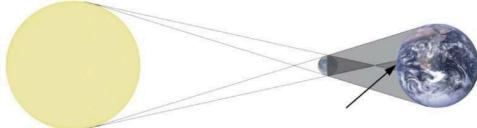


2024-2025 學年全國中學生天文知識競賽

決賽試題

廣東·汕頭 2025 年 5 月 13 日

I、選擇題

- (僅低年組) 北回歸線穿過以下我國哪座城市?(**D**)
(A) 昆明 (B) 海口 (C) 香港 (D) 汕頭
 - (僅低年組) 以下對銀河系結構類型的表述正確的是?(**D**)
(A) 透鏡星系 (B) 不規則星系 (C) 橢圓星系 (D) 棒旋星系
- 
- 圖 1
- 在圖 1 箭頭所指區域內，能看到甚麼天象?(**C**)
(A) 日全食 (B) 月全食 (C) 日環食 (D) 月環食
 - 2025 年是中國人自主持久地開展太陽黑子觀測工作 **D** 週年。
(A) 25 (B) 70 (C) 80 (D) 100
 - 白矮星的主要特徵之一是其極高的密度。假設一個白矮星的質量與太陽質量相當，但半徑僅為地球半徑。那麼，這顆白矮星的密度大約是多少?(**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
 - 2024 年 12 月 ATLAS 發現一顆近地小行星命名為 2024 YR4，預測該小行星有極小機率在 2032 年撞擊地球。從觀測數據的模擬知道 2024 YR4 的軌道是一個偏心率較大的橢圓，軌道週期約 4 年，請問其軌道半長軸與下面哪個選項最接近?(**A**)
(A) 2.5 AU (B) 4 AU (C) 8 AU (D) 1 AU
 - 當你仰望星空的時候，觀察到一顆紅色的恆星，它可能是 **B** 。
(A) 火星 (B) 參宿四 (C) 天狼星 (D) 參宿七
 - 2024 年 12 月 24 日，帕克太陽探測器 (PSP) 以史上 (截至當日) 最接近太陽的距離 (距太陽表面僅約 620 萬千米) 飛掠太陽。PSP 於 2018 年 8 月發射升空，任務是「觸摸太陽」。它不斷地接近太陽，直至距離太陽足夠近的時候便可以進入並穿過太陽大氣的最外層——**A**，從而實現在太陽附近收集科學資訊，以幫助科學家們對太陽進行更深入的研究。
(A) 日冕層 (B) 色球層 (C) 光球層 (D) 輻射區

9. 陶寺觀象台遺址可能是上古先民用來觀測太陽日出方位從而確定一年中不同时節的建築遺跡。例如，當太陽在一年中的日出方位達到最北端的那天就是夏至日。可是，陶寺觀象台遺址對夏至日的觀測在今天卻並不可靠了。以下哪個數值的變化能夠直接影響夏至日的日出方位角？(A)
- (A) 黃赤交角 (B) 地球軌道半長軸
(C) 地球軌道離心率 (D) 春分點黃經 (J2000)
10. 愛因斯坦探針 (Einstein Probe) 是我國發射的一顆致力於探測宇宙天體 X 射綫爆發的空間天文衛星，它被賦予了一個優美而極具內涵的中文名「天關衛星」，出典自中國北宋至和元年（公元 1054 年）司天監觀測並記錄的「天關客星」。「天關客星」爆發後的遺跡在梅西耶星表中的編號為 A 。
- (A) M1 (B) M20 (C) M31 (D) M42
11. (僅高年組) 脍衝星雖以穩定的自轉週期而著稱，但實際觀測發現，其自轉週期也在以極慢的速率變長，軀衝星在這個過程中釋放的自轉動能被認為是其向宇宙空間發出的高能輻射的主要能量來源。假設軀衝星是質量均勻分佈的實心球，現有一顆質量為 $1.4M_{\odot}$ 、半徑為 10 km 的軀衝星，測得其自轉週期為 1 s，自轉週期變長的速率為 10^{-10} s/s，估算其釋放自轉動能的功率為 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. (僅高年組) 在赫羅圖中，我們發現不同的光譜型對應不同的溫度，請問哪個光譜型對應的溫度最低？(B)
- (A) M 型 (B) T 型 (C) G 型 (D) K 型

II、簡答題

13. (僅低年組) 自行

今年初，「蓋亞」 (Gaia) 探測器結束了其長達十餘年的科學觀測任務。Gaia 提供了海量恆星的運動學參數以及位置、距離等重要資訊。

- 圖 2 是 Gaia 測量得到的一段時間內某顆恆星位置在天球上的變化情況（已進行赤緯修正）。
- (1) 該觀測持續了約幾年時間（精確到整數）？
 - (2) 請估計該星的視差與距離。
 - (3) 請估計該星在赤經和赤緯方向的自行。
 - (4) 根據上述結果，計算該星在天球上的切向速度。

14. 行星掩食

圖 3 是一顆恆星的真實歸一化測光數據，可以看到該恆星數據中出現了典型的掩食現象。已知該掩食是由行星引起的，其光變曲線如圖 3 所示。假設該恆星與太陽的物理參數一致，且我們的觀測視角與行星軌道面平行，請對下面問題作出解答。

由掩食的基本原理可知，行星對恆星的相對掩食深度與行星半徑和恆星半徑的比例相關： $\delta = \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2$ ，其中， R_p 表示行星半徑， R_s 表示被掩食恆星的半徑。

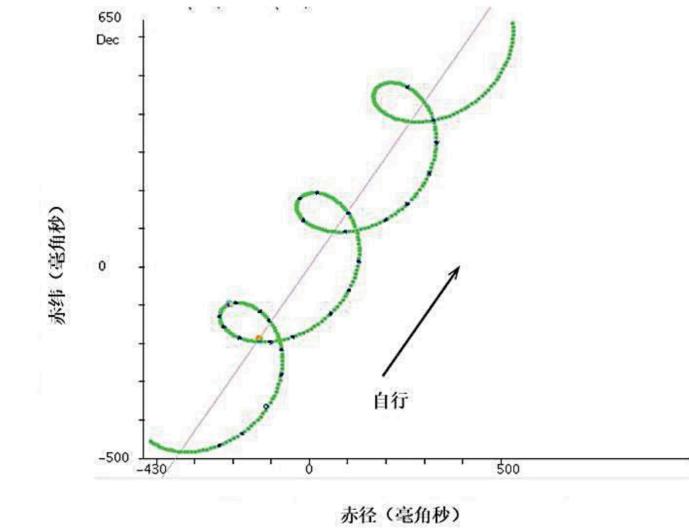


圖 2

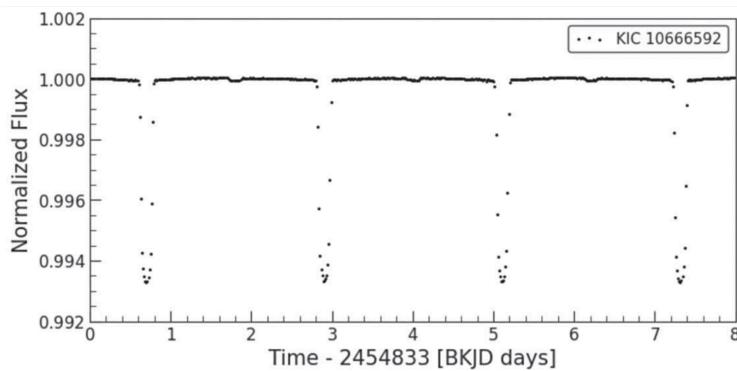


圖 3

- (1) 通過圖中資訊計算該行星的半徑。
- (2) 通過測量得知，該掩食訊號出現的週期為 2.2 天，假設行星的公轉軌道為圓周，請估算公轉軌道半徑（以 AU 為單位）。
- (3) 根據上述計算得到的資訊，能否判斷該行星的類型？請給出理由。

15. 馬門溪龍觀測 T CrB

北冕座 T (T CrB) 是已知的再發新星，它大概是由一顆白矮星和紅巨星組成的密近雙星系統，主星白矮星吸積伴星的物質，在其表面形成熱斑並點燃核聚變反應，從而造成週期性的短時間光度迅速增加並很快變暗。T CrB 平靜期在可見光波段的星等只有 10 等，但在爆發期間最亮可達 2 等。根據之前的觀測記錄，T CrB 出現這樣的爆發的週期間隔大約是 80 年。

馬門溪龍是生活在侏羅紀晚期的一種恐龍，最早的化石發現於我國，身體龐大但頭部很小，備受天文愛好者的喜愛。一般認為瞳孔大小可以根據鞏膜環的大小來判斷，但這個物種沒有保存鞏膜環的標本，我們在此假設馬門溪龍的瞳孔直徑是人類的 2 倍。

- (1) T CrB 爆發時的光度是平靜期光度的多少倍？

- (2) 在馬門溪龍生活的時代，它們或許也會偶爾仰望星空。你覺得馬門溪龍有可能看到處於平靜期的 T CrB 嗎？請通過計算說明原因。
- (3) 實際上馬門溪龍能觀測到 T CrB 的爆發嗎？說明其原因。
- (4) 請簡單畫出馬門溪龍觀測 T CrB 的場景。

16. 星團年齡

疏散星團中的恆星是由一個大的分子氣體雲幾乎同時分裂形成的。年齡是疏散星團的一個關鍵參數，等年齡綫擬合方法是測量疏散星團年齡的經典方法，但它需要使用理論模型計算的等年齡綫數據。疏散星團的恆星在顏色-星等圖上的分佈通常有一個觀測特徵，叫作拐點，可以認為拐點附近的恆星剛剛結束主序階段的演化。如圖 4 所示，圖中是著名的疏散星團 M67 在顏色-星等圖上的分布，其中拐點恆星的位置由五角星所示，為簡化計算，我們近似認為拐點位置對應的色指數為 $B - V = 0.5$ （註：色指數是一個和恆星的顏色相關的量）。

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
質量 (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

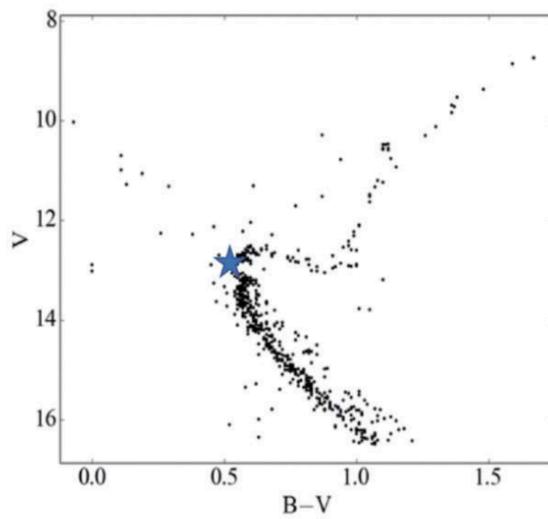


圖 4

- (1) 已知主序星的顏色與質量具有相關關係，表 1 是一些已知的恆星質量和顏色 ($B - V$) 數據，請根據這些資訊作圖，並推斷圖中拐點星的質量。
- (2) M67 中的恆星與我們的太陽具有非常相似的化學成分（氫的質量比為 73%，氦元素占比 25%，2% 為其他元素）。對於圖中所示的拐點星，其主序階段大約可以燃燒掉總氫質量的 13%。另外，主序星存在典型的質量-光度關係， $L \propto kM^\alpha$ ，其中 L 是恆星的光度， M 是恆星質量， α 是一個常數，對於這裏的計算 $\alpha = 3.5$ ， k 是一個常數，該關係得出的光度可以視為恆星在其主序階段的平均光度。請估算 M67 的年齡。

17. (僅高年組) 星系噴流

星系的高速噴流若朝著地球方向運動，則可能觀測到視超光速運動 (superluminal motion) 現象。如圖 5 所示，噴流中的氣體團塊以速度 v 從 O 點運動到 P 點，運動方向與視綫方向有一定夾角 θ ，由於光從 O 點和 P 點到達觀測者的時間有差別，導致團塊橫向運動（垂直於視綫方向）的速度在觀測者看來可能超過光速。有射電望遠鏡觀測到一個距離為 2000 Mpc 的活動星系核的噴流中的氣體團塊，從圖像上看（圖 6），其視橫向運動角速度為 $\mu = 0.1$ 毫角秒/年。假設噴流運動方向與視綫方向的夾角為 $\theta = 10^\circ$ 。回答時速度用光速 c 表示，保留兩位小數。

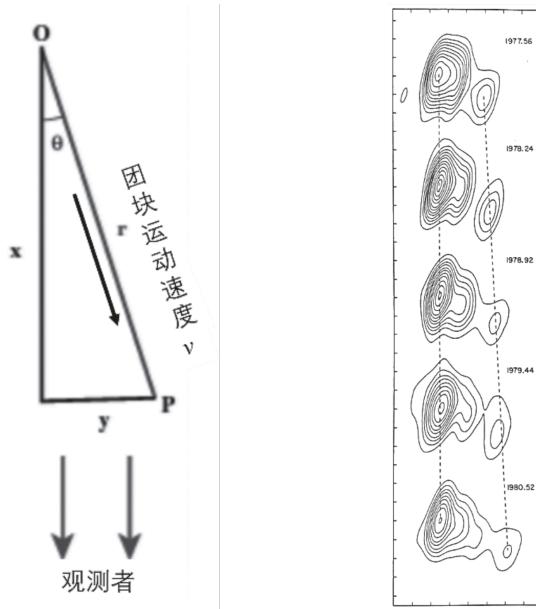


圖 5

圖 6

- (1) 求團塊的視橫向速度 v_{app} 。
 - (2) 記 $\beta_{\text{app}} = \frac{v_{\text{app}}}{c}$ ， $\beta = \frac{v}{c}$ ，證明如下關係式：
- $$\beta = \frac{\beta_{\text{app}}}{\sin \theta + \beta_{\text{app}} \cos \theta} \quad (1)$$
- (3) 計算題中團塊真實運動速度 v 。
 - (4) 由第 (2) 小問可知， v 是噴流方向與視綫方向的夾角 θ 的函數。若我們不知道 θ 的大小，那麼題目中所述噴流真實速度 v 的最小值是多少？

参考答案

13.【解析】

(1) 3 年

(2) 扣除自行影響後，恆星在天上的運動軌跡為橢圓，可粗略進行估計，橢圓半長軸即為視差。

如圖 7 所示，設視差橢圓的運動方向為 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ ，則從 A 點起算，B 點移動了 $1/4$ 年自行量，C 點 $1/2$ ，D 點 $3/4$ 。

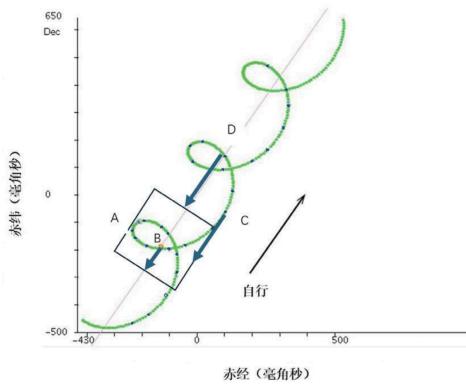


圖 7

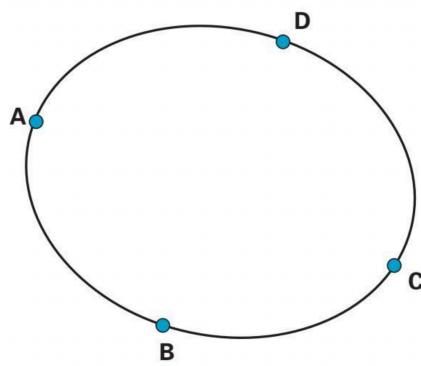


圖 8

將圖上 B、C、D 點反向平移上述量，則可還原橢圓（圖 9）。

在上面的曲線中，A、C 點即最外側的包絡線切點可以確定，而 B、D 點則無法確定。如果簡單地以中占位置進行估算（實際上應該為時間的中點），則可畫出橢圓的一個外接矩形。還有一種情況如圖 9，方法相同。

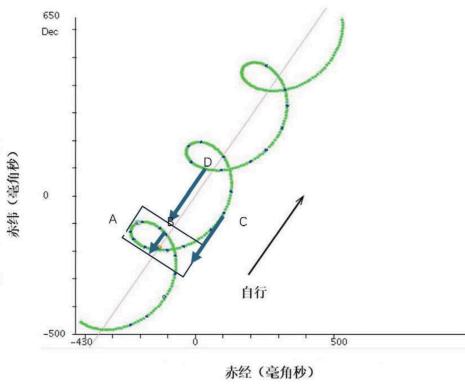


圖 9

目視估計橢圓長軸大約為 250 mas，視差為其 $1/2$ ，約為 $250 \text{ mas}/2 = 125 \text{ mas}$ ，對應距離為視差的倒數，約 8 pc，結果可以有 30% 左右的浮動，視差允許範圍為 $80 \sim 160$ mas。

(3) $PM_{ra} = 200 \text{ mas/yr}$ (數值在 150-250 mas/yr 之間均可) ; $PM_{dec} = 300 \text{ mas/yr}$ (數值在 250-350 mas/yr 之間均可)。

(4) 切向速度可由距離和自行總速度相乘得到。自行總速度可由上面 PM_{ra} 和 PM_{dec} 計算得到，也可直接從圖上估計， $8 \text{ pc} \times \sqrt{200^2 + 300^2} \text{ mas/yr} = 13.68 \text{ km/s}$ ，結果可以有 30% 左右的浮動。

14.【解析】

(1) 由掩食的基本原理可以得到，掩食的深度與行星半徑和恆星半徑的比例相關： $\delta = (R_p/R_s)^2$ 。

根據題目給出的圖，可估算出掩食深度約為 0.007，由此可得該行星的半徑 $0.0837R_s$ 。

如果該恆星參數與太陽相同，那麼該行星半徑為 0.0837 倍太陽半徑。

(2) 利用開普勒第三定律可以給出公轉週期 P 和軌道半徑 a 之間的關係： $P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{[G(M_s + M_p)]}$ 。

考慮到行星質量 M_p 相比恆星 M_s 通常是一個可以忽略或者可以近似忽略小量，我們由此可以近似認為 $M_s + M_p = M_s$ 。

代入軌道週期、太陽質量、萬有引力常數可以計算得到半長軸。 $a = (P^2 GM_s / 4\pi^2)^{1/3} \approx 0.033 \text{ AU}$ 。

(3) 本題為開放式回答，言之有物即可。

第一種情況：不能。要想判斷行星的類型需要知道行星的質量和軌道週期。題目中無法得到行星質量，所以不能給出類型。

第二種情況：能。該行星的半徑 $0.0837R_s$ 與木星 (0.1026 倍太陽半徑) 接近。根據實際觀測統計，岩石、金屬、冰質的行星幾乎沒有這麼大的 (按照地球密度估計，也超過了一般的超級地球)；再加上軌道遠小於 1 AU，公轉週期短。該行星的特點，應屬於靠近恆星公轉的氣態巨行星——熱木星。

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) 根據極限星等計算公式和題中馬門溪龍的瞳孔之比，可得馬門溪龍肉眼極限星等和人類肉眼視星相差 $5 \lg(D_{\text{龍}}/D_{\text{人}}) \approx 1.5$ 等。

如果人眼的極限星等是 6.5 等，那麼馬門溪龍肉眼極限星等就是 8 等。

如果 T CrB 在 1.5 億年以前的情況和現在相同，那麼平靜期的 T CrB 的視星等大於馬門溪龍肉眼極限星等，因此馬門溪龍看不到它。

但在 1.5 億年的漫長時光中，T CrB 的情況很有可能發生了變化。如果它平靜期的視星等增大了 2 等以上，那麼當時的馬門溪龍是有可能看到它的。

視星等既與星體自身的發光能力有關，也與星體距離觀測者的距離有關。

若只考慮 T CrB 系統與地球距離的變化，則由 $m_1 - m_2 = 5 \lg(d_1/d_2) \geq 2$ ，可得 $d_1/d_2 \geq 2.5$ ，也就是說現在 T CrB 到地球的距離是當時的 2.5 倍以上。

若只考慮 T CrB 系統自身光度的變化，則由 $m_1 - m_2 = -2.5 \lg(F_1/F_2) \geq 2$ ，可得 $F_1/F_2 \leq 0.16$ ，也就是說現在 T CrB 自身的光度是當時的 0.16 倍以下。但這種可能性極小，因為白矮星在平靜期非常暗，整個系統的亮度主要來自吸積盤和伴星，目前看這個系統的演化時標很長。

(3) 馬門溪龍很有可能和我們一樣可以觀測到 T CrB 的爆發。

因為爆發期的 T CrB 的視星等遠小於馬門溪龍肉眼極限星等。且系統的演化時標很長，可能在數億年至數十億年。

註：若回答「馬門溪龍觀測不到 T CrB 的爆發」，言之有理也可得分。

(4) 參見圖 10 和 11 (參賽同學滿分作品)。如果同時畫出了馬門溪龍和現代北冕座的圖形，則需要註明「未考慮恆星的自行」，否則將扣分。



圖 10

圖 11

16.【解析】

(1) 恒星的顏色與質量具有相關關係，將題目中的數據畫圖如圖 12。

對應 $B - V = 0.5$ 的位置，質量約為 1.3 倍太陽質量。

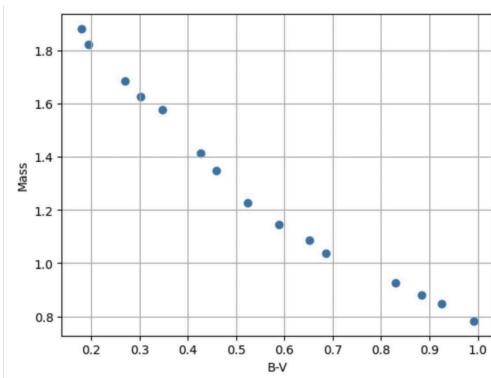


圖 12

(2) 考慮到疏散星團中的恆星具有十分相近的年齡，那麼確定其中一顆恆星的年齡即可以估計星團的年齡。

如題中所述，拐點星是剛剛結束主序階段的演化，因此，這些拐點星的主序年齡即為星團年齡。

恆星主序階段的光度幾乎 100% 由氫核聚變反應提供，因此，可以通過主序階段的氫核聚變的總產能（總光度），除以恆星在主序階段的平均光度，來估算拐點星的主序年齡。

由題設條件出發，該星團質量為 m 的拐點星在主序階段燃燒掉的氫元素總質量為： $M_{\text{H}} = m \times 0.73 \times 0.13$ ，恆星主序階段核聚變是由 4 個質子合成為 1 個氦原子核，根據愛因斯坦質能方程 ($E = mc^2$)，我們可以根據 4 個氫原子和 1 個氦原子的質量差計算一次核聚變的產能。

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

註：這裏我們並不需要單獨考慮原子核的質量，因為 m_{H} 和 m_{He} 中都包括了電子質量，相減不影響結果。

再由氫元素的總質量和氫原子的質量，計算氫原子的總數，由此可以得到，主序階段恆星的總產能為 $E = eM_{\text{H}}/4m_{\text{H}} = 1.322 \times 10^{44} \text{ J}$ 。

接下來，計算質量為 m 的恆星的平均光度，可以利用太陽的質量-光度關係進行轉換 $L/L_{\odot} = m^{3.5}/M_{\odot}^{3.5}$ 。

對於質量為 1.3 倍太陽質量的恆星來說，此處取 $L_{\odot} = 3.826 \times 10^{26} \text{ J/s}$ ，可得平均光度為 $9.584 \times 10^{26} \text{ J/s}$ 。

最終，可得恆星在主序結束時的年齡為 E/L 。

接下來，將主序拐點恆星質量的中值和上下誤差代入 $m = 1.3$ 倍太陽質量，就可以得到拐點附近恆星的年齡，即星團 M67 的年齡。

對應質量為 1.3 倍太陽質量，M67 年齡為 $1.379 \times 10^{17} \text{ 秒} = 4.373 \times 10^9 \text{ 年}$ 。

對應質量為 1.28 倍太陽質量，M67 年齡為 $4.547 \times 10^9 \text{ 年}$ 。

對應質量為 1.32 倍太陽質量，M67 年齡為 $4.211 \times 10^9 \text{ 年}$ 。

將年轉化為 Gyr (10^9 年) 單位，可以得到疏散星團 M67 的年齡為：4.4 Gyr (4.2 ~ 4.5 Gyr 範圍內均可)。

17.【解析】

(1) 視橫向運動速度 $v_{\text{app}} = \mu D$ 。

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

(2) 假設團塊從 O 運動到 P 點，真實距離為 r ，耗時為 $t = \frac{r}{v}$ 。

同時，光從 O 點傳到觀測者與從 P 點到觀測者之間的時間差為 $\Delta t = \frac{x}{c} = \frac{r \cos \theta}{c}$ 。

因此，地球觀測者看到團塊從 O→P 時間為

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

視橫向運動速度為

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

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)問得出 $v_{\text{app}} = 3.16c$ ，代入上式得 $\beta = 0.96$ ，即 $v = 0.96c$ 。

(4) 由(2)問可得到， $\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_{\text{app}}}(\sin \theta + \beta_{\text{app}} \cos \theta)$ ，兩邊對 θ 求導， $\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{\beta} \right) = \frac{1}{\beta_{\text{app}}}(\cos \theta - \beta_{\text{app}} \sin \theta)$ 。因為 $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ，容易論證，該導數在 $\theta < \arccot \beta_{\text{app}}$ 區間大於 0 (即 β^{-1} 是單調增函數)，在 $\theta > \arccot \beta_{\text{app}}$ 區間小於 0 (即 β^{-1} 是單調減函數)。

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

此時， $\cos \theta = \beta_{\text{app}} \sin \theta$ ，再結合三角函數公式 $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$ ，可以得到 $\beta_{\text{min}} = \frac{\beta_{\text{app}}}{\sqrt{1+\beta_{\text{app}}^2}} = 0.95$ ，即最小真實運動速度為 $0.95c$ 。