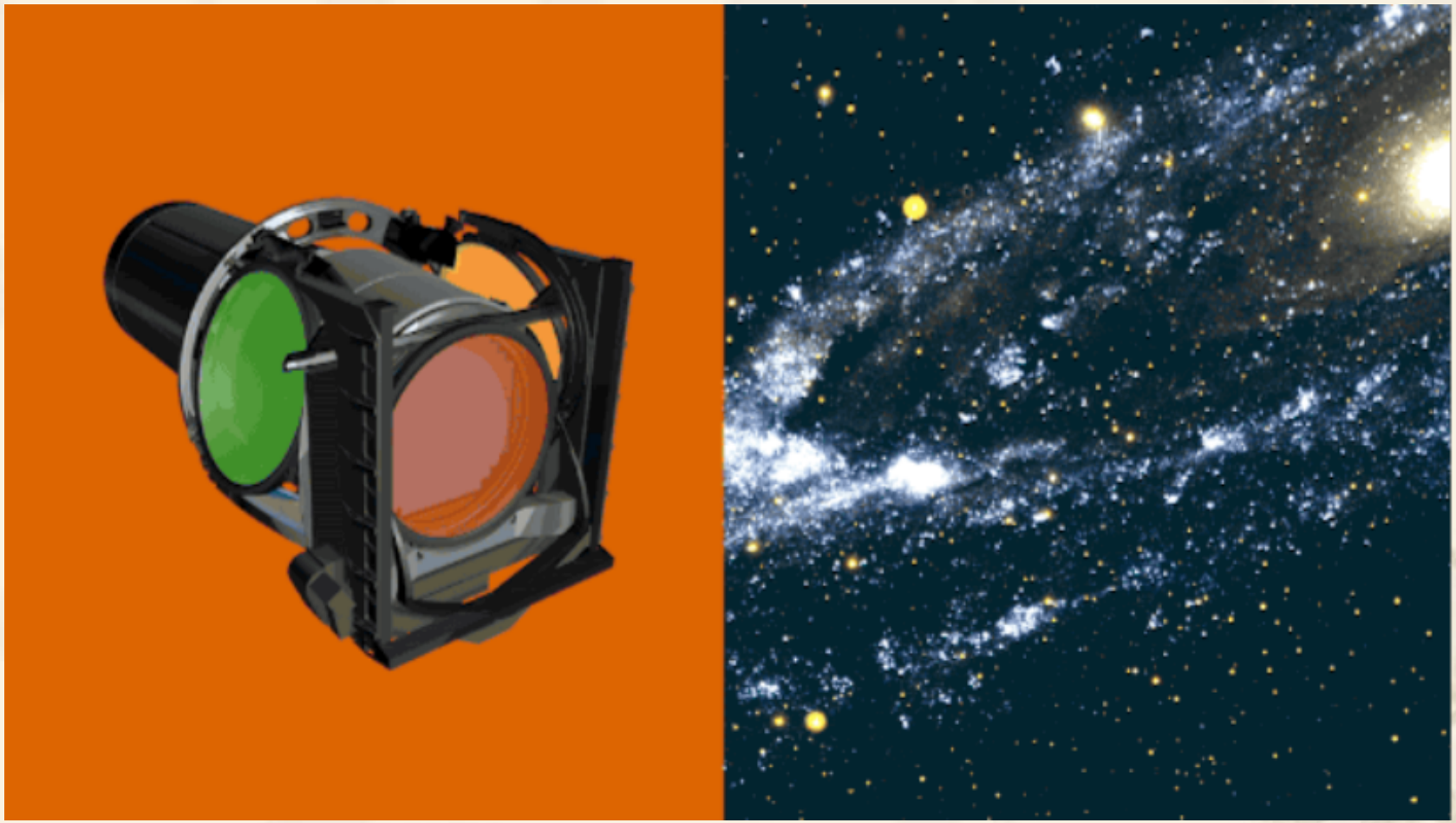


表 2.1 多色测光系统的滤光片参数

滤光片	峰值波长(nm)	滤波宽度(nm)
U	350	70
B	435	100
V	555	80
R	680	150
I	800	150



RGB测光



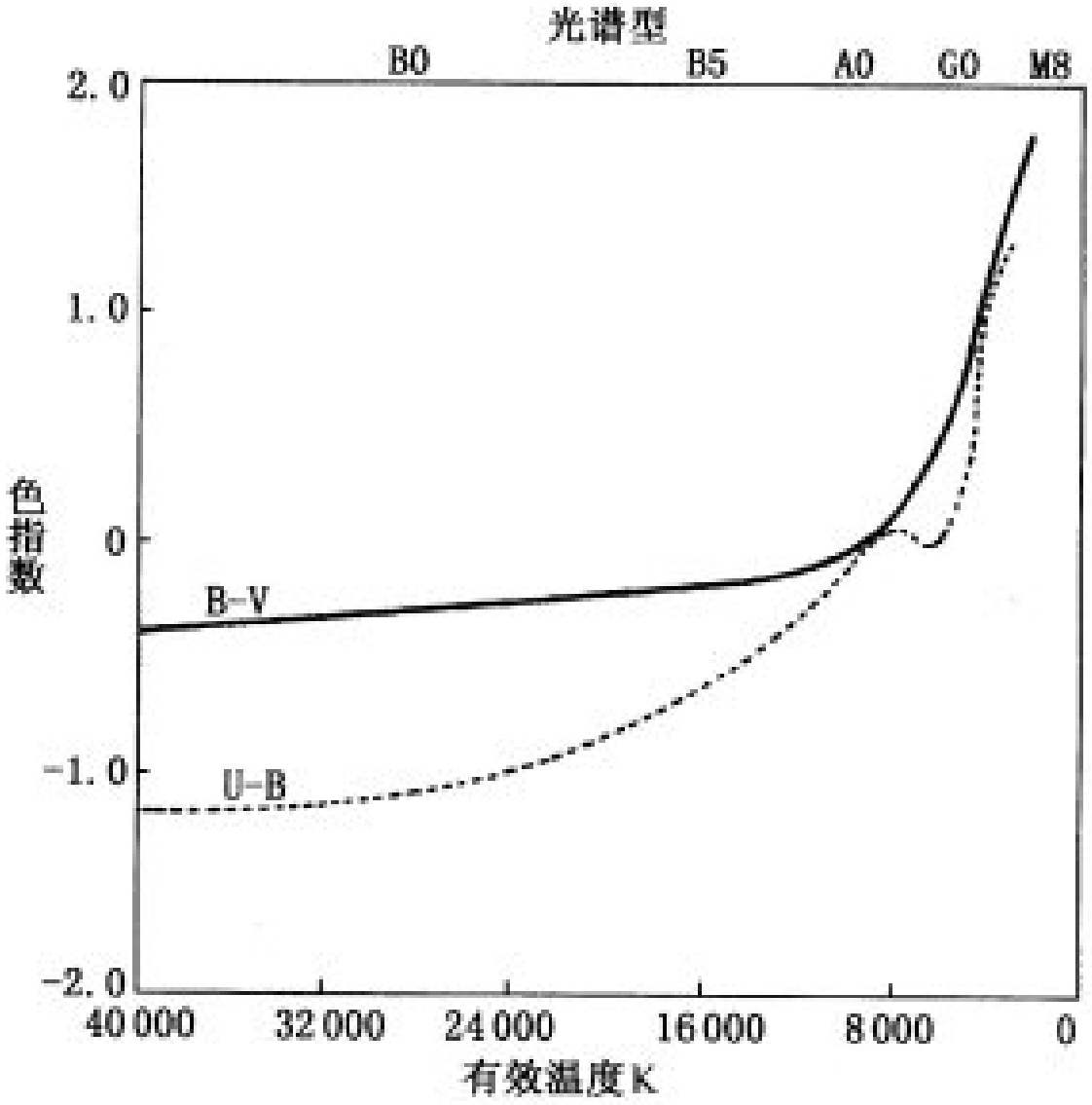


图 8.3　恒星的色指数 B—V 和 U—B 与有效温度(光谱型)的关系

$$T = \frac{7090}{(B-V)+0.71}\,\mathrm{K}$$

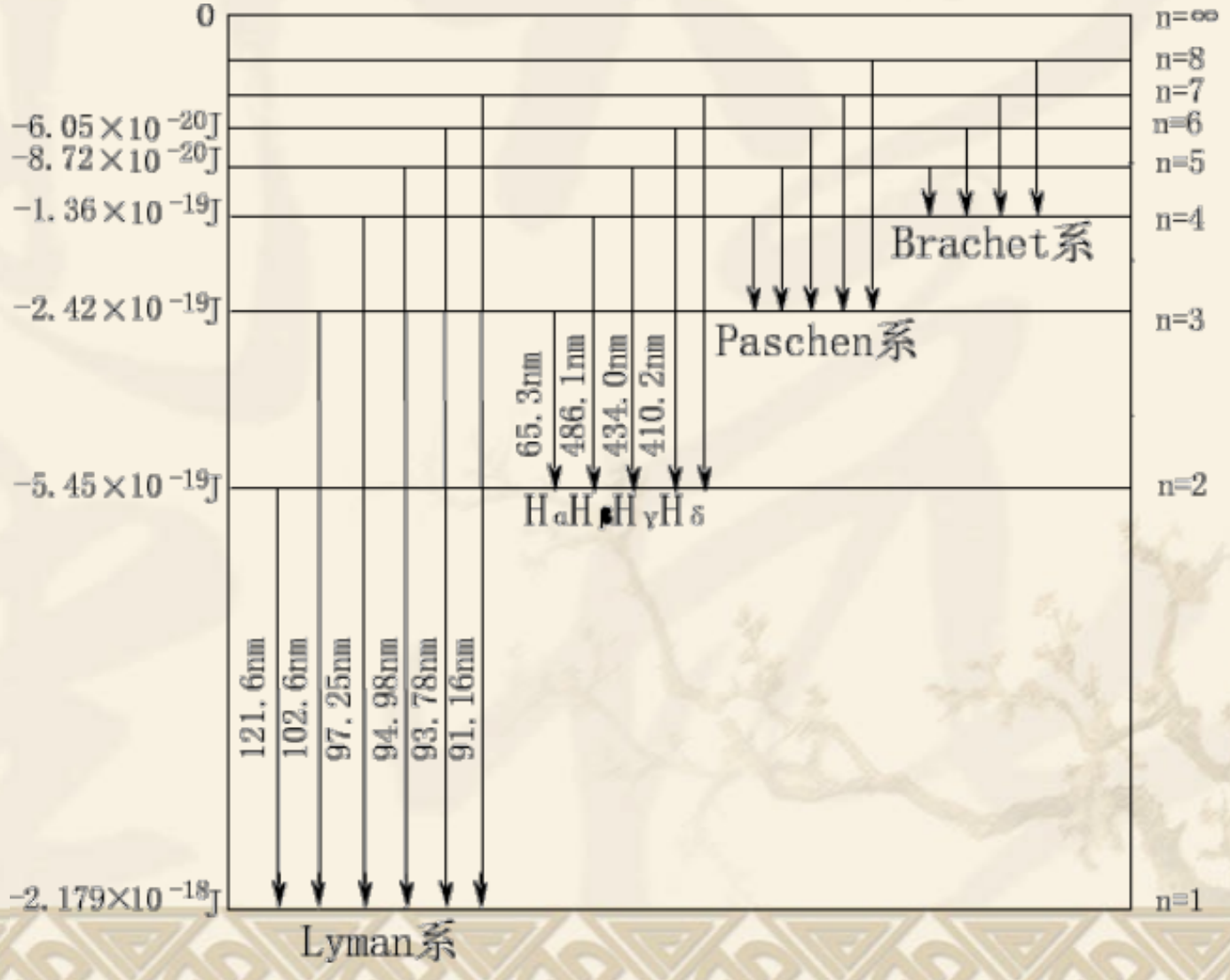
T~4000-10000 K时：

$$T = \frac{8540}{(B-V)+0.865}\,\mathrm{K}$$

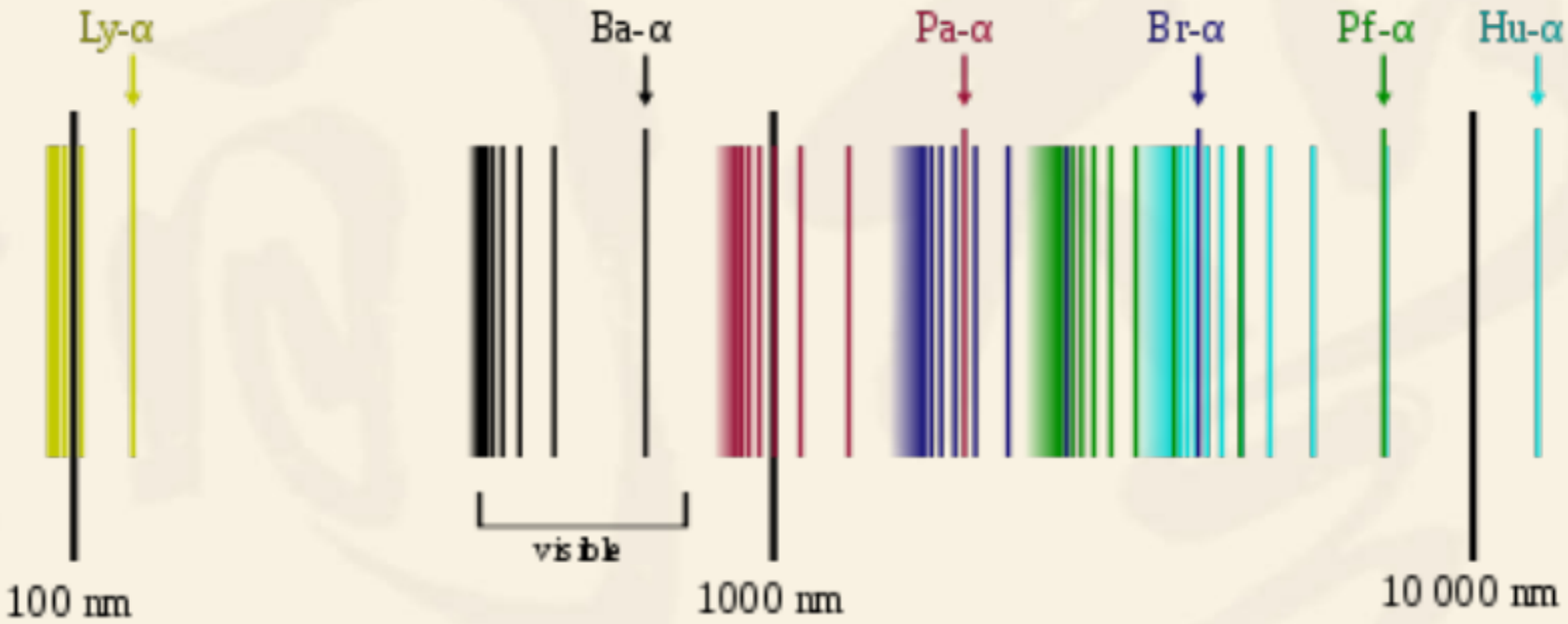
恒星光谱

谱线记号：HI、HII、HeI、HeII、HeIII

氢原子光谱



氢原子光谱



来曼系列：位于紫外光波段（→1）

巴耳末系列：位于可见光波段（ →2）

- Hα—656.3nm，红色(3→2)
- Hβ—486.1nm，绿色(4→2)
- Hγ—434.0nm，中蓝色(5→2)

帕申系列：位于红外光波段的谱线(→3)

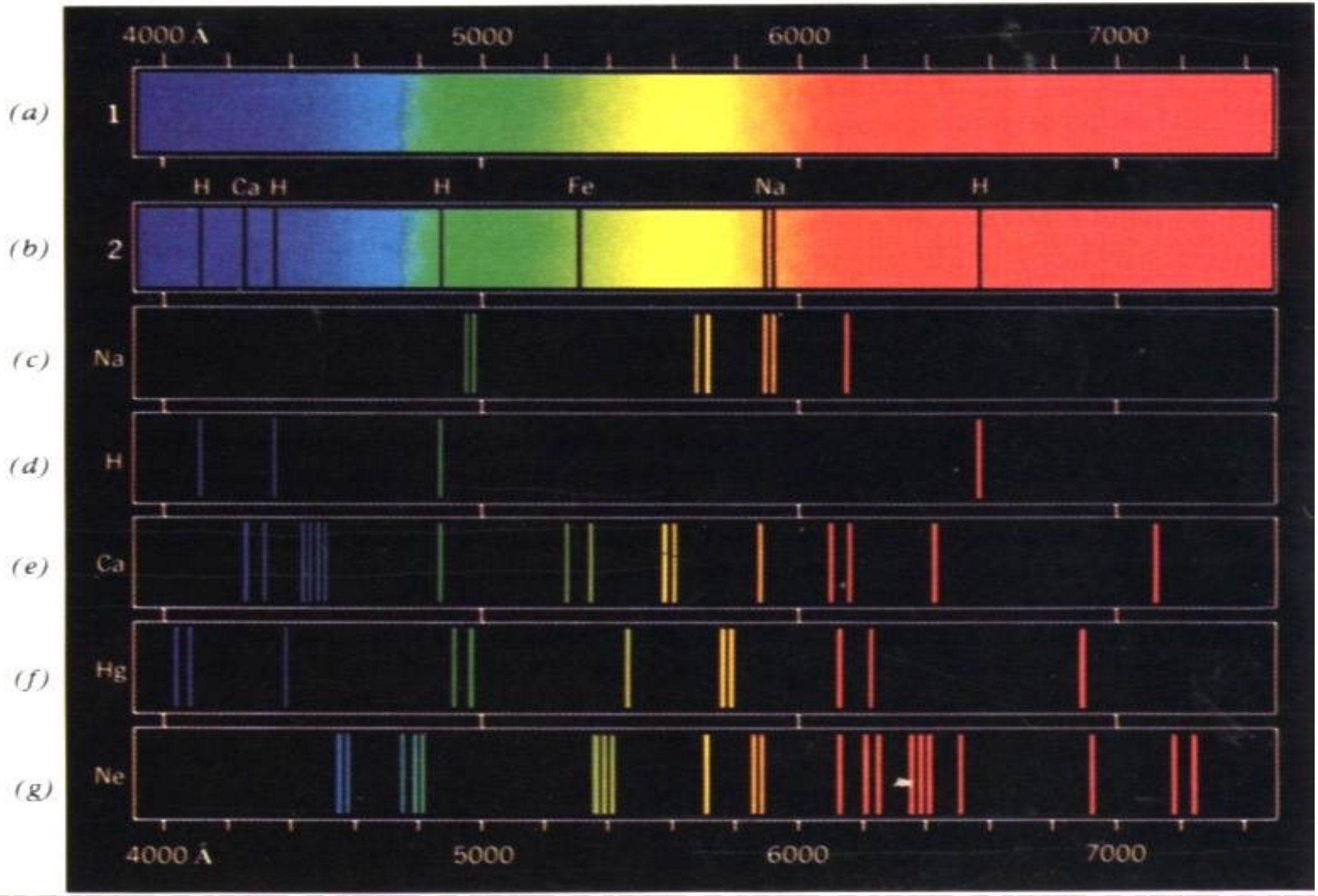
布拉克系列：位于红外光波段 (→4)

蒲芬德系列：位于红外光波段(→5)

谱线和温度的关系

- T~9000K，氢的巴尔末线系Hα、Hβ等谱线最强
- 温度升高，氢电离，氢原子的谱线减弱，甚至消失
- 氦的电离能大得多，HeI、HeII的谱线经常一起出现

光谱


4000 Å
5000
6000
7000
(a)
1
(b)
2
H
Ca
H
H
Fe
Na
H
(c)
Na
(d)
H
(e)
Ca
(f)
Hg
(g)
Ne
4000 Å
5000
6000
7000

典型的恒星光谱

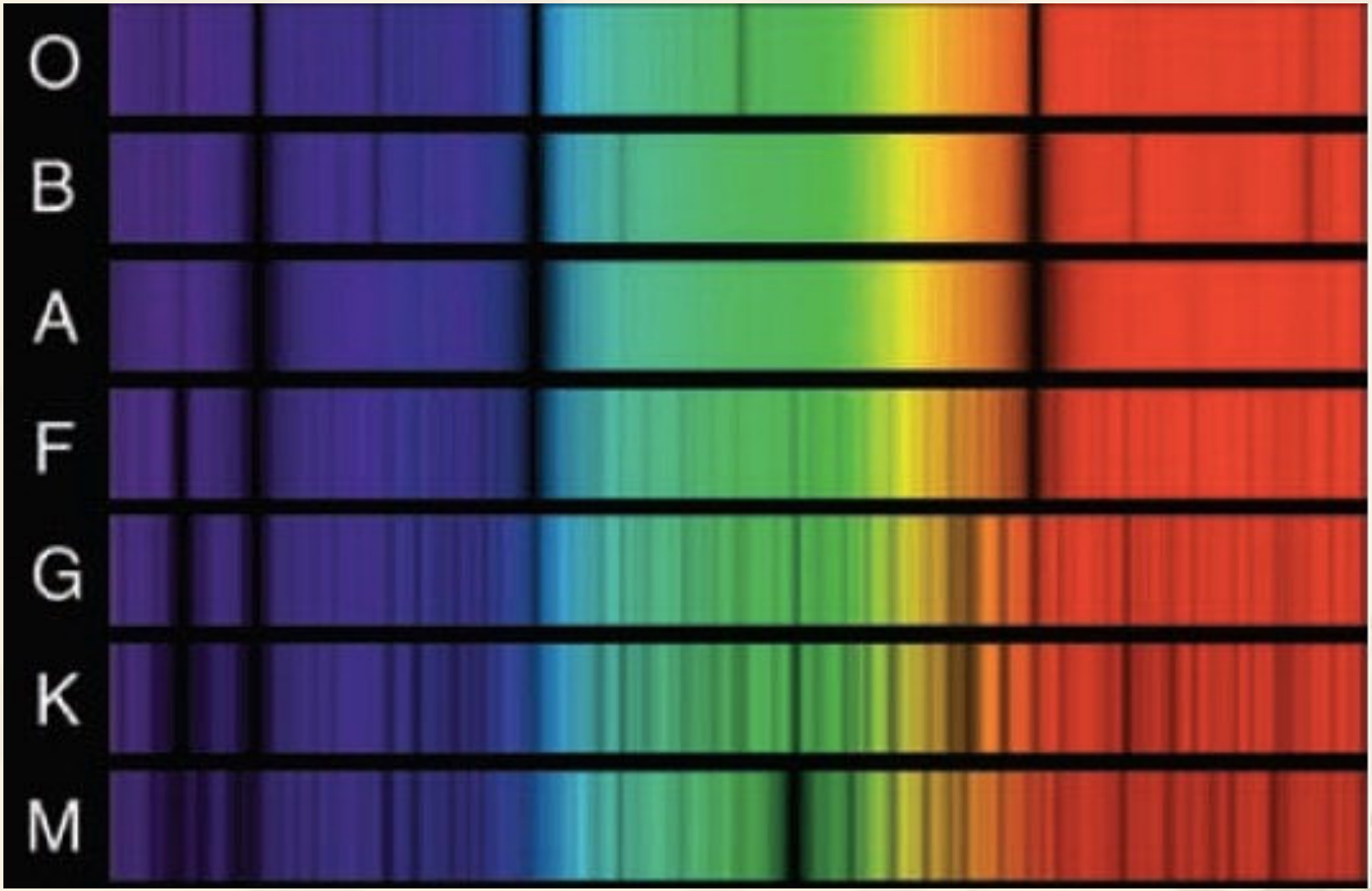


FIGURE 15.4 Women astronomers pose with Edward Pickering at Harvard College Observatory in 1913. Annie Jump Cannon is fifth from the left in the back row.

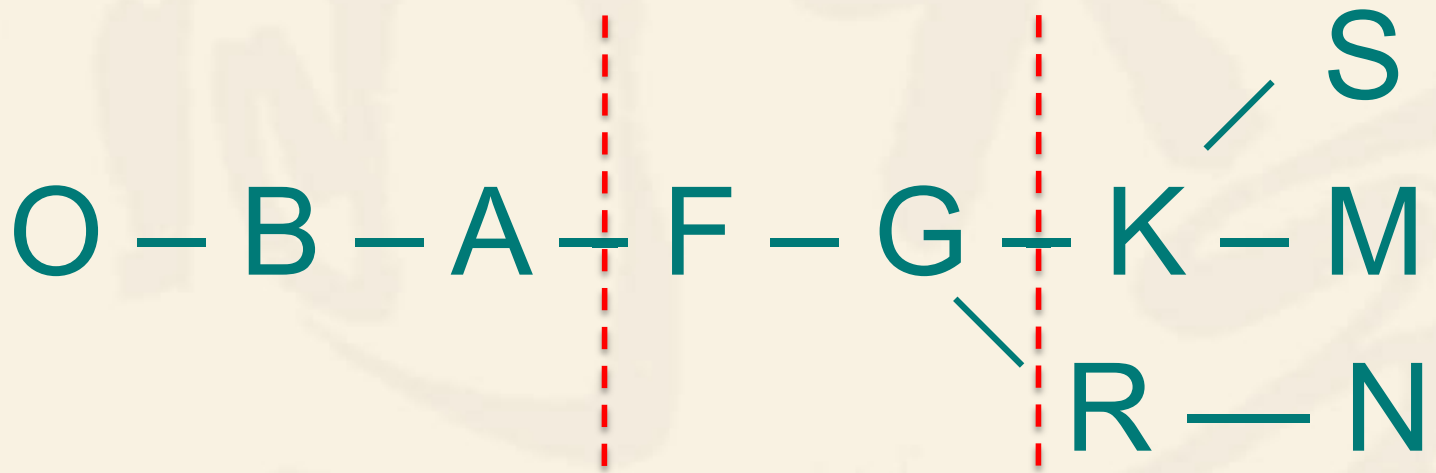
1971年，美国天文学会决定授予玛格丽特“安妮·坎农天文奖”。坎农（Annie Jump Cannon，1863-1941）是哈佛大学天文台的一位女性天文学家，她带领同事们完成了恒星光谱分类的壮举，这个分类法后来被命名为“哈佛分类法”，至今依然是最重要的恒星光谱分类法。

在哈佛大学天文台办公室里的安妮·坎农。| 来源：Smithsonian Institution Archives；Accession number: SIA2008-0647

100 多年前，美国哈佛大学的天文学家 Edward Charles Pickering 决定“拍下”整个夜空的照片，或者说，用成千上万张通过望远镜记录下的碎片组成一个夜空的完整图景。如今，这些照片正封存在哈佛大学天文台成千上万的玻璃底片下，这是我们对于宇宙最早的详尽记录。尽管全天星图的点子最初由 Pickering 提出，这项艰巨任务主要是由一群被称为“哈佛计算机”的女性完成的。在硅芯片和电路组成的计算机出现之前，物理及天文学领域的科学家们处理复杂的计算任务时，一般靠手。

Dec 1888

哈佛光谱分类



Oh! Be A Fine Girl/Guy! Kiss Me Right Now, Sweetheart!

（联想记忆法）

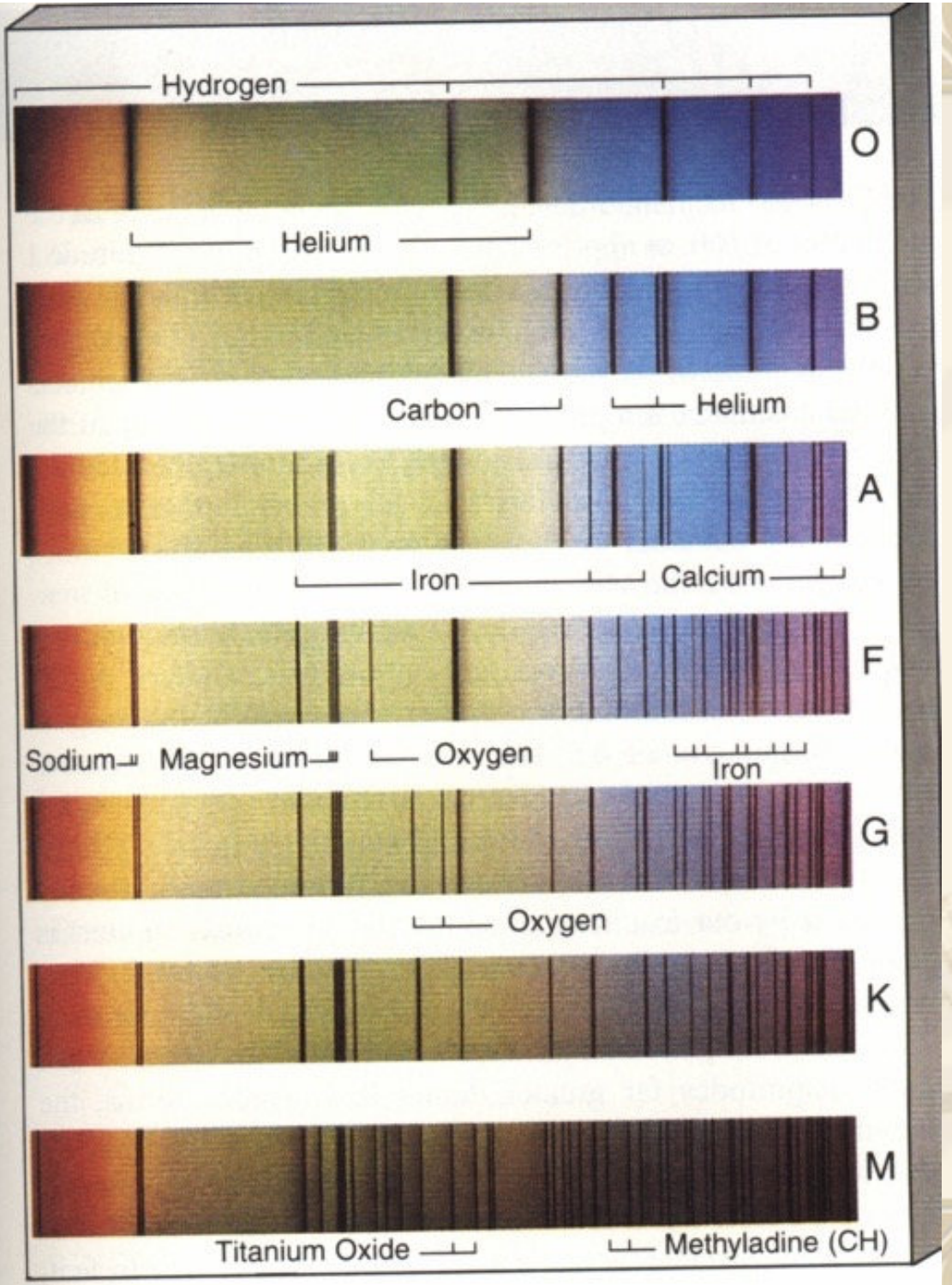
R,N:光谱同K和M型相似，但增加了很强的碳和氢的分子带。后来把它们合称为碳星.**S型**：红色。光谱同M型相似，但增加了强的氧化锆分子带，常有氢发射线

每一类又分为0-9子类，太阳：G2型

本章“附加题”（选做:）：

- 想一句英语句子把上页所有光谱型串起来
- 写在本章所有作业题之后
- 较好完成本题，本章作业可以额外得到1分

各种光谱型的化学成分


Hydrogen
O
Helium
B
Carbon
Helium
A
Iron
Calcium
F
Sodium
Magnesium
Oxygen
Iron
G
Oxygen
K
M
Titanium Oxide
Methyladine (CH)

光谱型	颜色	温度	光谱特征
O	蓝白	$T_e \geq 30,000K$	紫外连续谱强，有弱H_eII，H_eI，HI线
B	蓝白	$10,000K \leq T_e \leq 30,000K$	H_eI线在B_2型达到最大，B_0之后H_eII消失，H线逐渐变强
A	白	$7,500K \leq T_e \leq 10,000K$	H线在A_0达到极大，C_aII线增强，出现弱的中性金属线
F	黄白	$6,000K \leq T_e \leq 7,500K$	H线变弱但仍明显，C_aII线大大增强，电离和中性金属线的强度增加
G	黄	$5,000K \leq T_e \leq 6,000K$	属太阳谱型，C_aII线很强，F_e及金属线强，H线弱
K	橙	$3,500K \leq T_e \leq 5,000K$	金属线主导，连续谱蓝端变弱，分子带（CN，CH）变强
M	红	$T_e \leq 3,500K$	分子带主导，中性金属线强

Table 6.1 The percentages of stars in the differing spectral classes.

Type	Colour	Proportion (%)
O	Blue	0.003
B	Blue-white	0.13
A	White	0.63
F	White-yellow	3.1
G	Yellow	8
K	Orange	13
M	Red	78

类型	温度	约定的颜色	看见的颜色[5][6]	质量(太阳质量)	半径(太阳半径)	亮度	氢线	主序星的比例%
B	10,000–30,000 K	蓝到蓝白色	蓝白色	18 $M_\odot$	7 $R_\odot$	20,000 $L_\odot$	一般	0.13%
A	7,500–10,000 K	白色	白色	3.1 $M_\odot$	2.1 $R_\odot$	40 $L_\odot$	强烈	0.6%
F	6,000–7,500 K	淡黄的白色	白色	1.7 $M_\odot$	1.4 $R_\odot$	6 $L_\odot$	一般	3%
G	5,000–6,000 K	黄色	淡黄的白色	1.1 $M_\odot$	1.1 $R_\odot$	1.2 $L_\odot$	弱	7.6%
K	3,500–5,000 K	橙色	黄橙色	0.8 $M_\odot$	0.9 $R_\odot$	0.4 $L_\odot$	十分弱	12.1%
M	2,000–3,500 K	红色	橙红色	0.4 $M_\odot$	0.5 $R_\odot$	0.04 $L_\odot$	十分弱	76.45%

距离测量—分光视差法

- 基本假设：同一类型的恒星的绝对光度一致
- 例如：某F0型恒星，比邻近的一F0型恒星暗10 000倍，邻近的恒星通过三角视差法测得距离为8pc，则该远处的F0型恒星的距离为800pc
- 某G2型恒星，视星等为+9.8，太阳的绝对星等为+4.8（d=10pc），这该恒星的距离为100pc
- 一LMC中的B8恒星，视星等为+11.7，参宿七（B8）的绝对星等为-6.7等，

光度差：

$$2.512^{18.4} = 23 \times 10^6$$

距离：

$$10 \times (23 \times 10^6)^{1/2}\ \mathrm{pc} = 10 \times 4800\ \mathrm{pc} = 48\ 000\ \mathrm{pc}$$

分光视差法的缺点：

- 同一类型的恒星本征光度不一定一致，还依赖于恒星的金属丰度
- 光谱型和光度之间的相关性不是很好，主序带并不是一个窄线，例如，F0型，差+/-一个星等，所以距离差+/- $(2.512)^{1/2}$
- 星际消光、红化的影响

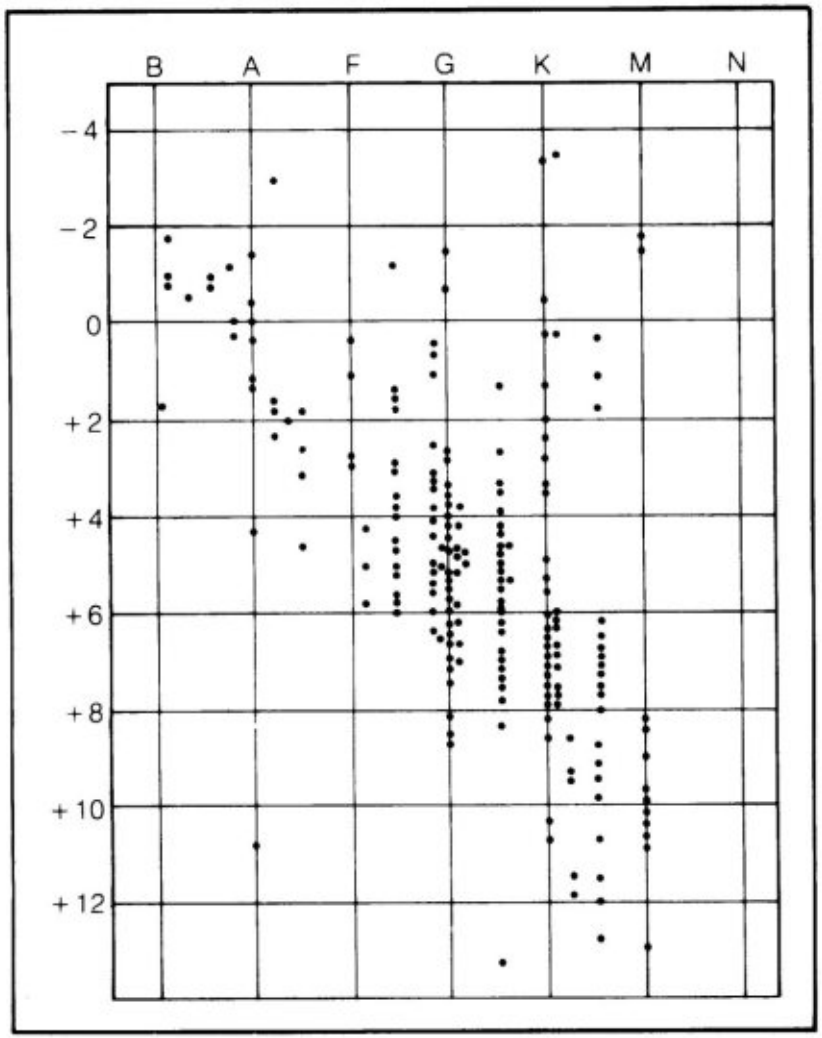
Hertzsprung-Russell 图

- 1900s早期，Ejnar Hertzsprung (丹麦)与Henry Russell （美国）
- 横坐标：温度（高←低）或光谱型
- 纵坐标：光度或绝对星等
- H-R图，或颜色-星等图

赫罗图 (Hertzsprung – Russell Diagram)

罗素1913年得到的最早的绝对星等－光谱型图

Henry Norris Russell, reprinted with permission)



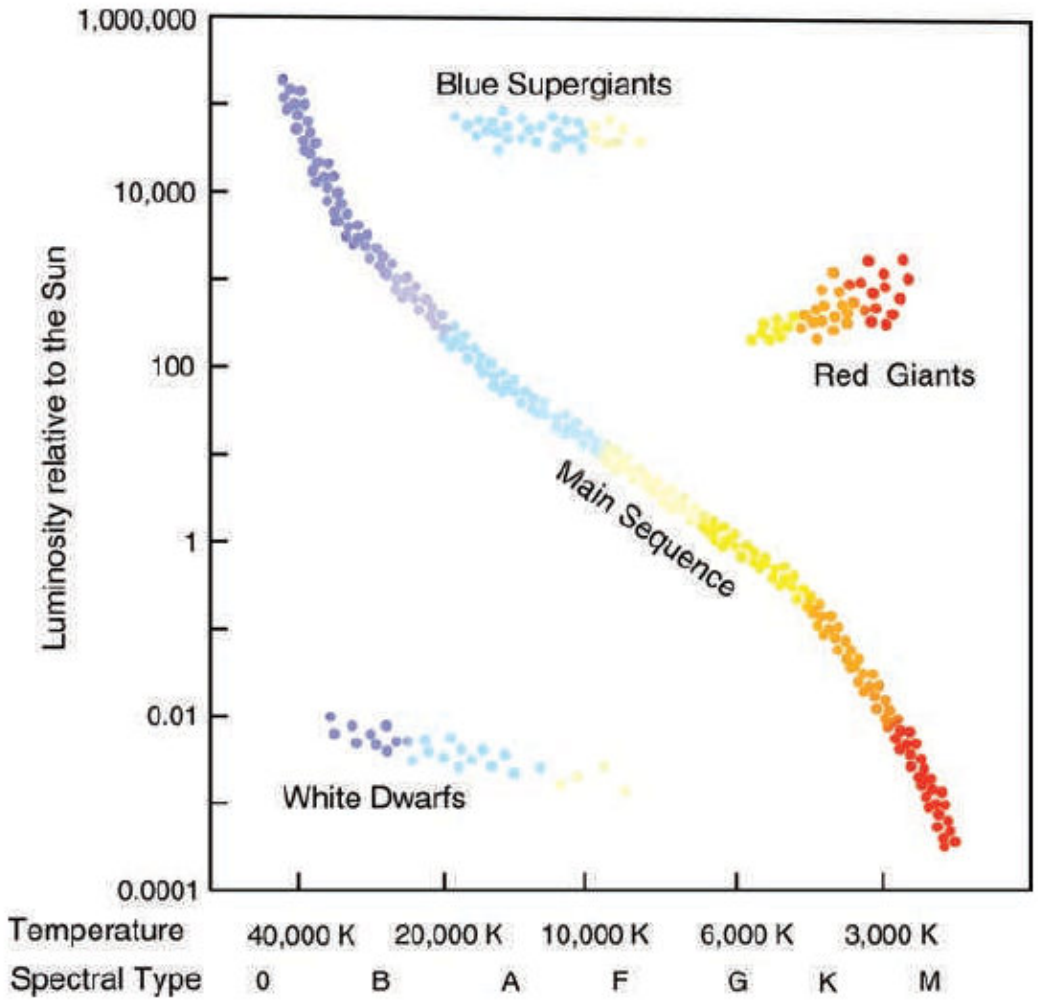
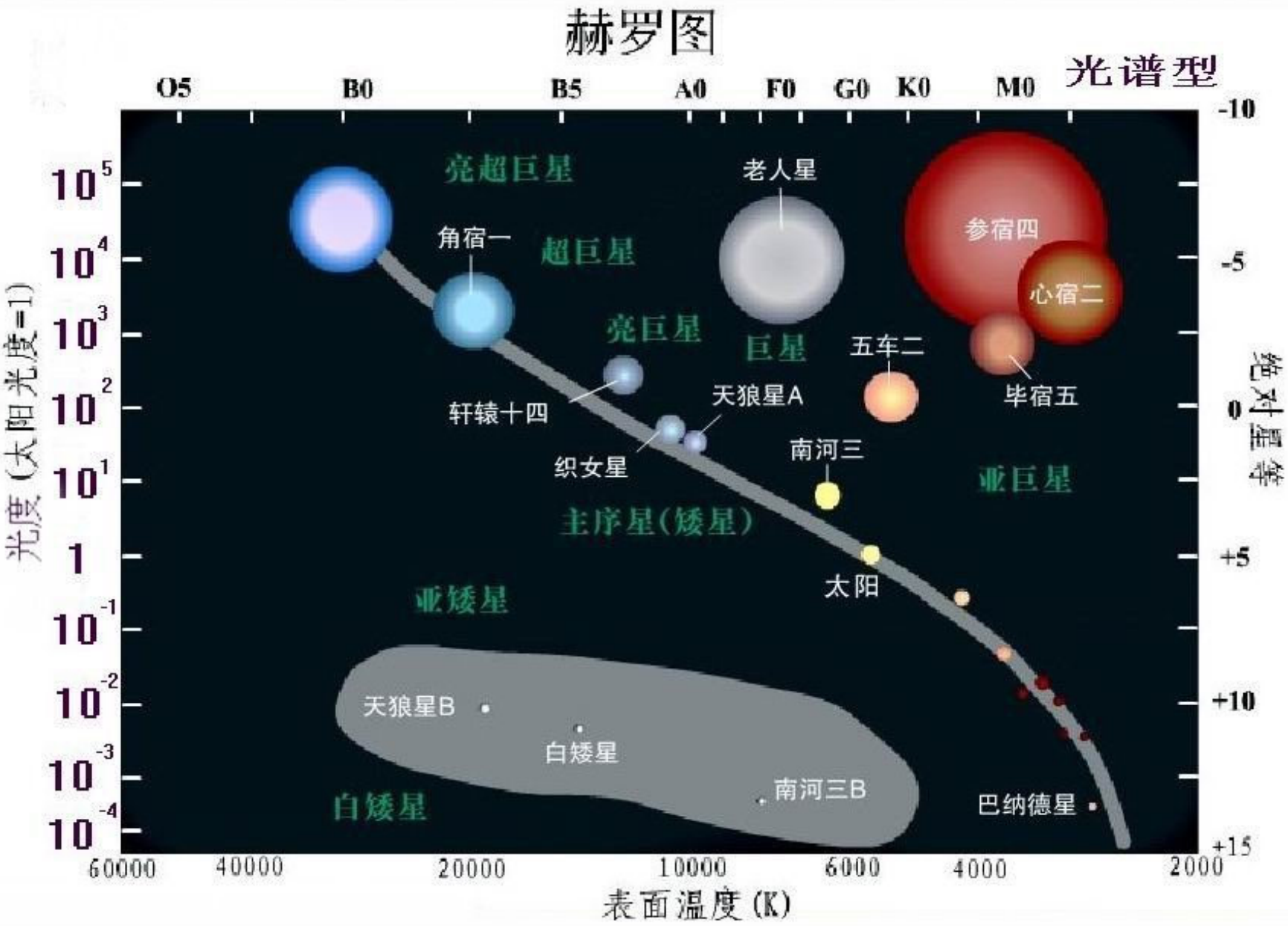
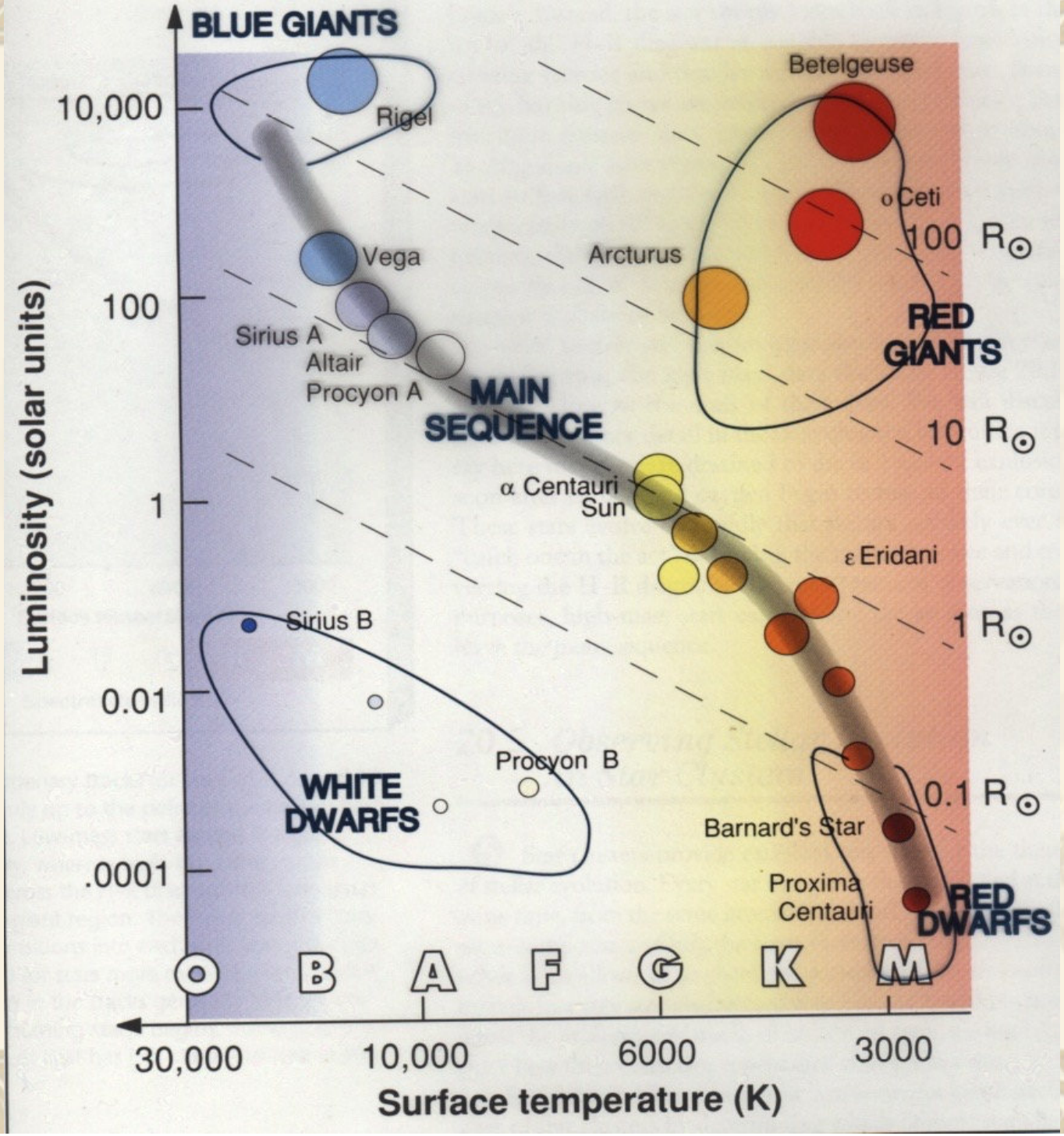


Figure 6.6 The Hertzsprung–Russell Diagram.


赫罗图
光谱型
O5
B0
B5
A0
F0
G0
K0
M0
亮超巨星
超巨星
亮巨星
巨星
亚巨星
主序星(矮星)
亚矮星
白矮星
老人星
参宿四
心宿二
角宿一
五车二
毕宿五
天狼星A
轩辕十四
南河三
织女星
太阳
天狼星B
白矮星
南河三B
巴纳德星
光度(太阳光度=1)
绝对星等
表面温度(K)
60000
40000
20000
10000
6000
4000
2000
-10
-5
0
+5
+10
+15



如何区分红巨星和红矮星？

谱线压力致宽

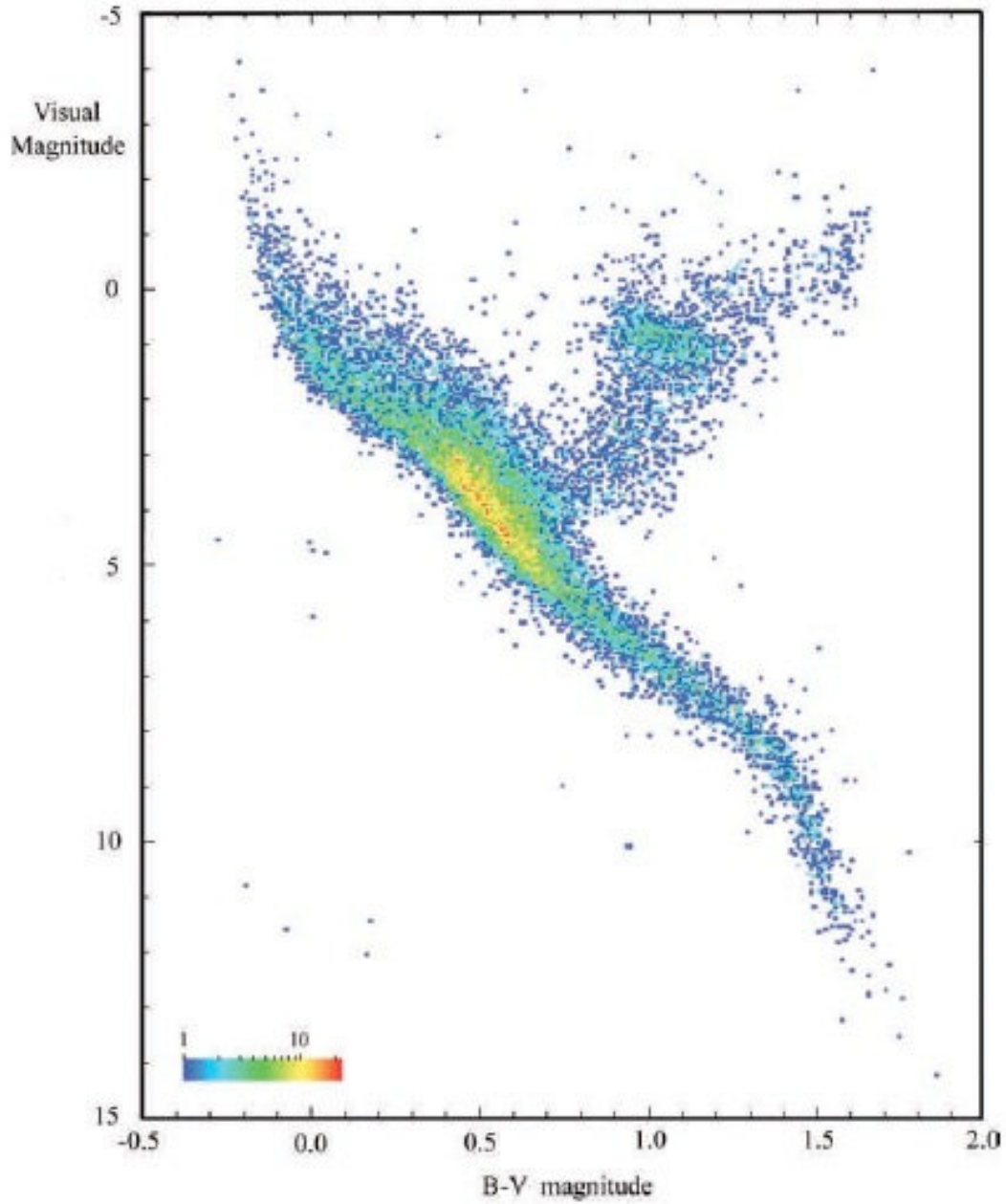


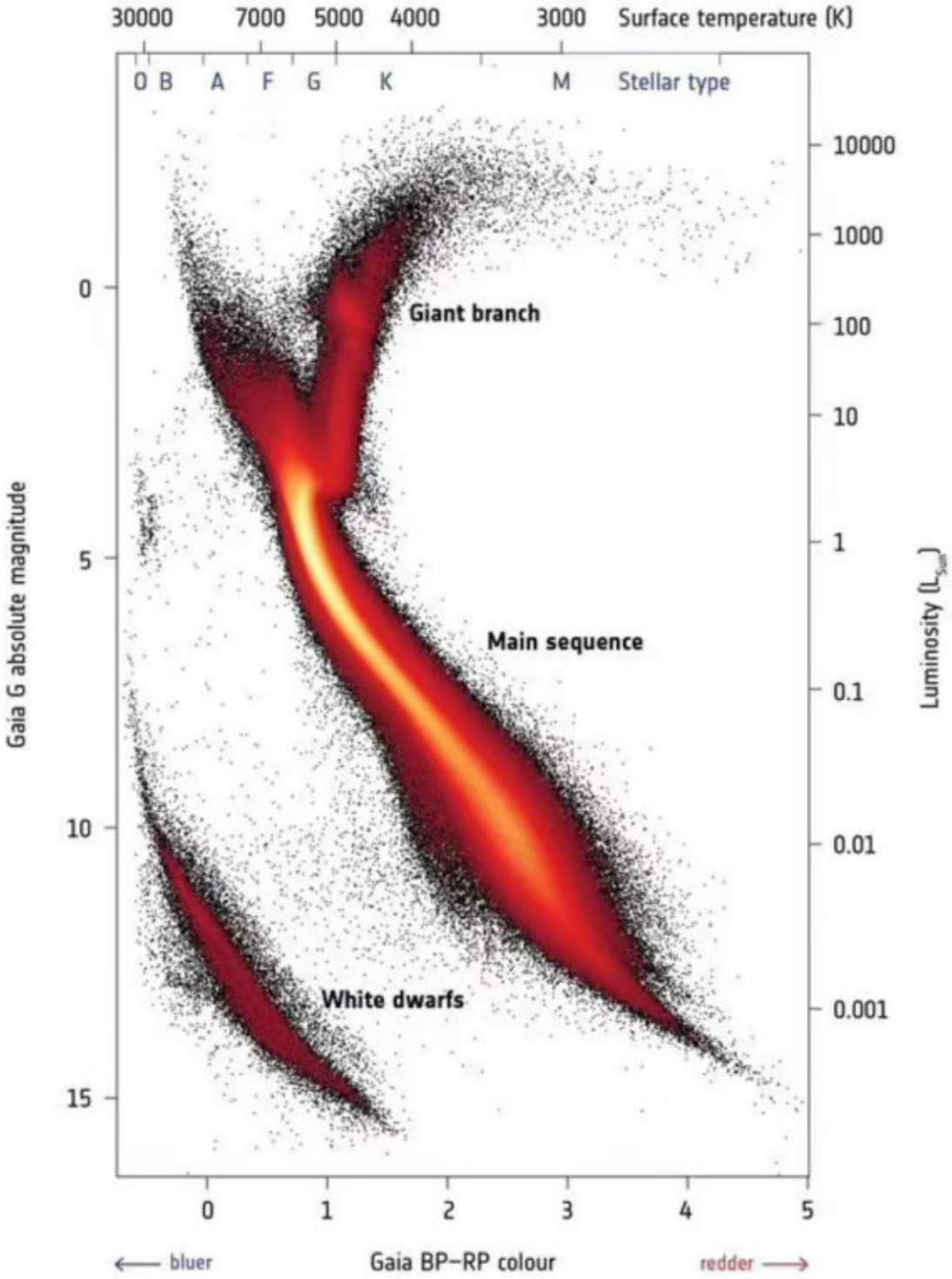
Figure 6.7 Colour–magnitude diagram of the 16 631 brightest stars from the Hipparcos catalogue showing the number of stars in given colour–magnitude cells. (Note that this greatly overemphasizes the number of bright stars as they can be seen at great distances.) Image: Hipparcos Space Astrometry Mission, ESA.

H-R图：

依巴谷星表

•主序带(80-90%)

•红巨星、白矮星少



Gaia的H-R图（201804）：图中每一个点都是一颗恒星，横轴是颜色，纵轴是星等光度。从这张图能够解构恒星一生经历过的生死沉浮。以前的观测很少能看到白矮星以下的这一大段。Gaia还精确测量了每个恒星的距离和运动速度。。。

恒星大小

直接测量

参宿四

（红超巨星）

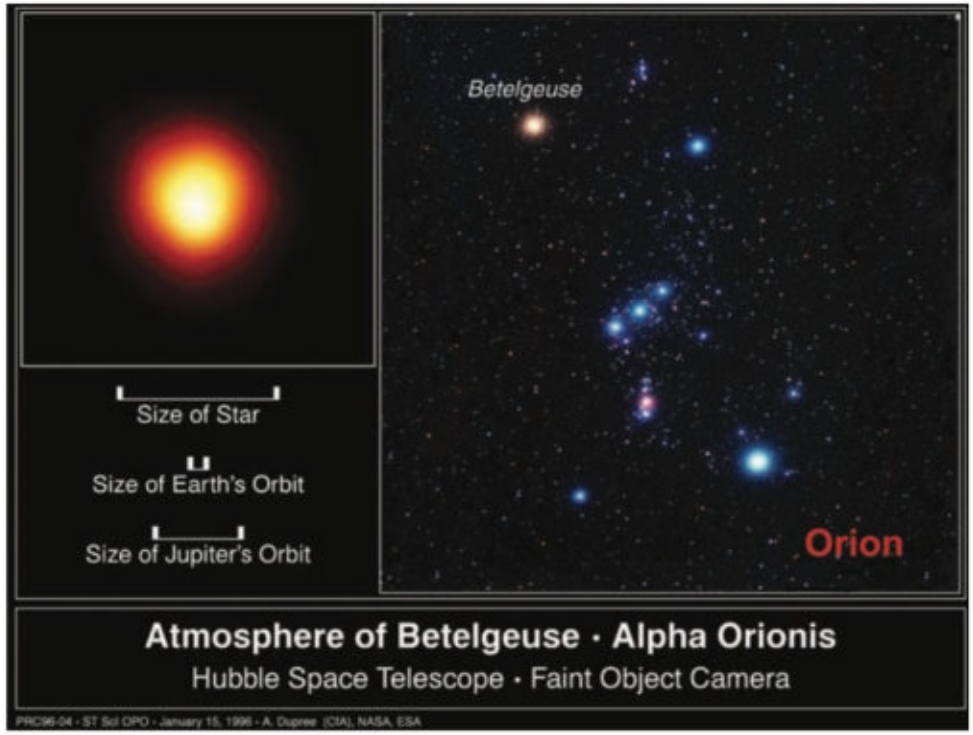


Figure 6.8 Hubble Space Telescope image of Betelgeuse. Image: A. Dupree (CfA), NASA, ESA.

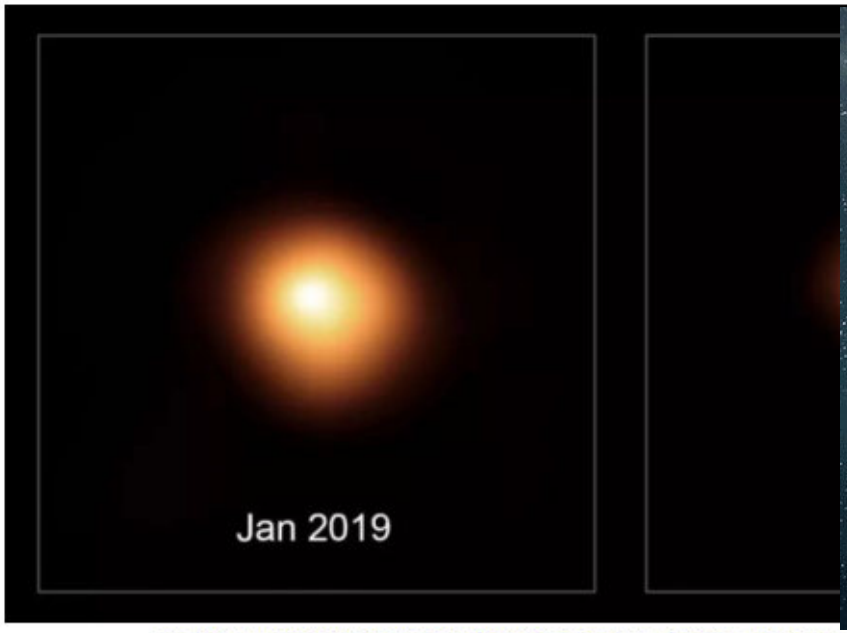
红超巨星参宿四
致暗之谜

$$\theta \sim 0.05'', D = 131pc$$

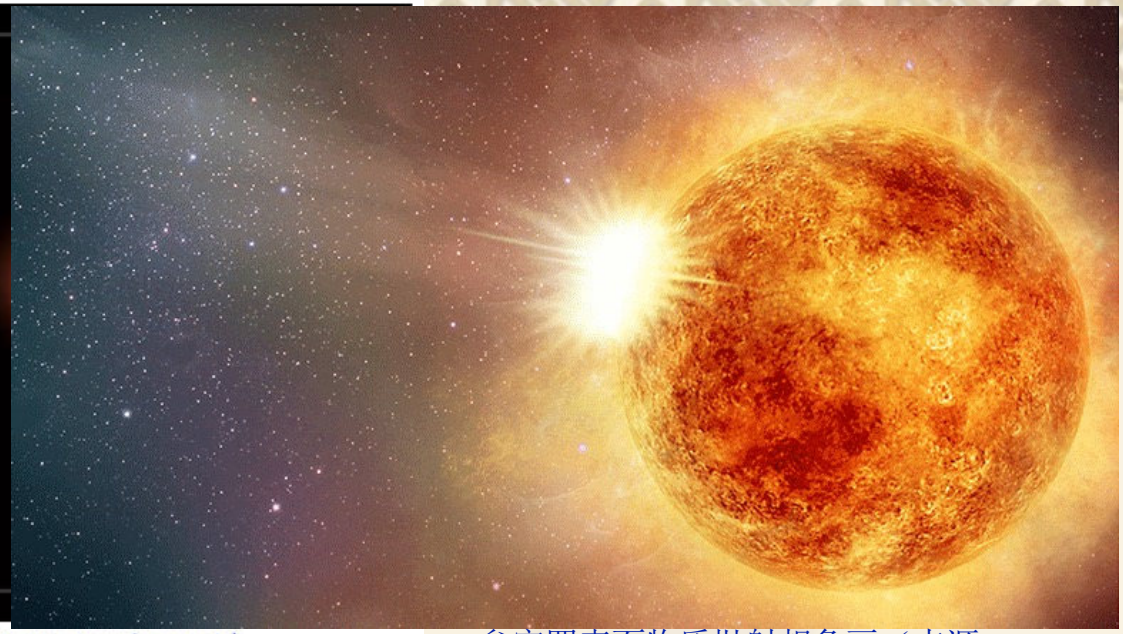
$$d = D\theta = 131 \times 3.1 \times 10^{13} \times [0.05/(3600 \times 57.3)]km$$

$$= 4.1 \times 10^{15} \times 2.4 \times 10^{-7} km = 9.84 \times 10^{8} km$$

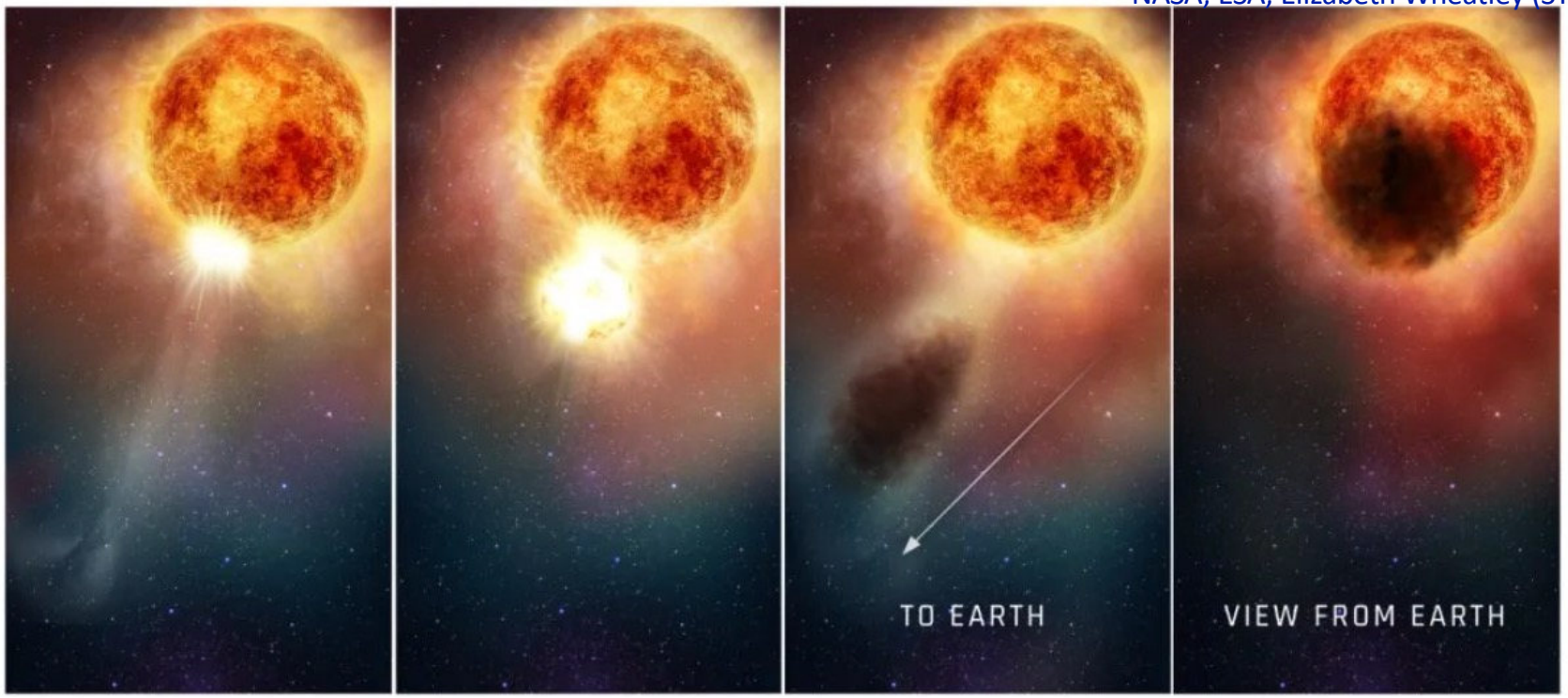
$$\approx 700 R_{SUN}$$



欧南台VLT观测到的参宿四变暗前后的对比（来源：ESO/M. Montargès et al.）



参宿四表面物质抛射想象画（来源：NASA, ESA, Elizabeth Wheatley (STScI)）



对2019年~2020年参宿四亮度变化的解释（来源：NASA, ESA, Elizabeth Wheatley (STScI)）

光学干涉

比邻星的观测：2002年，VLT，2x8.2m，基线长度：~102.4米，等效口径：~100m

$$\theta \sim 1.02 \pm 0.08 marc\sec, D = 1.3 pc$$

$$d = 1.3 \times 3.1 \times 10^{16} \times 1.02 / (1000 \times 3600 \times 57.3)] m$$

$$= 2 \times 10^{8} m$$

$$\approx 1/7 R_{SUN}$$

双星掩食法测量恒星大小

英仙β星

小掩食大：~10h

周期：~68.8h

两星相距：~0.062AU

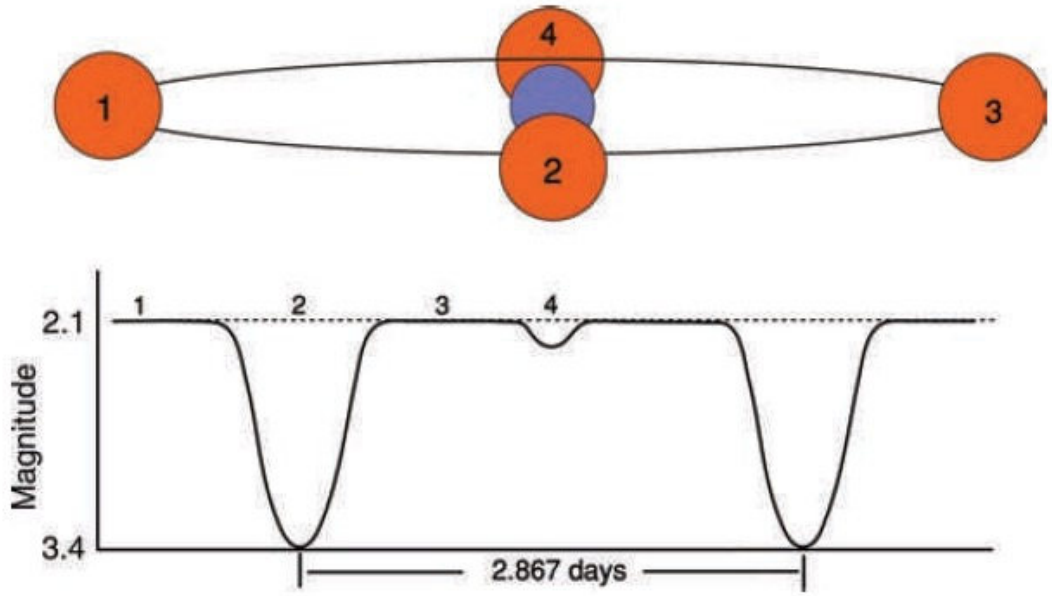


Figure 6.10 The light curve of the eclipsing binary star Algol.

$$A = 0.062AU \approx 9.275\times10^{6}\,km$$

$$d = 3.1415926\times9.275\times10^{6}\times10/68.8$$

$$= 4.2\times10^{6}\,km \approx 3D_{SUN}$$ （小恒星的大小）

用Stephan-Boltzman公式估算恒星的大小

参宿七：

$$M = -6.7(SUN: +4.83)$$

$$L/L_{SUN} = 2.512^{11.53} = 41000$$

$$T = 10700 = 1.84T_{SUN}$$

$$A/A_{SUN} = 41000/1.84^4 = 41000/11.5 = 3500$$

$$D/D_{SUN} = 3500^{1/2} \approx 59$$

参宿四：

$$L/L_{SUN} \approx 60000$$

$$T = 0.6T_{SUN}$$

$$A/A_{SUN} = 60000/0.6^4 = 60000/0.13 = 460000$$

$$D/D_{SUN} = 460000^{1/2} \approx 679$$

用Stephan-Boltzman公式估算恒星的大小

天狼星A:

$$L/L_{SUN} \approx 26$$

$$T = 9900K = 1.72T_{SUN}$$

$$A/A_{SUN} = 26/1.72^4 = 26/8.7 \approx 3$$

$$D/D_{SUN} = 3^{1/2} \approx 1.7$$

天狼星B:

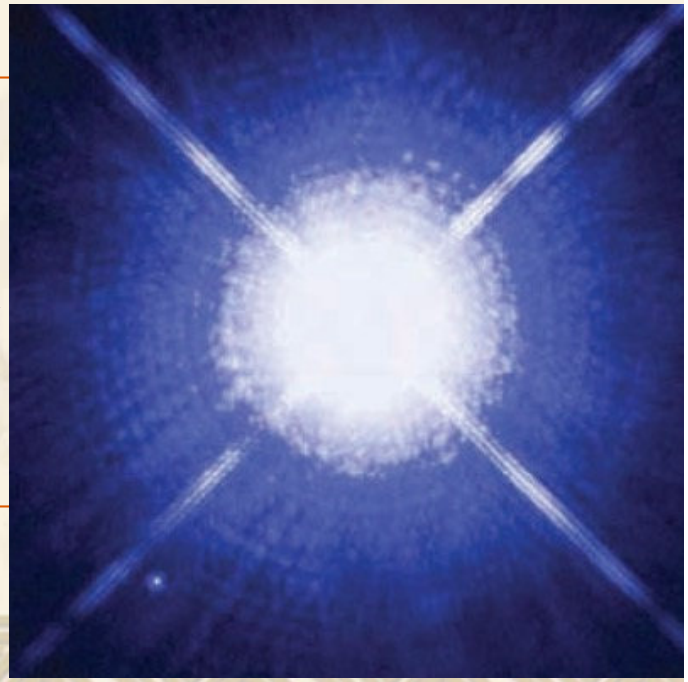
$$L/L_{SUN} \approx 1/416$$

$$T = 15000K = 2.59T_{SUN}$$

$$A/A_{SUN} = 1/416/2.59^4 = 1/416/45 \approx 5.3\times10^{-5}$$

$$D/D_{SUN} = (5.3\times10^{-5})^{1/2} \approx 0.007$$

与地球半径相仿



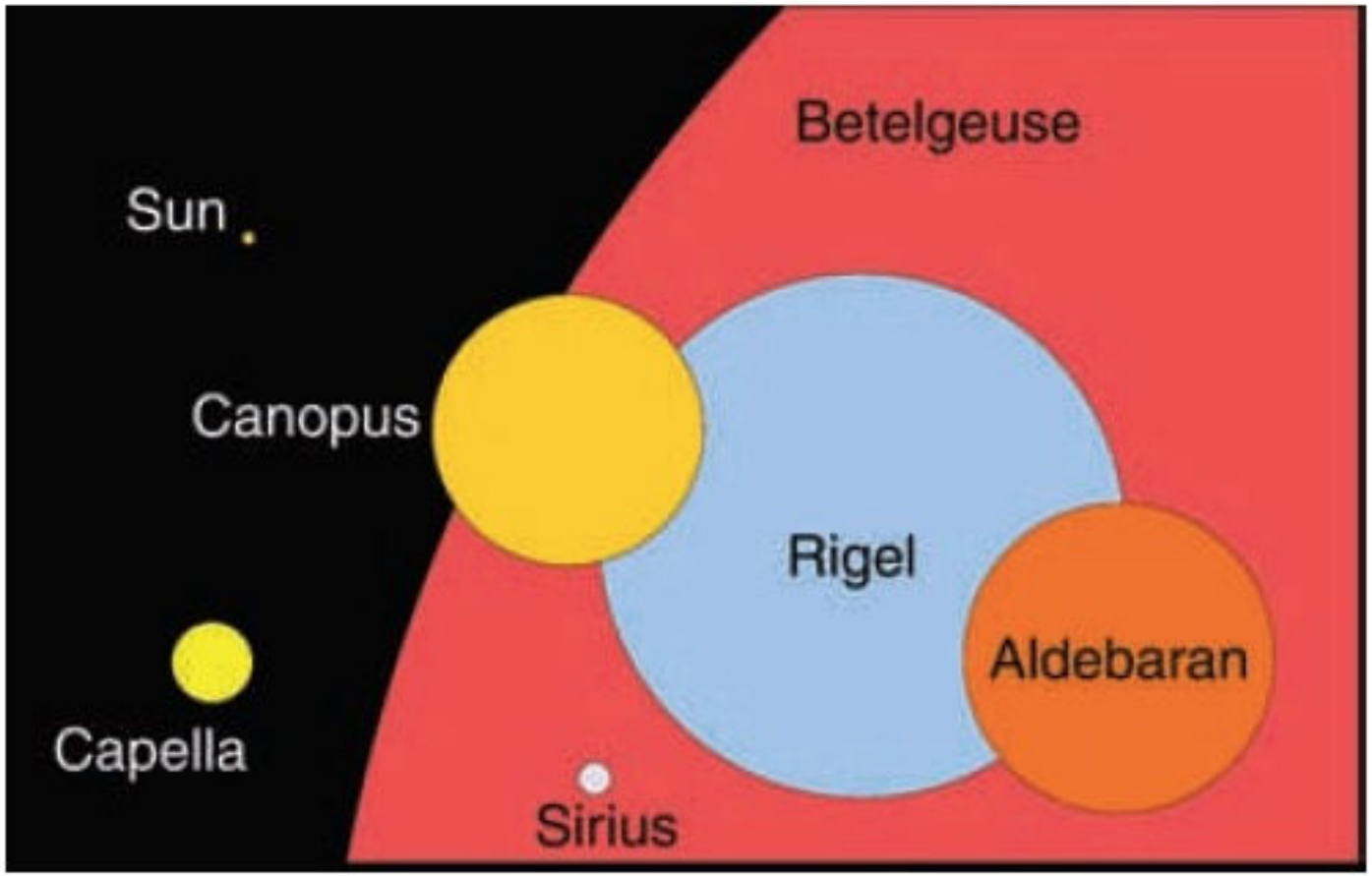


Figure 6.12 The relative sizes of some typical stars.

天文学家发现已知体积最小恒星

日期 2017-07-14　来源：新华社　作者：张家伟　【大 中 小】　【打印】　【关闭】

英国天文学家１２日报告说，他们在约６００光年外的宇宙深空发现了一颗体积仅比太阳系行星土星稍大的恒星，这也是迄今发现的体积最小恒星。

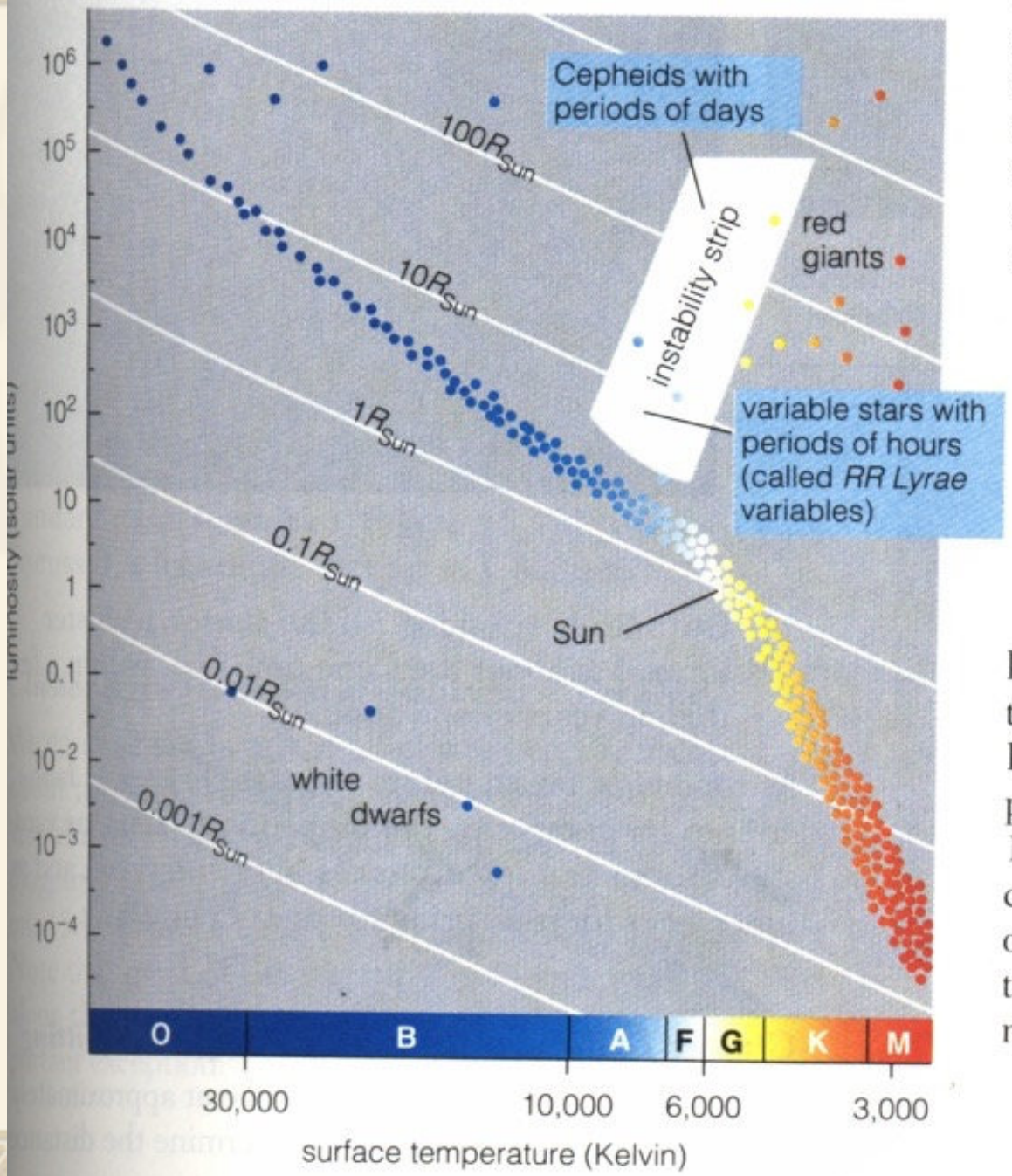
由剑桥大学学者领衔的团队利用天文观测设备探测到了这颗代号“ＥＢＬＭ　Ｊ０５５５－５７Ａｂ”的恒星，它属于一个双星系统的一部分，双星系统中的另一颗恒星比它要大。这颗小恒星表面的引力作用比人类在地球上感受到的强约３００倍。

据介绍，这颗恒星的体积之小几乎已达极限——它本身的质量刚够支撑将氢原子核融合成氦的核聚变过程；如果再小一点，这颗恒星的核心就没有足够压力来完成这一过程。核聚变是太阳这类恒星的主要能量来源。

研究报告作者之一、剑桥大学研究人员亚历山大·伯蒂歇尔说，如果这颗恒星的质量再低一点，就无法支持它核心中的核聚变，那么这颗恒星就会变成一颗褐矮星。

发现这颗恒星还有一个更重要的意义，即这类小体积恒星附近更容易发现地球大小并且表面可能存在液态水的行星。剑桥大学研究人员阿莫里·特里奥说，小体积恒星能够为出现近似地球的行星提供理想条件，而在研究行星之前，有必要先了解它们的恒星。

GURE 15.14 An H–R diagram with the instability strip highlighted.



赫罗图上的等半径线

L=4*pi*R^2*sigma*T^4

恒星的质量和密度

双星系统中：

$$P^2 = [4\pi^2/G(M_1 + M_2)]\, a^3$$

- G2+A0双星系统：$M=M_1+M_2$=4倍太阳质量，则：A0型恒星的质量为3倍太阳质量
- A0+F2：M=4.5倍太阳质量，F2型=1.5倍太阳质量
- 恒星的质量范围：~1/15-50倍太阳质量
- 恒星的大小、质量→密度

恒星的质量-光度关系

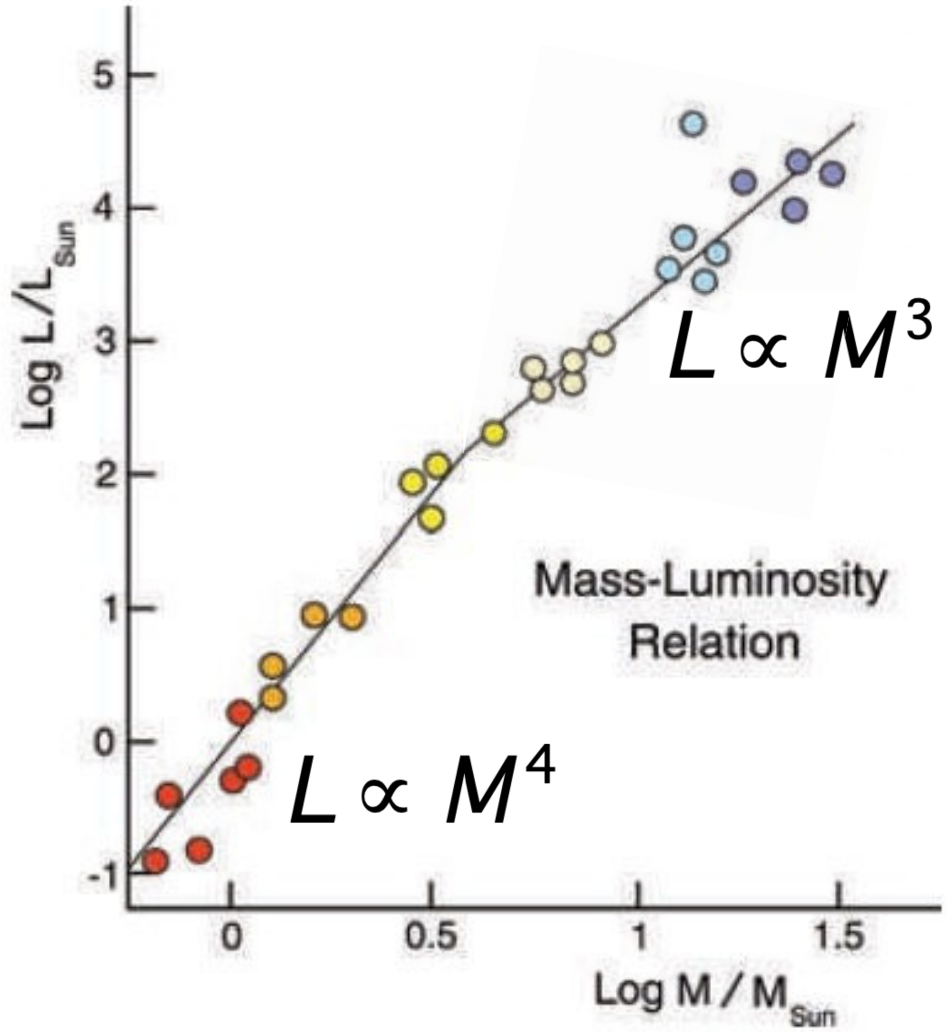
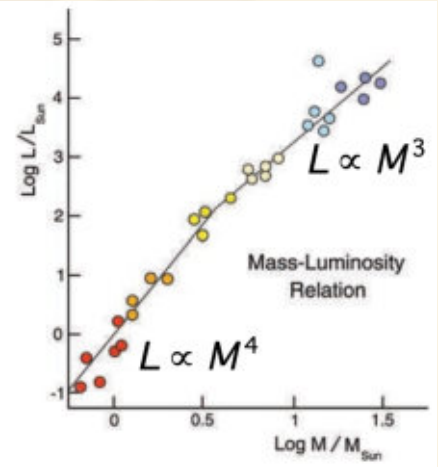


Figure 6.13 The mass–luminosity relationship.

$L \propto M^4$,低质量恒星

$L \propto M^3$,高质量恒星

恒星的寿命

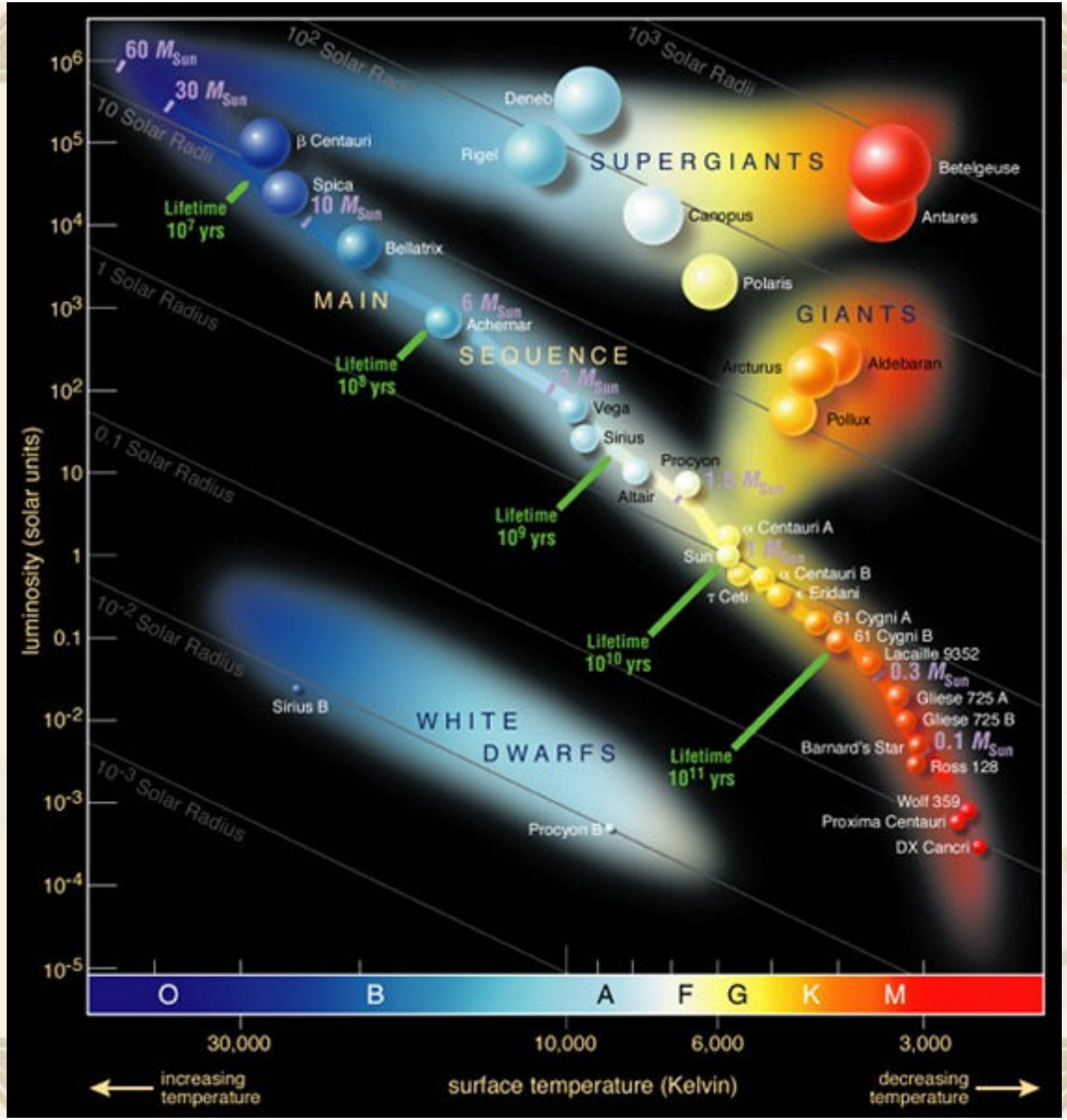


- 恒星内部温度越高，热核反应率越快
- 恒星的质量越大，寿命越短
- 参宿七：$M=17M_{SUN}, L=41000L_{SUN}$
$\rightarrow t=17/41000t_{SUN}=1/2600\ t_{SUN}$~4百万年

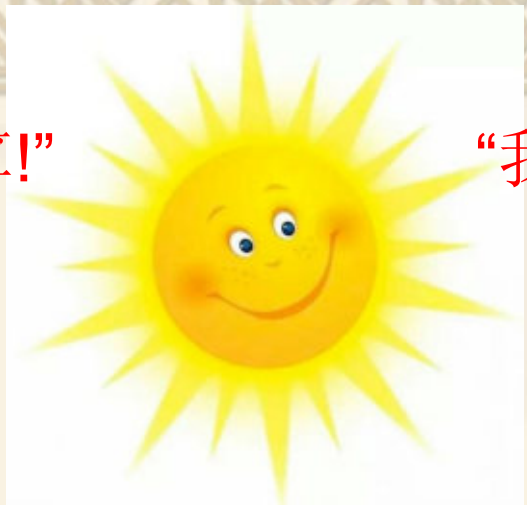
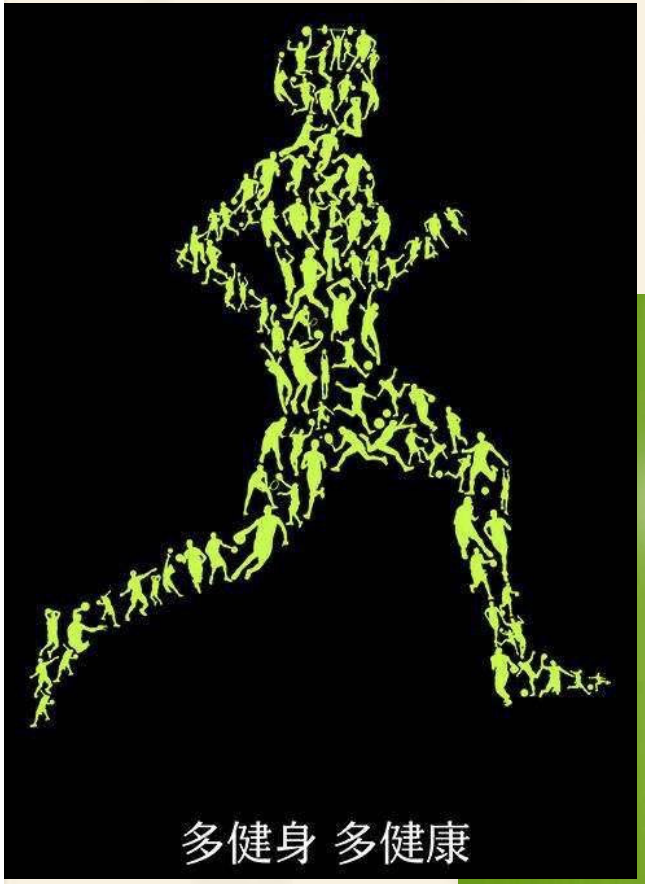
  热光度：$L\sim66000L_{SUN}\rightarrow t\sim2.7$百万年

- 红矮星：$M=1/5M_{SUN}, L=1/10000L_{SUN}$
$\rightarrow t\sim2000\ t_{SUN}$

内部对流，更多的H燃烧（太阳只燃烧10%的氢），寿命更长,比宇宙年龄长！


luminosity (solar units)
surface temperature (Kelvin)
increasing temperature
decreasing temperature
O
B
A
F
G
K
M
30,000
10,000
6,000
3,000
SUPERGIANTS
GIANTS
MAIN SEQUENCE
WHITE DWARFS
Deneb
Rigel
Canopus
Polaris
Betelgeuse
Antares
Arcturus
Aldebaran
Pollux
β Centauri
Spica
Bellatrix
Achernar
Vega
Sirius
Altair
Procyon
α Centauri A
Sun
α Centauri B
τ Ceti
ε Eridani
61 Cygni A
61 Cygni B
Lacaille 9352
Gliese 725 A
Gliese 725 B
Barnard's Star
Ross 128
Wolf 359
Proxima Centauri
DX Cancri
Sirius B
Procyon B
60 M_{Sun}
30 M_{Sun}
10 M_{Sun}
6 M_{Sun}
3 M_{Sun}
1.5 M_{Sun}
1 M_{Sun}
0.3 M_{Sun}
0.1 M_{Sun}
Lifetime 10^7 yrs
Lifetime 10^8 yrs
Lifetime 10^9 yrs
Lifetime 10^{10} yrs
Lifetime 10^{11} yrs
10^2 Solar Radii
10^3 Solar Radii
10 Solar Radii
1 Solar Radius
0.1 Solar Radius
10^{-2} Solar Radius
10^{-3} Solar Radius
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
0.1
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}

“对于恒星，质量说了算!”



“我的体重刚刚好耶☺”