

2022-2023 学年全国中学生天文知识竞赛决赛试题

天津 2023 年 5 月 9 日

I、选择题

1. (仅低年组) 事件视界望远镜 (EHT) 观测了 M87 星系中心的黑洞. M87 是一个什么类型的星系? (B)
(A) 不规则星系 (B) 椭圆星系 (C) 旋涡星系 (D) 超弥散星系
2. 当前时刻距离地球最近的行星是 A .
(A) 水星 (B) 金星 (C) 火星 (D) 木星
3. 格林尼治时间 1858 年 11 月 17 日 0 时的约化儒略日 (MJD) 为 0, 那么当前时刻的 MJD 为 C .
(A) 60071 (B) 60072 (C) 60073 (D) 60074
4. 中国巡天空间望远镜 (CSST) 的设计焦距是 28 m, 口径是 2 m, 所携带的 CCD 上每个像素的尺寸为 $9\text{ }\mu\text{m} \times 9\text{ }\mu\text{m}$, 则每个像素对应的视场大小为 A 角秒.
(A) 0.08 (B) 0.8 (C) 8 (D) 80
5. 假设在人眼敏感的波段, 0 等星对应的光子流量为 1000 光子/平方厘米/秒/埃. 那么在暗夜用肉眼观测 6 等星时, 每秒钟进入瞳孔的可见光光子数大约是 B .
(A) 数十 (B) 数千 (C) 数十万 (D) 数千万
6. (仅高年组) 恒星视向速度的周期性变化可以用来探测系外行星, 那么地球对太阳速度的扰动大概是 A .
(A) 1 cm/s (B) 1 m/s (C) 100 m/s (D) 10 km/s

II、简答题

7. (仅低年组) 太阳演化

《流浪地球 2》的上映为观众带来了一场科幻盛宴, 获得票房和口碑的双丰收, 也使得“洛希极限”“太阳氦闪”等科学名词为大家所熟知. 事实上, 理论推测认为, 太阳氦闪发生于太阳演变为红巨星之后, 随着红巨星核心收缩, 核心温度可高达 10^8 K , 导致核心简并态的氦点燃结合成碳. 它是一个非常短暂的失控热核聚变过程. 而目前, 我们的太阳处于主序星阶段, 其核心主要发生两类氢核聚变反应: pp 反应链和 CNO 循环. 这两种反应的最终结果都是 4 个氢核合成 1 个氦核, 并释放能量. 正是由于上述两种过程使得太阳源源不断地辐射着能量, 让我们在地球上感受到光明和温暖.

- (1) 根据太阳常数计算太阳单位时间内辐射的总能量, 即太阳光度 L_{\odot} .
- (2) 计算太阳有效温度 $T_{\text{eff},\odot}$.

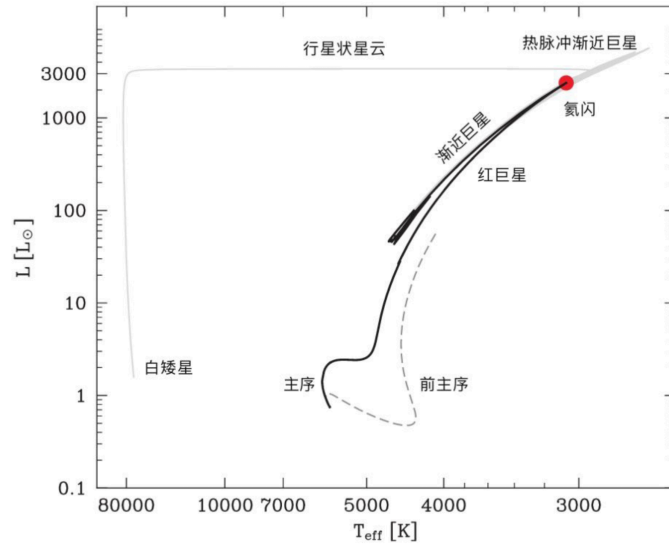


图 1: 1 个太阳质量恒星在赫罗图上的演化轨迹

(3) 图 1 为 1 个太阳质量恒星在赫罗图上的演化轨迹，其中横坐标为恒星的有效温度（单位为 K），纵坐标为恒星光度（单位为 L_{\odot} ）。结合图 1 简述太阳的一生都有哪些演化阶段？并谈一谈太阳由主序星演化至红巨星，其有效温度、光度、体积如何变化？

(4) 假如太阳演化到红巨星阶段并发生氦闪（图 1 红色圆点所示位置），此刻我们的地球会被太阳吞没吗？

8. 海洋与天文

18 世纪，约翰·哈里斯发明的航海钟彻底揭开了航海地理大发现的序幕，通过观测星空获取准确的地方时可以帮助航海家们对舰船位置进行精准测定。

假设一位拿着航海钟的船长，在某天晚上从英国普利茅斯港 ($50^{\circ}23'N$, $4^{\circ}10'W$) 率领船队出发，这时他们观测到一颗比较亮的恒星恰好上中天，地平高度 $65^{\circ}01'$ 。同时船长看了一下已经按格林尼治时间调整好的航海钟指向 10 时 32 分。谁知出发后天气一直都不好，为了记录日期，水手每过 1 个白天就会刻下一个标记。25 个标记后的夜晚，船队来到了一个无人小岛（虚构），天空也终于放晴。这晚船长又记录了那个恒星上中天的时刻，他惊奇地发现航海钟上显示的时间居然和他上次记录的完全相同，只是本次这颗星的地平高度变为了 $86^{\circ}06'$ 。通过以上信息估算这个小岛的地理经纬度，不考虑蒙气差。

9. TRGB

恒星脱离主序，向红巨星演化；红巨星演化到最后阶段，到达红巨星的顶端 (tip) 时，光度会达到最大，这个阶段称为 TRGB (tip-red giant branch)。近十多年的研究发现，红巨星到达顶端时，其绝对星等在 I 波段具有很高的-致性，可以作为标准烛光。球状星团的红巨星支在赫罗图上十分明显，特别适合用来寻找红巨星支的顶端 TRGB。

(1) 求 NGC 6779 在 I 波段的绝对星等。

(2) 求 NGC 6541 的距离。

10. 椭圆星系

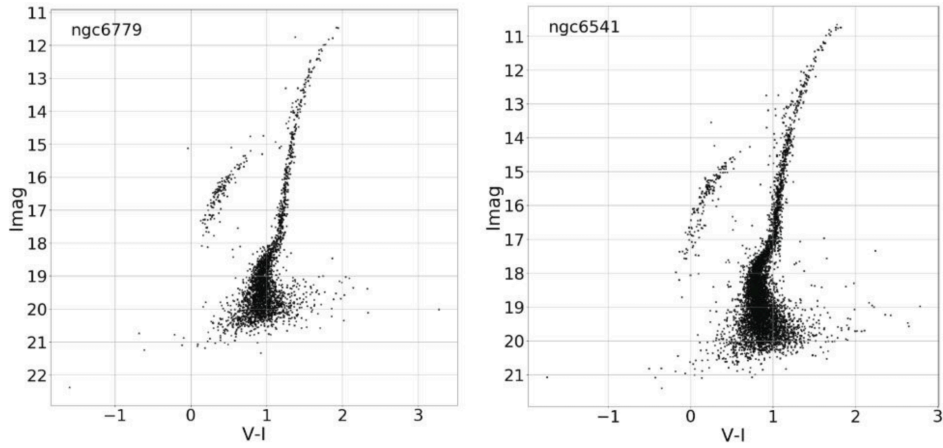


图 2: 球状星团 NGC 6779 和 NGC 6541 的颜色星等图 (可近似看作赫罗图, 色指数代表温度).

表 1: 星团的相关参数.

球状星团	视差 (毫角秒)	$E(B - V)$	[Fe/H]
NGC 6779	0.099	0.26	-1.98
NGC 6541	未知	0.14	-1.81

- (1) 某椭圆星系在 K 波段的视星等为 $m_K = 11.25 \text{ mag}$, 且该星系核球和总星系的流量比为 $B/T = 0.5$. 此外, 光谱数据表明该星系的 $H\alpha$ 发射线的波长为 672.69 nm . 请问此星系核球 K 波段的绝对星等 $M_{K,\text{bulge}}$ 是多少? 只考虑牛顿力学.
- (2) 对于经典核球, 观测数据表明核球 K 波段的绝对星等与中心超大质量黑洞的质量之间有紧致的关系. 天文学家利用此关系就可以通过测量核球的绝对星等推导出星系中心的黑洞质量. 表 3 为 5 个星系的核球 K 波段的绝对星等 $M_{K,\text{bulge}}$ 和其中心黑洞质量 M_{BH} 的观测值 ($M_{K,\text{bulge}}$ 和 M_{BH} 分别利用了独立方法测量得到). 请将这些数据点在 $\log_{10} M_{\text{BH}} \sim M_{K,\text{bulge}}$ 图上标出, 并拟合出最佳的 $\log_{10} M_{\text{BH}} \sim M_{K,\text{bulge}}$ 关系, 并根据 10 (1) 中得到的 $M_{K,\text{bulge}}$ 计算出该星系的 M_{BH} . 注意: M_{BH} 用 M_{\odot} 表示.

11. (仅高年组) 恒星结构与演化

恒星的大气参数可以通过天文观测获得, 而恒星的内部信息由于不透明度的影响, 通常是不能直接观测得到的. 另外, 恒星的年龄也是不可直接观测的恒星基本参数. 要获得恒星的年龄和内部性质, 通常需要构建恒星结构与演化模型. 当模型计算的大气参数与观测的大气参数相符合时, 我们认为该模型接近所观测恒星的真实情况.

距离我们最近的恒星系统是半人马座 α 星 ($\alpha \text{ Cen}$), 其中包含 $\alpha \text{ Cen A}$ 、 $\alpha \text{ Cen B}$ 和 $\alpha \text{ Cen C}$. 接下来, 让我们利用观测的大气参数以及恒星结构与演化模型, 估算 $\alpha \text{ Cen B}$ 的恒星基本参数. $\alpha \text{ Cen B}$ 的观测大气参数及其误差见表 4.

在恒星模型中, 通常用金属元素质量 Z 与氢元素质量 X 之比来表示金属丰度:

$$\log_{10}\left(\frac{Z}{X}\right) = \log_{10}\left(\frac{Z}{X}\right)_{\odot} + [\text{Fe}/\text{H}], \quad (1)$$

表 2: 不同波段消光 (A_λ) 与色余 $E(B - V)$ 关系.

波段 (λ)	$A_\lambda/E(B - V)$
B	4.154
I	1.748
V	3.154

表 3

星系	M_{BH}/M_\odot	$M_{\text{K,bulge}}$
NGC 524	8.67×10^8	-24.69
NGC 2549	1.45×10^7	-20.99
NGC 3245	2.39×10^8	-23.41
NGC 4526	4.51×10^8	-24.15
NGC 4564	8.81×10^7	-22.65

其中太阳的金属丰度之比为

$$\left(\frac{Z}{X}\right) = 0.023. \tag{2}$$

理论计算的恒星模型见表5.

(1) 利用最小二乘法，挑选最佳模型（一个）.

最佳模型，即在观测误差范围内，与观测参数最接近的理论模型.

最小二乘法公式为

$$x = \sum_i^N \left(\frac{X_i - X_{\text{obs}}}{\sigma_{X,\text{obs}}} \right)^2 / N, \tag{3}$$

其中 X_i 表示模型值， X_{obs} 表示观测值， N 表示所用观测参数的个数， $\sigma_{X,\text{obs}}$ 是观测参数的误差.

通常，利用观测的有效温度、表面重力加速度、金属丰度作为恒星模型的观测限制.

- (2) 给出 α Cen B 的恒星基本参数，包括质量、年龄、光度（不考虑误差）.
- (3) 赫罗图（图3）中是一组理论模型计算的等年龄线，在等年龄线上，所有模型的年龄相同、质量不同. 把 α Cen B 画到赫罗图中. 判断 α Cen B 处在哪种演化阶段？支持其发光发热的热核反应是什么？
- (4) 还能用什么方法测得 α Cen B 的质量？

表 4

恒星	有效温度 T_{eff} (K)	误差 (K)	表面重力加速度 $\log g$ (dex)	误差 (dex)	金属丰度 [Fe/H] (dex)	误差 (dex)
α Cen B	5260	50	4.51	0.08	0.23	0.03

表 5

模型	质量 M (M_{\odot})	年龄 τ (Gyr)	光度 $\log_{10}(L/L_{\odot})$	有效温度 T_{eff} (K)	表面重力加速度 $\log g$ (dex)	金属丰度 Z/X	V 星等 M_V (mag)	色指数 $B - V$	色指数 $V - I$
1	0.92	4.40	-0.30	5236	4.53	0.0365	5.69	0.84	0.86
2	0.90	4.80	-0.34	5155	4.54	0.0391	5.82	0.88	0.88
3	1.04	5.00	0.01	5653	4.40	0.0365	4.82	0.69	0.74
4	0.95	5.20	-0.23	5306	4.50	0.0419	5.50	0.82	0.84
5	0.92	5.40	-0.27	5271	4.51	0.0356	5.61	0.83	0.85
6	0.93	5.40	-0.26	5274	4.50	0.0391	5.58	0.83	0.85
7	0.92	6.00	-0.26	5278	4.50	0.0356	5.58	0.83	0.84
8	0.90	6.20	-0.33	5151	4.52	0.0400	5.79	0.88	0.88
9	0.91	6.40	-0.28	5234	4.51	0.0365	5.65	0.84	0.86
10	0.81	6.40	-0.56	4819	4.59	0.0391	6.50	1.03	0.99

参 考 答 案

7. 【解析】

(1) 已知日地平均距离和太阳常数，可得太阳单位时间内辐射的总能量

$$L_{\odot} = 4\pi R^2 A = 3.844 \times 10^{26} \text{ J/s}.$$

(2) 依据斯特藩-玻尔兹曼定律，太阳光度 $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\text{eff},\odot}^4$ ，因此有效温度

$$T_{\text{eff},\odot} = \sqrt[4]{\frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2 \sigma}} = 5777 \text{ K}.$$

(3) 根据 1 个太阳质量恒星在赫罗图上的演化轨迹，可知太阳一生经过的主要阶段有：前主序星-主序星-红巨星-行星状星云-白矮星。依据图 1 可知，太阳由主序星演化至红巨星，其有效温度减小，而光度增大。依据斯特藩-玻尔兹曼定律，可以得到演化为红巨星的太阳相较于主序星阶段拥有更大的体积。

(4) 发生氦闪时，太阳的有效温度 $T_{\text{eff}} = 3100 \text{ K}$ （读图估算范围 3000-3200 K），光度 $L = 2400L_{\odot}$ （读图估算范围 $2000L_{\odot}$ - $3000L_{\odot}$ ）。因此，

$$\frac{4\pi r_{\odot}^2 \sigma T_{\text{eff},\odot}^4}{4\pi r^2 \sigma T_{\text{eff}}^4} = \frac{L_{\odot}}{2400L_{\odot}},$$

半径

$$r = \frac{\sqrt{2400} r_{\odot} T_{\text{eff},\odot}^2}{T_{\text{eff}}^2} = 1.1884 \times 10^{11} \text{ m} = 0.79 \text{ AU} \quad (\text{半径范围 } 0.678 \text{ AU}-0.945 \text{ AU}).$$

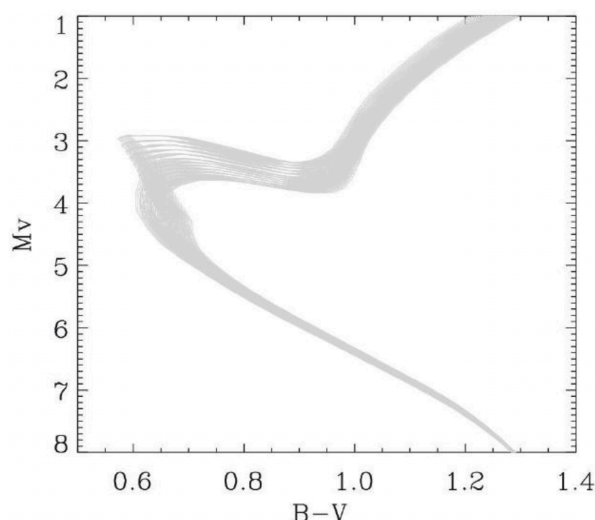


图 3

由于 $r < 1 \text{ AU}$ ，所以忽略太阳大气层对地球的影响，此时我们的地球尚未被太阳吞没。

8. 【解析】首先，求解经度。由于地球自转和公转的影响，同一颗恒星上中天的时间每天提前 $3^{\text{m}}56^{\text{s}}$ 。25 天后提前了 5900 s ，这就反映了小岛与港口的经度差，且由此可以判断船是向西航行。1 h 对应经度差 15° ， 5900 s 即 $24^\circ35'$ 。可得，小岛经度 $4^\circ10' + 24^\circ35' = 28^\circ45' \text{ W}$ 。

然后，求解纬度。由上中天恒星的地平高度可求得地理纬度变化。由港口地理纬度和在港口的上中天地平高度，可求得这颗恒星的赤纬为：(a) $65^\circ01' + 50^\circ23' - 90^\circ = 25^\circ24' \text{ N}$ ；(b) $90^\circ - 65^\circ01' + 50^\circ23' = 75^\circ22' \text{ N}$ 。

每个的赤纬变化都有两种情况：

(a1) 地平高度提升到 $86^\circ06'$ ，在天顶南侧。地理纬度 $50^\circ23' \text{ N} - (86^\circ06' - 65^\circ01') = 29^\circ18' \text{ N}$ ；

(a2) 地平高度提升到 $86^\circ06'$ ，在天顶北侧。地理纬度 $50^\circ23' \text{ N} - (90^\circ - 86^\circ06' + 90^\circ - 65^\circ01') = 21^\circ30' \text{ N}$ ；

(b1) 地平高度提升到 $86^\circ06'$ ，在天顶北侧。地理纬度 $50^\circ23' \text{ N} + (86^\circ06' - 65^\circ01') = 71^\circ28' \text{ N}$ ；

(b2) 地平高度提升到 $86^\circ06'$ ，在天顶南侧。地理纬度 $50^\circ23' \text{ N} + (90^\circ - 86^\circ06' + 90^\circ - 65^\circ01') = 79^\circ16' \text{ N}$ 。

9. 【解析】

(1) 求球状星团的绝对星等，答案较开放。主要思路是：球状星团的亮度，主要由较亮的恒星（光度比太阳至少亮两倍）决定。对球状星团来说，这类恒星主要集中在红巨星支上。观察 NGC 6779 的红巨星支，取红巨星支上的恒星中间亮度，大概 14 等，预估红巨星支大概有恒星 200 颗，200 颗 14 等星的亮度约为 8.25，视差为 $p = 0.091 \text{ mas}$ ，距离 $D = 1/0.099 = 10.417 \text{ kpc}$ ；考虑距离，将视星等转化为绝对星等，约为 -6.84 等。（答案不唯一，只要思路正确，预估方法合理皆可）

(2) 对 NGC 6779 的 TRGB： $p = 0.091 \text{ mas}$ ，距离 $D = 1/0.099 = 10.417 \text{ kpc}$ ； $A_1 = 1.748 \times 0.26 = 0.454 \text{ mag}$ 。从图 2 中可知， $m_1 = 11.454$ 。 $m - M = 5 \log_{10} D - 5 + A$ ，所以

$$M_1 = m_1 + 5 - 5 \times \log_{10} D - A_1 = 11.454 + 5 - 5 \times 4.00 - 0.454 = -4.0.$$

m_I 的读数范围在 11.4~11.5 之间, M_I 在 $-4.06 \sim -3.95$ 之间均可.

I 波段的绝对星等约为 -4 mag , 代入计算 NGC 6541, $A_{I,\text{NGC 6541}} = 1.748 \times 0.14 = 0.245 \text{ mag}$; 从图 2 中读出 $m_{I,\text{NGC 6541}} = 10.65$; $5 \log_{10} D_{\text{NGC 6541}} = 5 + m - M - A = 5 + 10.65 - (-4) - 0.245 = 19.405$.

$$D_{\text{NGC 6541}} = 10^{19.405/5} = 10^{3.881} = 7603 \text{ pc} = 7.603 \text{ kpc}.$$

基于 I 波段的绝对星等一致, 根据两个星团的亮度比来推导距离比, 由此计算出 NGC 6541 的距离也可以.

10. 【解析】

- (1) 此星系的红移 $z = 672.69 \text{ nm}/656.28 \text{ nm} - 1 = 0.025$. 只考虑线性关系的情况下, $z = v/c = d/D_H$, 其中 $D_H = c/H_0$, 所以 $d = zc/H_0 = 100 \text{ Mpc}$. 核球 K 波段的视星等 $m_{K,\text{bulge}} = -2.5 \log_{10}(F_{K,\text{bulge}}/F_0)$, $F_{K,\text{bulge}}$ 为核球的流量, F_0 为常数. 据题目中给出的星系视星等和 B/T , 可以得到核球 K 波段的视星等:

$$m_{K,\text{bulge}} = -2.5 \log_{10}\left(\frac{B}{T} \times \frac{F_K}{F_0}\right) = -2.5 \log_{10} \frac{B}{T} + m_K = 12 \text{ mag}.$$

根据绝对星等和视星等的关系式 (其中 $d_0 = 10 \text{ pc}$), 可知绝对星等:

$$M_{K,\text{bulge}} = m_{K,\text{bulge}} + 5 \log_{10} \frac{d_0}{d} = -23.$$

- (2) 在 $\log_{10} M_{\text{BH}} \sim M_{K,\text{bulge}}$ 图上标出 5 个点; 拟合出最佳的 $\log_{10} M_{\text{BH}} \sim M_{K,\text{bulge}}$ 关系:

$$\log_{10} M_{\text{BH}} = -0.484 M_{K,\text{bulge}} - 2.984;$$

计算得到 $\log_{10}(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) = 8.15$.

11. 【解析】

模型	质量 M (M_{\odot})	年龄 τ (Gyr)	光度 $\log_{10}(L/L_{\odot})$	有效温度 T_{eff} (K)	表面重力加速度 $\log g$ (dex)	金属丰度 Z/X	V 星等 M_V (mag)	色指数 $B - V$	色指数 $V - I$	χ (答案)
1	0.92	4.40	-0.30	5236	4.53	0.0365	5.69	0.84	0.86	0.41
2	0.90	4.80	-0.34	5155	4.54	0.0391	5.82	0.88	0.88	1.52
3	1.04	5.00	0.01	5653	4.40	0.0365	4.82	0.69	0.74	21.53
4	0.95	5.20	-0.23	5306	4.50	0.0419	5.50	0.82	0.84	0.65
5	0.92	5.40	-0.27	5271	4.51	0.0356	5.61	0.83	0.85	0.58
6	0.93	5.40	-0.26	5274	4.50	0.0391	5.58	0.83	0.85	0.03
7	0.92	6.00	-0.26	5278	4.50	0.0356	5.58	0.83	0.84	0.61
8	0.90	6.20	-0.33	5151	4.52	0.0400	5.79	0.88	0.88	1.63
9	0.91	6.40	-0.28	5234	4.51	0.0365	5.65	0.84	0.86	0.40
10	0.81	6.40	-0.56	4819	4.59	0.0391	6.50	1.03	0.99	26.26

- (1) 首先排除掉超出观测范围的模型 (2、3、5、7、8、10), 表中橘色参数超出观测范围. 只需计算 4 个在观测范围内的模型 (1、4、6、9).

(a) 观测的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 换算成 Z/X . $Z/X_{\text{obs}} = 0.0391$, Z/X 下限 0.0365, 上限 0.0419, 误差 0.0027 (0.003).

(b) 将 T_{eff} , $\log g$, Z/X 代入最小二乘法公式计算.

$$\chi = \left\{ \left(\frac{T_i - T_{\text{obs}}}{\sigma T_{X,\text{obs}}} \right)^2 + \left(\frac{\log g_i - \log g_{\text{obs}}}{\sigma \log g_{X,\text{obs}}} \right)^2 + \left[\frac{\left(\frac{Z}{X} \right)_i - \left(\frac{Z}{X} \right)_{\text{obs}}}{\sigma \left(\frac{Z}{X} \right)_{X,\text{obs}}} \right]^2 \right\} / 3.$$

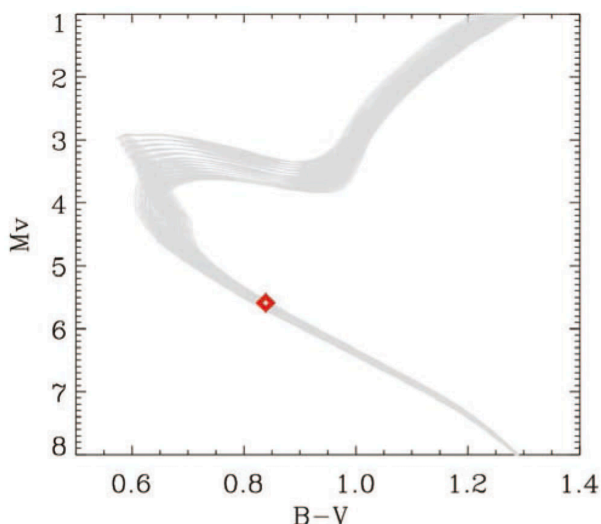
(c) χ 最小的模型为最佳模型, 模型 6.

(2) 利用最佳模型 6 给出, $M = 0.93 M_{\odot}$, 年龄 = 5.40 Gyr (54 亿年), $L = 10^{-0.26} L_{\odot}$.

(3) (a) 把模型 6 中, α Cen B 的 $B-V$ 和 M_V 画到赫罗图中.

(b) 处在主序阶段.

(c) 内部发生氢核聚变成氦的热核反应. 以 p-p 链反应为主, 少量 CNO 循环反应.



(4) 可以通过双星系统计算. (双星系统、三星系统、凌星法、微引力透镜、质光关系, 等等)