

2024-2025 学年全国中学生天文知识竞赛决赛试题

广东 · 汕头 2025 年 5 月 13 日

I、选择题

1. (仅低年组) 北回归线穿过以下我国哪座城市? (D)
(A) 昆明 (B) 海口 (C) 香港 (D) 汕头
2. (仅低年组) 以下对银河系结构类型的表述正确的是? (D)
(A) 透镜星系 (B) 不规则星系 (C) 椭圆星系 (D) 棒旋星系

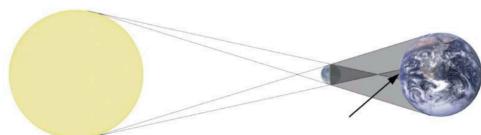


图 1

3. 在图 1 箭头所指区域内, 能看到什么天象? (C)
(A) 日全食 (B) 月全食 (C) 日环食 (D) 月环食
4. 2025 年是中国人自主持久地开展太阳黑子观测工作 D 周年.
(A) 25 (B) 70 (C) 80 (D) 100
5. 白矮星的主要特征之一是其极高的密度. 假设一个白矮星的质量与太阳质量相当, 但半径仅为地球半径. 那么, 这颗白矮星的密度大约是多少? (C)
(A) 10^3 kg/m^3 (B) 10^6 kg/m^3 (C) 10^9 kg/m^3 (D) 10^{12} kg/m^3
6. 2024 年 12 月 ATLAS 发现一颗近地小行星命名为 2024 YR4, 预测该小行星有极小概率在 2032 年撞击地球. 从观测数据的模拟知道 2024 YR4 的轨道是一个偏心率较大的椭圆, 轨道周期约 4 年, 请问其轨道半长轴与下面哪个选项最接近? (A)
(A) 2.5 AU (B) 4 AU (C) 8 AU (D) 1 AU
7. 当你仰望星空的时候, 观察到一颗红色的恒星, 它可能是 B.
(A) 火星 (B) 参宿四 (C) 天狼星 (D) 参宿七
8. 2024 年 12 月 24 日, 帕克太阳探测器 (PSP) 以史上 (截至当日) 最接近太阳的距离 (距太阳表面仅约 620 万千米) 飞掠太阳. PSP 于 2018 年 8 月发射升空, 任务是 “触摸太阳”. 它不断地接近太阳, 直至距离太阳足够近的时候便可以进入并穿过太阳大气的最外层——A, 从而实现在太阳附近收集科学信息, 以帮助科学家们对太阳进行更深入的研究.
(A) 日冕层 (B) 色球层 (C) 光球层 (D) 辐射区

9. 陶寺观象台遗址可能是上古先民用来观测太阳日出方位从而确定一年中不同时节的建筑遗迹. 例如, 当太阳在一年中的日出方位达到最北端的那天就是夏至日. 可是, 陶寺观象台遗址对夏至日的观测在今天却并不可靠了. 以下哪个数值的变化能够直接影响夏至日的日出方位角? (A)
- (A) 黄赤交角 (B) 地球轨道半长轴
 (C) 地球轨道离心率 (D) 春分点黄经 (J2000)
10. 爱因斯坦探针 (Einstein Probe) 是我国发射的一颗致力于探测宇宙天体 X 射线爆发的空间天文卫星, 它被赋予了一个优美而极具内涵的中文名 “天关卫星”, 出典自中国北宋至和元年 (公元 1054 年) 司天监观测并记录的 “天关客星”. “天关客星” 爆发后的遗迹在梅西耶星表中的编号为 A .
- (A) M1 (B) M20 (C) M31 (D) M42
11. (仅高年组) 脉冲星虽以稳定的自转周期而著称, 但实际观测发现, 其自转周期也在以极慢的速率变长, 脉冲星在这个过程中释放的自转动能被认为是其向宇宙空间发出的高能辐射的主要能量来源. 假设脉冲星是质量均匀分布的实心球, 现有一颗质量为 $1.4M_{\odot}$ 、半径为 10 km 的脉冲星, 测得其自转周期为 1 s, 自转周期变长的速率为 10^{-10} s/s, 估算其释放自转动能的功率为 C .
- (A) 4×10^{28} J/s (B) 1×10^{31} J/s (C) 4×10^{29} J/s (D) 1×10^{30} J/s
12. (仅高年组) 在赫罗图中, 我们发现不同的光谱型对应不同的温度, 请问哪个光谱型对应的温度最低? (B)
- (A) M 型 (B) T 型 (C) G 型 (D) K 型

II、简答题

13. (仅低年组) 自行

今年初, “盖亚” (Gaia) 探测器结束了其长达十余年的科学观测任务. Gaia 提供了海量恒星的运动学参数以及位置、距离等重要信息.

图 2 是 Gaia 测量得到的一段时间内某颗恒星位置在天球上的变化情况 (已进行赤纬修正).

- (1) 该观测持续了约几年时间 (精确到整数)?
- (2) 请估计该星的视差与距离.
- (3) 请估计该星在赤经和赤纬方向的自行.
- (4) 根据上述结果, 计算该星在天球上的切向速度.

14. 行星掩食

图 3 是一颗恒星的真实归一化测光数据, 可以看到该恒星数据中出现了典型的掩食现象. 已知该掩食是由行星引起的, 其光变曲线如图 3 所示. 假设该恒星与太阳的物理参数一致, 且我们的观测视角与行星轨道面平行, 请对下面问题做出解答.

由掩食的基本原理可知, 行星对恒星的相对掩食深度与行星半径和恒星半径的比例相关:

$$\delta = \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2, \text{ 其中, } R_p \text{ 表示行星半径, } R_s \text{ 表示被掩食恒星的半径.}$$

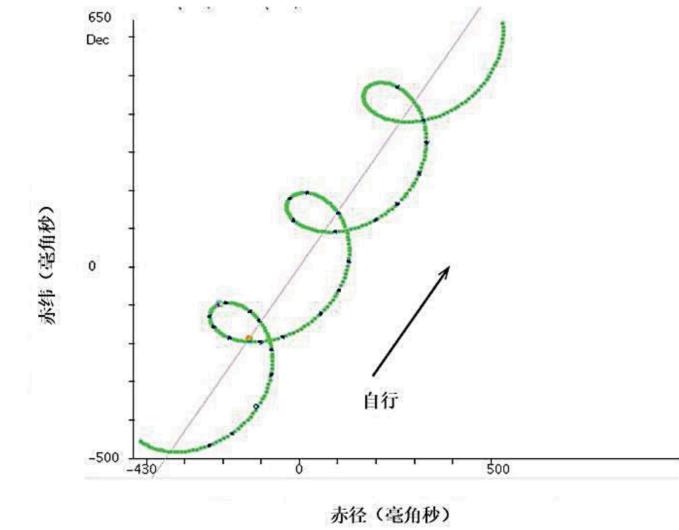


图 2

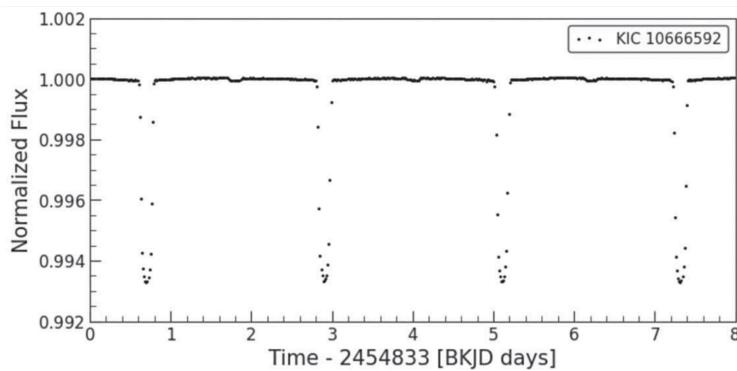


图 3

- (1) 通过图中信息计算该行星的半径.
- (2) 通过测量得知，该掩食信号出现的周期为 2.2 天，假设行星的公转轨道为圆周，请估算公转轨道半径（以 AU 为单位）.
- (3) 根据上述计算得到的信息，能否判断该行星的类型？请给出理由.

15. 马门溪龙观测 T CrB

北冕座 T (T CrB) 是已知的再发新星，它大概率是由一颗白矮星和红巨星组成的密近双星系统，主星白矮星吸积伴星的物质，在其表面形成热斑并点燃核聚变反应，从而造成周期性的短时间光度迅速增加并很快变暗。T CrB 平静期在可见光波段的星等只有 10 等，但在爆发期间最亮可达 2 等。根据之前的观测记录，T CrB 出现这样的爆发的周期间隔大约是 80 年。

马门溪龙是生活在侏罗纪晚期的一种恐龙，最早的化石发现于我国，身体庞大但头部很小，备受天文爱好者的喜爱。一般认为瞳孔大小可以根据巩膜环的大小来判断，但这个物种没有保存巩膜环的标本，我们在此假设马门溪龙的瞳孔直径是人类的 2 倍。

- (1) T CrB 爆发时的光度是平静期光度的多少倍？

- (2) 在马门溪龙生活的时代，它们或许也会偶尔仰望星空。你觉得马门溪龙有可能看到处于平静期的 T CrB 吗？请通过计算说明原因。
- (3) 实际上马门溪龙能观测到 T CrB 的爆发吗？说明其原因。
- (4) 请简单画出马门溪龙观测 T CrB 的场景。

16. 星团年龄

疏散星团中的恒星是由一个大的分子气体云几乎同时分裂形成的。年龄是疏散星团的一个关键参数，等年龄线拟合方法是测量疏散星团年龄的经典方法，但它需要使用理论模型计算的等年龄线数据。疏散星团的恒星在颜色-星等图上的分布通常有一个观测特征，叫作拐点，可以认为拐点附近的恒星刚刚结束主序阶段的演化。如图 4 所示，图中是著名的疏散星团 M67 在颜色-星等图上的分布，其中拐点恒星的位置由五角星所示，为简化计算，我们近似认为拐点位置对应的色指数为 $B - V = 0.5$ （注：色指数是一个和恒星的颜色相关的量）。

表 1

$B - V$ (mag)	0.18	0.19	0.27	0.3	0.35	0.43	0.46	0.52	0.59	0.65	0.69	0.83	0.88	0.93	1.00
质量 (M_\odot)	1.88	1.82	1.69	1.63	1.58	1.41	1.35	1.23	1.15	1.09	1.04	0.92	0.88	0.85	0.78

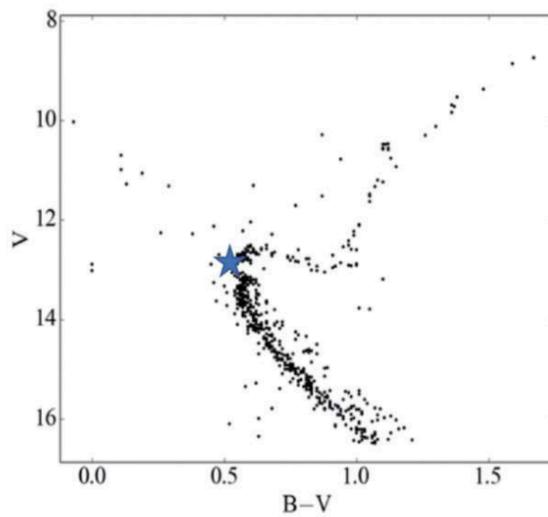


图 4

- (1) 已知主序星的颜色与质量具有相关关系，表 1 是一些已知的恒星质量和颜色 ($B - V$) 数据，请根据这些信息作图，并推断图中拐点星的质量。
- (2) M67 中的恒星与我们的太阳具有非常相似的化学成分（氢的质量比为 73%，氦元素占比 25%，2% 为其他元素）。对于图中所示的拐点星，其主序阶段大约可以燃烧掉总氢质量的 13%。另外，主序星存在典型的质量-光度关系， $L \propto kM^\alpha$ ，其中 L 是恒星的光度， M 是恒星质量， α 是一个常数，对于这里的计算 $\alpha = 3.5$ ， k 是一个常数，该关系得出的光度可以视为恒星在其主序阶段的平均光度。请估算 M67 的年龄。

17. (仅高年组) 星系喷流

星系的高速喷流若朝着地球方向运动，则可能观测到视超光速运动 (superluminal motion) 现象。如图 5 所示，喷流中的气体团块以速度 v 从 O 点运动到 P 点，运动方向与视线方向有一定夹角 θ ，由于光从 O 点和 P 点到达观测者的时间有差别，导致团块横向运动（垂直于视线方向）的速度在观测者看来可能超过光速。有射电望远镜观测到一个距离为 2000 Mpc 的活动星系核的喷流中的气体团块，从图像上看（图 6），其视横向运动角速度为 $\mu = 0.1$ 毫角秒/年。假设喷流运动方向与视线方向的夹角为 $\theta = 10^\circ$ 。回答时速度用光速 c 表示，保留两位小数。

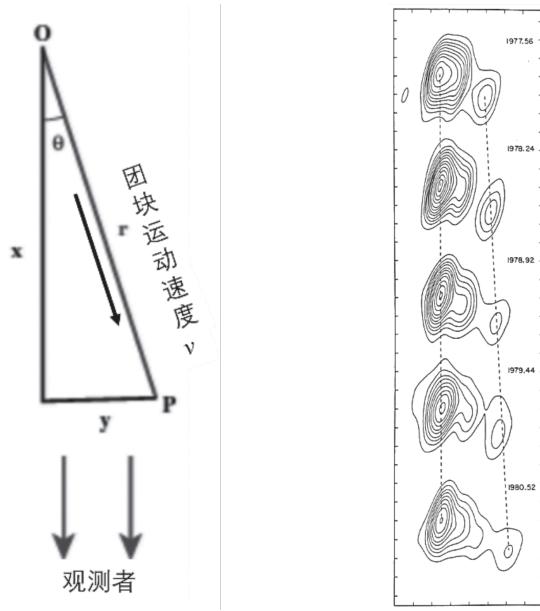


图 5

图 6

- (1) 求团块的视横向速度 v_{app} .
 - (2) 记 $\beta_{\text{app}} = \frac{v_{\text{app}}}{c}$, $\beta = \frac{v}{c}$, 证明如下关系式:
- $$\beta = \frac{\beta_{\text{app}}}{\sin \theta + \beta_{\text{app}} \cos \theta} \quad (1)$$
- (3) 计算题中团块真实运动速度 v .
 - (4) 由第 (2) 小问可知, v 是喷流方向与视线方向的夹角 θ 的函数。若我们不知道 θ 的大小, 那么题目中所述喷流真实速度 v 的最小值是多少?

参考答案

13. 【解析】

(1) 3 年

(2) 扣除自行影响后，恒星在天上的运动轨迹为椭圆，可粗略进行估计，椭圆半长轴即为视差。

如图 7 所示，设视差椭圆的运动方向为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ ，则从 A 点起算，B 点移动了 $1/4$ 年自行量，C 点 $1/2$ ，D 点 $3/4$ 。

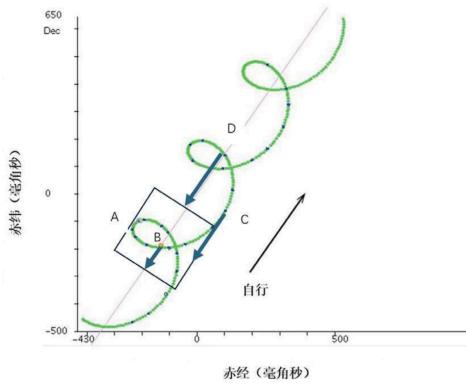


图 7

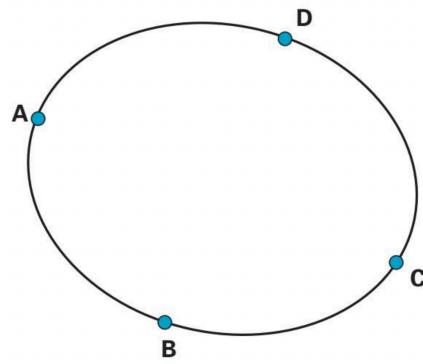


图 8

将图上 B、C、D 点反向平移上述量，则可还原椭圆（图 9）。

在上面的曲线中，A、C 点即最外侧的包络线切点可以确定，而 B、D 点则无法确定。如果简单地以中占位置进行估算（实际上应该为时间的中点），则可画出椭圆的一个外接矩形。还有一种情况如图 9，方法相同。

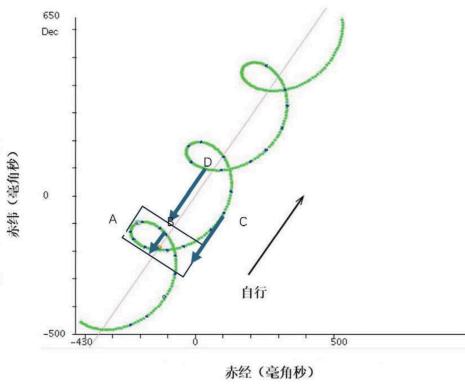


图 9

目视估计椭圆长轴大约为 250 mas，视差为其 $1/2$ ，约为 $250 \text{ mas}/2 = 125 \text{ mas}$ ，对应距离为视差的倒数，约 8 pc，结果可以有 30% 左右的浮动，视差允许范围为 $80 \sim 160$ mas。

- (3) $PM_{ra} = 200 \text{ mas/yr}$ (数值在 150-250 mas/yr 之间均可); $PM_{dec} = 300 \text{ mas/yr}$ (数值在 250-350 mas/yr 之间均可).
- (4) 切向速度可由距离和自行总速度相乘得到. 自行总速度可由上面 PM_{ra} 和 PM_{dec} 计算得到, 也可直接从图上估计, $8 \text{ pc} \times \sqrt{200^2 + 300^2} \text{ mas/yr} = 13.68 \text{ km/s}$, 结果可以有 30% 左右的浮动.

14. 【解析】

- (1) 由掩食的基本原理可以得到, 掩食的深度与行星半径和恒星半径的比例相关: $\delta = (R_p/R_s)^2$.
- 根据题目给出的图, 可估算出掩食深度约为 0.007, 由此可得该行星的半径 $0.0837R_s$. 如果该恒星参数与太阳相同, 那么该行星半径为 0.0837 倍太阳半径.
- (2) 利用开普勒第三定律可以给出公转周期 P 和轨道半径 a 之间的关系: $P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{[G(M_s+M_p)]}$.
- 考虑到行星质量 M_p 相比恒星 M_s 通常是一个可以忽略或者可以近似忽略小量, 我们由此可以近似认为 $M_s + M_p = M_s$.
- 代入轨道周期、太阳质量、万有引力常数可以计算得到半长轴. $a = (P^2 GM_s / 4\pi^2)^{1/3} \approx 0.033 \text{ AU}$.
- (3) 本题为开放式回答, 言之有物即可.

第一种情况: 不能. 要想判断行星的类型需要知道行星的质量和轨道周期. 题目中无法得到行星质量, 所以不能给出类型.

第二种情况: 能. 该行星的半径 $0.0837R_s$ 与木星 (0.1026 倍太阳半径) 接近. 根据实际观测统计, 岩石、金属、冰质的行星几乎没有这么大的 (按照地球密度估计, 也超过了普通的超级地球); 再加上轨道远小于 1 AU, 公转周期短. 该行星的特点, 应属于靠近恒星公转的气态巨行星——热木星.

15. 【解析】

- (1) $\frac{L_{\text{爆}}}{L_{\text{平}}} = 10^{0.4(m_{\text{平}} - m_{\text{爆}})} = 10^{3.2} = 1585 \text{ 倍.}$
- (2) 根据极限星等计算公式和题中马门溪龙的瞳孔之比, 可得马门溪龙肉眼极限星等和人类肉眼视星相差 $5 \lg(D_{\text{龙}}/D_{\text{人}}) \approx 1.5$ 等.
- 如果人眼的极限星等是 6.5 等, 那么马门溪龙肉眼极限星等就是 8 等.
- 如果 T CrB 在 1.5 亿年以前的情况和现在相同, 那么平静期的 T CrB 的视星等大于马门溪龙肉眼极限星等, 因此马门溪龙看不到它.
- 但在 1.5 亿年的漫长时光中, T CrB 的情况很有可能发生了变化. 如果它平静期的视星等增大了 2 等以上, 那么当时的马门溪龙是有可能看到它的.
- 视星等既与星体自身的发光能力有关, 也与星体距离观测者的距离有关.

若只考虑 T CrB 系统与地球距离的变化，则由 $m_1 - m_2 = 5 \lg(d_1/d_2) \geq 2$ ，可得 $d_1/d_2 \geq 2.5$ ，也就是说现在 T CrB 到地球的距离是当时的 2.5 倍以上。

若只考虑 T CrB 系统自身光度的变化，则由 $m_1 - m_2 = -2.5 \lg(F_1/F_2) \geq 2$ ，可得 $F_1/F_2 \leq 0.16$ ，也就是说现在 T CrB 自身的光度是当时的 0.16 倍以下。但这种可能性极小，因为白矮星在平静期非常暗，整个系统的亮度主要来自吸积盘和伴星，目前看这个系统的演化时标很长。

- (3) 马门溪龙很有可能和我们一样可以观测到 T CrB 的爆发。

因为爆发期的 T CrB 的视星等远小于马门溪龙肉眼极限星等。且系统的演化时标很长，可能在数亿年至数十亿年。

注：若回答“马门溪龙观测不到 T CrB 的爆发”，言之有理也可得分。

- (4) 参见图 10 和 11 (参赛同学满分作品)。如果同时画出了马门溪龙和现代北冕座的图形，则需要注明“未考虑恒星的自行”，否则将扣分。



图 10

图 11

16. 【解析】

- (1) 恒星的颜色与质量具有相关关系，将题目中的数据画图如图 12。

对应 $B - V = 0.5$ 的位置，质量约为 1.3 倍太阳质量。

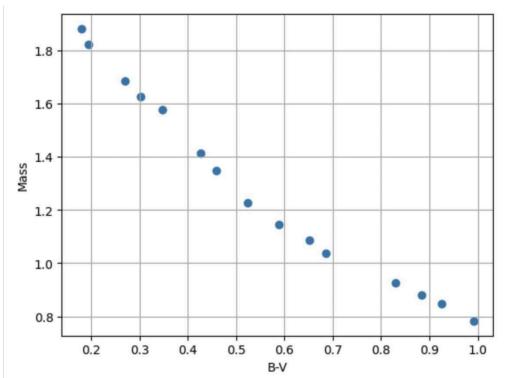


图 12

- (2) 考虑到疏散星团中的恒星具有十分相近的年龄，那么确定其中一颗恒星的年龄即可以估计星团的年龄。

如题中所述，拐点星是刚刚结束主序阶段的演化，因此，这些拐点星的主序年龄即为星团年龄。

恒星主序阶段的光度几乎 100% 由氢核聚变反应提供，因此，可以通过主序阶段的氢核聚变的总产能（总光度），除以恒星在主序阶段的平均光度，来估算拐点星的主序年龄。

由题设条件出发，该星团质量为 m 的拐点星在主序阶段燃烧掉的氢元素总质量为： $M_H = m \times 0.73 \times 0.13$ ，恒星主序阶段核聚变是由 4 个质子合成为 1 个氦原子核，根据爱因斯坦质能方程 ($E = mc^2$)，我们可以根据 4 个氢原子和 1 个氦原子的质量差计算一次核聚变的产能。

$$e = (4m_H - m_{He})c^2 \approx 3.60 \times 10^{-12} \text{ J.} \quad (2)$$

注：这里我们并不需要单独考虑原子核的质量，因为 m_H 和 m_{He} 中都包括了电子质量，相减不影响结果。

再由氢元素的总质量和氢原子的质量，计算氢原子的总数，由此可以得到，主序阶段恒星的总产能为 $E = eM_H/4m_H = 1.322 \times 10^{44} \text{ J.}$

接下来，计算质量为 m 的恒星的平均光度，可以利用太阳的质量-光度关系进行转换 $L/L_\odot = m^{3.5}/M_\odot^{3.5}$ 。

对于质量为 1.3 倍太阳质量的恒星来说，此处取 $L_\odot = 3.826 \times 10^{26} \text{ J/s}$ ，可得平均光度为 $9.584 \times 10^{26} \text{ J/s}$ 。

最终，可得恒星在主序结束时的年龄为 E/L 。

接下来，将主序拐点恒星质量的中值和上下误差代入 $m = 1.3$ 倍太阳质量，就可以得到拐点附近恒星的年龄，即星团 M67 的年龄。

对应质量为 1.3 倍太阳质量，M67 年龄为 $1.379 \times 10^{17} \text{ 秒} = 4.373 \times 10^9 \text{ 年}$ 。

对应质量为 1.28 倍太阳质量，M67 年龄为 $4.547 \times 10^9 \text{ 年}$ 。

对应质量为 1.32 倍太阳质量，M67 年龄为 $4.211 \times 10^9 \text{ 年}$ 。

将年转化为 Gyr (10^9 年) 单位，可以得到疏散星团 M67 的年龄为：4.4 Gyr (4.2 ~ 4.5 Gyr 范围内均可)。

17. 【解析】

- (1) 视横向运动速度 $v_{app} = \mu D$.

代入数字可得， $v_{app} = 9.5 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 3.16c$.

- (2) 假设团块从 O 运动到 P 点，真实距离为 r ，耗时为 $t = \frac{r}{v}$.

同时，光从 O 点传到观测者与从 P 点到观测者之间的时间差为 $\Delta t = \frac{x}{c} = \frac{r \cos \theta}{c}$.

因此，地球观测者看到团块从 O→P 时间为

$$t_{\text{app}} = t - \Delta t = \frac{r}{v} - \frac{r \cos \theta}{c} = \frac{r}{v} \left(1 - \frac{v \cos \theta}{c}\right). \quad (3)$$

视横向运动速度为

$$v_{\text{app}} = \frac{r \sin \theta}{t_{\text{app}}} = \frac{r \sin \theta}{\frac{r}{v} \left(1 - \frac{v \cos \theta}{c}\right)} = \frac{v \sin \theta}{1 - \frac{v \cos \theta}{c}}, \quad (4)$$

即

$$\beta_{\text{app}} = \frac{v_{\text{app}}}{c} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}, \quad (5)$$

可得

$$\beta = \frac{\beta_{\text{app}}}{\sin \theta + \beta_{\text{app}} \cos \theta}. \quad (6)$$

(3) 由第 (1) 问得出 $v_{\text{app}} = 3.16c$, 代入上式得 $\beta = 0.96$, 即 $v = 0.96c$.

(4) 由 (2) 问可得到, $\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_{\text{app}}}(\sin \theta + \beta_{\text{app}} \cos \theta)$, 两边对 θ 求导, $\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{\beta} \right) = \frac{1}{\beta_{\text{app}}}(\cos \theta - \beta_{\text{app}} \sin \theta)$. 因为 $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, 容易论证, 该导数在 $\theta < \arccot \beta_{\text{app}}$ 区间大于 0 (即 β^{-1} 是单调增函数), 在 $\theta > \arccot \beta_{\text{app}}$ 区间小于 0 (即 β^{-1} 是单调减函数).

$\frac{1}{\beta}$ 在 $\theta = \arccot \beta_{\text{app}}$ (即 $\cos \theta = \beta_{\text{app}} \sin \theta$) 时具有最大值, 即 β 具有最小值.

此时, $\cos \theta = \beta_{\text{app}} \sin \theta$, 再结合三角函数公式 $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$, 可以得到 $\beta_{\min} = \frac{\beta_{\text{app}}}{\sqrt{1+\beta_{\text{app}}^2}} = 0.95$, 即最小真实运动速度为 $0.95c$.