

# 2023-2024 学年全国中学生天文知识竞赛决赛试题

北京 2024 年 5 月 8 日

## I、选择题

- (仅低年组) 目前天文学研究的热点集中在以下哪个分支学科? ( C )  
(A) 天体测量学 (B) 天体力学 (C) 天体物理学 (D) 天体化学
- (仅低年组) 以下四座城市的地方时哪个更接近“北京时间”? ( D )  
(A) 西安 (B) 北京 (C) 上海 (D) 杭州
- 以下哪个天体距离我们最近? ( A )  
(A) M20 (B) M31 (C) M81 (D) M101
- 全天看上去最亮的恒星位于 D .  
(A) 船底座 (B) 天琴座 (C) 小熊座 (D) 大犬座
- 图 1 箭头指的是哪种太阳活动? ( B )  
(A) 黑子 (B) 暗条 (C) 针状体 (D) 耀斑

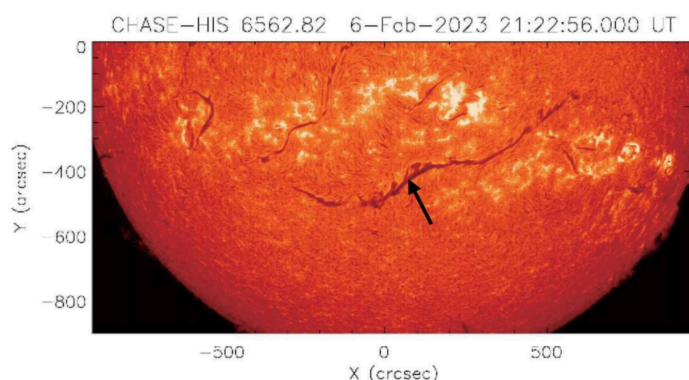


图 1

- 夏至的时候，如果你在北京 ( $116^{\circ}\text{E}$ ,  $40^{\circ}\text{N}$ ) 可以看到太阳于 A 方升起.  
(A) 东北 (B) 正东 (C) 东南 (D) 西北
- 以下我国古代天文学家按年代先后顺序排序正确的是 B .  
①祖冲之 ②郭守敬 ③张衡 ④徐光启 ⑤沈括  
(A) ①②④③⑤ (B) ③①⑤②④ (C) ③①②⑤④ (D) ③⑤①②④
- 当我们观测遥远的恒星时，如果中间有其他恒星或行星（透镜天体）穿过，由于引力的光汇聚作用，观测的背景恒星亮度增加，即微引力透镜效应。利用微引力透镜寻找系外行星，有一个非常重要的时标参数  $\tau$ ，可以大致描述事件信号的长短，它与透镜天体质量的平方根成正比。一般来说，恒星质量的透镜天体引发的微引力透镜事件的时标一般在一个月左右，那么木星质量的透镜天体导致的事件时标为 C 左右。  
(A) 1 年 (B) 1 月 (C) 1 天 (D) 1 小时

9. 若想从太阳系外某颗黄纬为 0 的恒星处，观察到因为地球带来的视向速度的变化，则光谱仪的分辨率应当至少约为 C .
- (A)  $3 \times 10^5$                       (B)  $3 \times 10^7$                       (C)  $3 \times 10^9$                       (D)  $3 \times 10^{11}$
10. 今年 5 月 3 日，A 由长征五号火箭从海南文昌发射中心成功发射.
- (A) 嫦娥六号    (B) 神舟十八号
- (C) 天问二号    (D) 中国巡天空间望远镜 (CSST)
11. (仅高年组) 我们认为现在地球围绕太阳的轨道是半径为 1 AU 的圆轨道. 如果现在地球的速度突然变为原先的 1.2 倍，则新轨道的偏心率是 B .
- (A) 0.2                                      (B) 0.4                                      (C) 0.6                                      (D) 0.8
12. (仅高年组) 在宇宙学中，对同一个天体的距离有不同的定义方式. 一般常用的有共动距离、光度距离、角直径距离. 如果观测到一个红移  $z = 5$  的天体，这三个数值从小到大排序是 A .
- (A) 角直径距离、共动距离、光度距离                      (B) 共动距离、光度距离、角直径距离
- (C) 光度距离、角直径距离、共动距离                      (D) 差距不大，实际计算时可以忽略

## II、简答题

### 13. R2Pub

北京天文馆大视场双筒巡天望远镜 (R2Pub) 位于四川甘孜藏族自治州稻城县海拔 4698 m 的无名山天文台，由两台 60 cm 口径主焦点式大焦比望远镜，两部大靶面 CMOS 探测器、高精度赤道仪及其他附属设施组成. 两台望远镜间距约为 0.3 m，主要观测波段为波长 500 nm 的可见光波段.

- (1) 计算 R2Pub 望远镜在该波段的角分辨率.
- (2) 假如使用双筒望远镜的两个望远镜同时对准同一片天区观测，可以提高望远镜分辨率吗？为什么？
- (3) 已知该望远镜主镜焦距为 1 m，在焦平面上使用像素数  $8K \times 8K$  ( $8000 \times 8000$ )，幅面  $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$  的高灵敏度背照式 CMOS 探测器进行观测，那么它的实际分辨率是多少？单个望远镜单次曝光的视场多大？

### 14. 双星系统

天狼星是地球的天空中除了太阳外最明亮的恒星. 不过它并不像我们的太阳一样“孤身一星”，而是处于双星系统中. 这对双星分别名为天狼 A 和天狼 B，正绕着它们的质心旋转. 天狼 A 和 B 的物理性质如下：

	天狼 A	天狼 B
半径 $R$	$1.7 R_{\odot}$	$0.0084 R_{\odot}$
质量 $M$	$2 M_{\odot}$	$1 M_{\odot}$
光度 $L$	$25 L_{\odot}$	$0.056 L_{\odot}$

现在已知天狼 B 相对于天狼 A 运动的轨道参数如下：

周期 $P$	半长轴 $a$	偏心率 $e$
50 年	7.5 角秒	0.6

- (1) 天狼 A 相对于天狼 B 运动的轨道是什么形状（答出曲线的分类即可）？
- (2) 天狼 A 和天狼 B 绕它们的质心的轨道的半长轴分别为多少（以角秒为单位）？写明计算的过程和理由。
- (3) 除了大家熟悉的行星运动定律，开普勒还得出一个方程： $M = E - (e \sin E)/\pi \times 180^\circ$  来计算行星的位置，其中  $e$  为轨道偏心率， $E$  为偏近点角， $M$  为平近点角，是行星从近日点运动到当前时刻，一个假想行星转过的角度。这一假想行星以真行星轨道的半长轴为半径绕太阳做圆周运动。请问当天狼 A 具有偏近点角  $E = 30^\circ$  时，距离其上一次与天狼 B 的相距最近过去了多久（以年计）？写明计算的过程和理由。

### 15. 太阳演化

随着太阳即将进入第 25 个太阳活动周期的高峰期，太阳耀斑、日冕物质抛射等活动可能会愈加频繁。近日，“夸父一号”卫星便完整地观测到一个峰值强度达 X1 级的耀斑以及其伴随的一个朝向地球的强力日冕物质抛射 (CME)。幸好此 CME 包含的磁场同地球磁场多为同向，没有造成超强地磁暴，引发灾害性空间天气效应。我们知道这些剧烈的太阳活动都蕴含着巨大的能量。那么太阳的能量源于什么？在主序星阶段，太阳的能量源于日核中的两种氢核聚变产生氦的反应：质子-质子反应链和碳-氮-氧循环。目前太阳能量约 99% 都来自质子-质子反应链，图 2 展示了该反应过程。图 3 展示了太阳在主序星阶段各参数（半径  $R$  和光度  $L$ ）的变化，其中和分别为现在太阳半径和光度。假设太阳能量全部来自质子-质子反应链，回答以下问题：

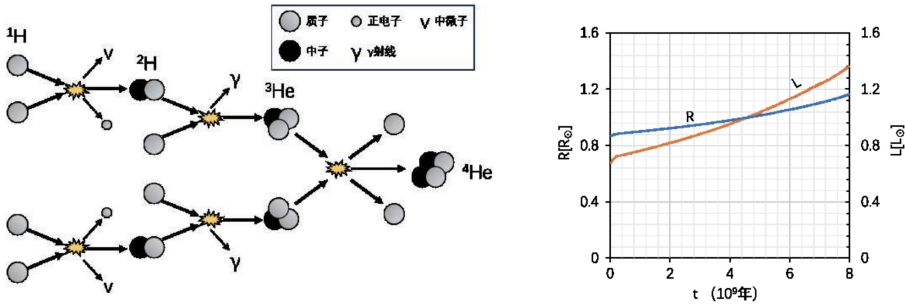


图 2: 氢聚变为氦的质子-质子反应链 图 3: 太阳在主序星阶段各参数的变化

- (1) 给出质子-质子反应链的核反应方程，估算为维持目前太阳的光度，在核聚变过程中，每秒约消耗多少个质子。
- (2) 假如日核质量占太阳总质量的 0.5，日核中氢的质量分数为 0.34，在主序星阶段，太阳一直维持目前的光度，估算太阳在主序星阶段余下的寿命。
- (3) 已知太阳当前是 45.7 亿岁，对比图 3 中模拟的太阳在主序星阶段参数随太阳年龄的变化，我们上述估算的寿命与太阳真实寿命相比更长还是更短。

## 16. 近邻星系

近邻宇宙中，某一正向近圆星系的直径为 40 kpc，观测到它的角直径为 51.566 arcsec.

- (1) 此星系的角直径距离是多少？
- (2) 若此星系光谱存在  $H_{\alpha}$  发射线，则观测到的  $H_{\alpha}$  发射线的波长为多少？该星系固有距离、角直径距离、光度距离近似相等.
- (3) 观测到此星系的全波段流量为  $3.11 \times 10^{17} \text{ W pc}^{-2}$ ，求此星系的热光度.
- (4) (仅高年组) 已知此星系的中心黑洞质量为  $M_{\text{BH}} = 10^6 M_{\odot}$ ，求此星系的爱丁顿比率 (Eddington ratio).

## 17. 流星测光

流星是时标非常短的天文现象. 中国科学院大学和国家天文台建设了一个流星监测网，使用广角相机拍摄流星的视频. 本题给出的这颗流星是在 2023 年猎户座流星雨期间探测到的. 图 4 是拍摄到的流星视频的叠加图，表 1 和 2 是对视频中恒星和流星的测光结果，其中列出的“流量”正比于仪器接收到的光子数.

表 1: 恒星测光结果

编号	名称	流量	大气质量	V 波段星等
1	天狼	2301.5	1.84	-1.44
2	南河三	1022.3	1.23	0.4
3	参宿四	1238.5	1.25	0.45
4	北河三	686.6	1.03	1.16
5	弧矢七	466.7	2.80	1.5
6	北河二	609.7	1.02	1.58
7	参宿五	533.7	1.32	1.64
8	五车五	499.3	1.09	1.65
9	弧矢一	345.4	2.51	1.83
10	井宿三	476.4	1.10	1.93
11	军市一	410.4	1.94	1.98
12	参宿六	389.4	1.67	2.07
13	参宿三	341.4	1.44	2.25
14	五车四	201.2	1.03	2.65

- (1) 表 1 中列出了图 4 中证认出的一些恒星. 请选择属于不同星座的至少 5 颗恒星，将恒星编号标在图 4 中对应恒星旁边.
- (2) 这颗流星是否属于猎户座流星群？
- (3) 大气对光线的吸收会让我们实际看到的星偏暗，星等的变化大致正比于光线穿过大气的厚度，也就是大气质量. 请通过恒星测光结果拟合计算大气消光系数.
- (4) 使用上一问的结果，计算流星各个时刻的 V 波段视星等，并绘制光变曲线.

表 2: 流星测光结果

时间 (ms)	流量	大气质量	距离 (m)
0.0	525.1	1.0061	105753
33.3	1112.4	1.0056	104117
66.7	1694.6	1.0053	102479
100.0	2127.2	1.0052	100910
133.3	1615.2	1.0052	99294
166.7	1142.2	1.0054	97782
200.0	344.5	1.0058	96534

- (5) (仅高年组) 流星的绝对星等是指流星在 100 km 距离处的视星等, 计算流星在各个时刻的绝对星等. 并估计流星体的总动能, 假设流星体动能的一半可以转化为可见光.

## 参考答案

### 13. 【解析】

- (1) 瑞利判据;  $1.22 \times \lambda/D$ , 其中  $\lambda$  为光波长,  $D$  为望远镜的口径.  $1.22 \times 500/(6 \times 10^8) = 1.02 \times 10^{-6} \text{ rad} = 0.21''$ .
- (2) 不能提高分辨率. 因为干涉角分辨率为  $\lambda/d$ , 其中  $\lambda$  为干涉观测波段波长,  $d$  为望远镜之间的距离.  $500/(0.3 \times 10^9) = 0.34''$ , 小于望远镜本身的分辨率. 而且本望远镜使用的 CMOS 探测器不能进行干涉观测. 所以这个双筒望远镜要实现干涉对于光学波段的基线不够长, 不能利用干涉提高分辨率.
- (3) 根据底片比例尺公式  $\alpha = 206265''/F = 206.265''/\text{mm}$ , 由已知条件可得每个像素大小为  $0.01 \text{ mm}$ , 因此每个像素对应  $2.06''$ , 大于理论分辨角, 因此实际分辨率为  $2.06''$ . 使用  $8\text{K} \times 8\text{K}$  探测器, 单个望远镜单次曝光可获得  $4.58^\circ \times 4.58^\circ$  视场, 即约  $21$  平方度.

### 14. 【解析】

- (1) 椭圆. 轨道参数偏心率不为  $0$ , 且小于  $1$ , 是椭圆.
- (2) 若了解质心的计算方式, 则可知质心位于天狼 A 和 B 的连线上, 且位于靠近天狼 A 的三分之一处, 天狼 A 的半长轴应为二者相对运动的半长轴的三分之一, 天狼 B 为三分之二, 分别为  $2.5$  角秒和  $5$  角秒. 若仅了解牛顿运动定律, 因为二者受力相同, 却质量不同, 且加速度与运动 (即轨道) 的尺度成正比, 即质量与运动的尺度成反比 ( $a = f/m$ ). 因此二者半长轴应为一比二, 天狼 A 轨道为天狼 B 的二分之一大, 其半长轴分别为  $2.5$  角秒和  $5$  角秒.
- (3) 天狼 A 的近日点 (近点) 即为距离天狼 B 的最近点. 因此, 已知偏近点角为  $30$  度. 平近点角为:  $M = 30^\circ - (0.6 \times \sin 30^\circ) \div 3.14 \times 180^\circ \approx 12.8^\circ$ . 由开普勒第二定律可知, 绕太阳的圆周运动是匀速的, 因为其与太阳的连线总是其半径. 因此在开普勒方程中, 假想行星转过的角度  $M$  (即平近点角) 除以  $360$  度乘以轨道周期即为相应真行星从近日点运动到现在所经过的时间. 因为假想行星的半径和真行星的半长轴相同, 其周期与真行星相同. 那么对于天狼 A 来说, 相应的假想天狼 A 运动  $12.8$  度所需的时间为  $(12.8/360) \times 50 \text{ 年} \approx 1.78 \text{ 年}$ . 因此当天狼 A 具有偏近点角  $30$  度时, 距离其上一次与天狼 B 的相距最近过去  $1.78$  年.

### 15. 【解析】

- (1) 质子-质子反应链的核反应方程为:  $4^1\text{H} \rightarrow 4^4\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu + 2\gamma + E$ . 每发生一次反应释放能量为:  $E = (4m_{\text{H}} - m_{\text{He}})c^2 \approx (4 \times 1.67 \times 10^{-27} - 6.64 \times 10^{-27}) \times (3 \times 10^8)^2 \approx 3.60 \times 10^{-12} \text{ J}$ . 目前太阳光度为:  $L_{\odot} = 4\pi R^2 A = 3.84 \times 10^{26} \text{ J/s}$ , 其中,  $R = 1 \text{ AU}$  (日地距离). 为维持目前的太阳光度, 每秒参与核聚变反应的质子数约为:  $n_{\text{H1}} = 4 \times L_{\odot} / E = 4.27 \times 10^{38}$  个/s.

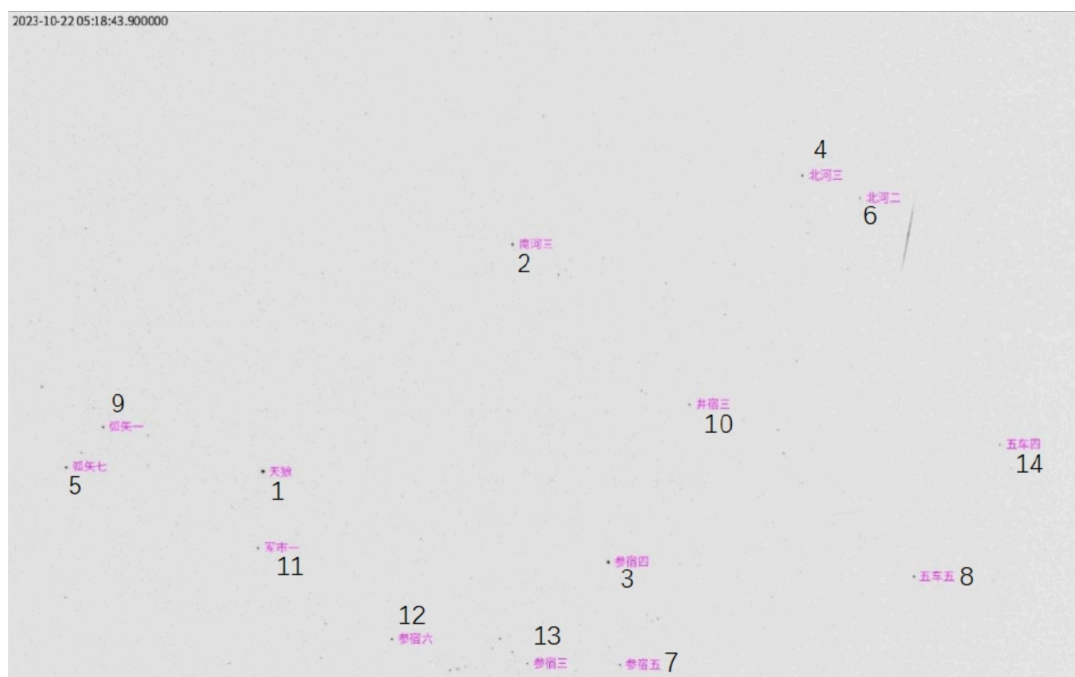
- (2) 太阳核心氢的数量为:  $n_{\text{H}2} = m_{\odot} \times 0.5 \times 0.34 / m_{\text{H}} = 2.03 \times 10^{56}$  个. 太阳核心的氢燃烧尽, 需要时间为:  $t = n_{\text{H}2} / n_{\text{H}1} = (2.03 \times 10^{56}) / (4.27 \times 10^{38}) = 4.75 \times 10^{17} \text{ s} = 1.51 \times 10^{10} \text{ yr}$ .
- (3) 我们估算的太阳寿命比其真实寿命更长. 由图可知, 随着太阳寿命的增长, 太阳的光度在逐渐增大, 而非一直维持目前的光度, 说明每秒参与核聚变反应的质子数增加, 使氢消耗得更快. 因此, 我们用此种方法估算的寿命要比太阳实际寿命长.

#### 16. 【解析】

- (1) 将角直径转换为 rad 单位,  $\theta = 51.566 \text{ arcsec} / 60 / 60 \times \pi / 180 = 0.00025$ ,  $d = D / \theta = 160 \text{ Mpc}$ .
- (2) 利用  $v/c = H_0 d / c$ , 得到  $v/c = 0.04$ . 近邻宇宙不用考虑相对论效应,  $z = v/c = 0.04$ ,  $\lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{lab}} = z + 1 = 1.04$ ,  $\text{H}_{\alpha}$  实验室波长为  $656.28 \text{ nm}$ , 所以观测到的波长为  $682.53 \text{ nm}$ .
- (3)  $F = L_{\text{bol}} / (4\pi d^2)$ , 所以  $L_{\text{bol}} = 10^{42} \text{ erg/s}$ .
- (4)  $L_{\text{Edd}} = 1.26 \times 10^{38} (M_{\text{BH}} / M_{\odot}) \text{ erg/s}$ , 所以爱丁顿比率为  $L_{\text{bol}} / L_{\text{Edd}} = 0.079$ .

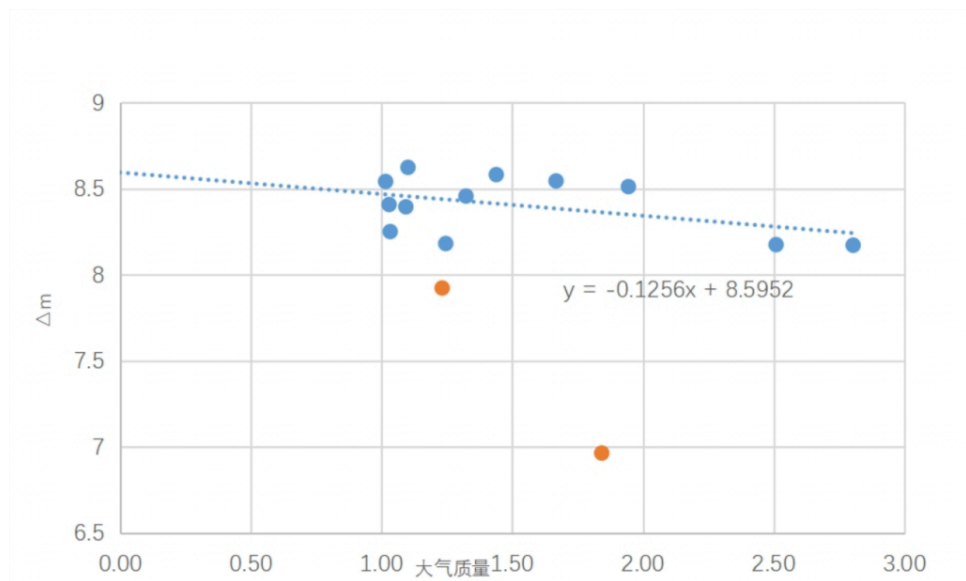
#### 17. 【解析】

- (1)



- (2) 否.
- (3) 计算恒星在大气外的星等需要考虑大气消光:  $m_i = -2.5 \lg F$ ,  $m_i = m_v + kA + C$ , 其中  $F$  为恒星的流量,  $m_i$  是恒星的仪器星等. 恒星在大气外的星等为  $m_v$ , 受到的大气消光值正比于大气质量  $A$ , 其系数就是大气消光系数  $k$ . 除此之外, 还有常数项  $C$ . 令  $m = m_v - m_i$ :  $\Delta m = -kA - C$ , 其中恒星的  $m_i$  和  $m_v$  均已知, 所以  $k$  和  $C$  可由线性拟合得知. 计算所有恒星的  $m_i$  和  $m$ , 并绘制在坐标系中.

名称	$m_i$	$m$
天狼	-8.41	6.97
南河三	-7.52	7.92
参宿四	-7.52	8.18
北河三	-7.09	8.25
弧矢七	-6.67	8.17
北河二	-6.96	8.54
参宿五	-6.82	8.46
五车五	-6.75	8.40
弧矢一	-6.35	8.18
井宿三	-6.69	8.62
军市一	-6.53	8.51
参宿六	-6.48	8.55
参宿三	-6.33	8.58
五车四	-5.76	8.41



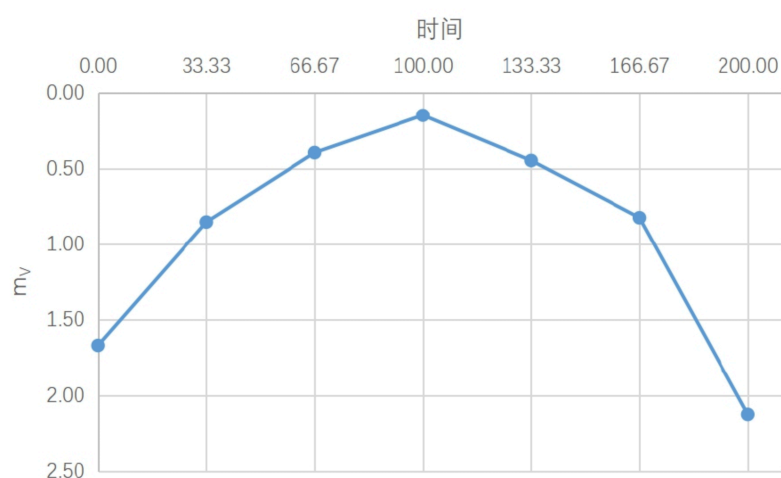
图中有两个明显偏离的点，这两个点对应天狼星和南河三。最亮的两颗星的  $m$  明显偏低，说明其流量有较大的低估，可能是由部分像素过曝导致的。因此在线性拟合时将这两个点排除。拟合结果为： $k = 0.1256$ ， $C = -8.5952$ ， $k$  即为待求的消光系数。

(4) 根据上一问中的公式可以计算出流星在各个时间点的星等。



时间/ms	$m_i$	$m_V$
0.0	-6.80	1.67
33.3	-7.62	0.85
66.7	-8.07	0.40
100.0	-8.32	0.15
133.3	-8.02	0.45
166.7	-7.64	0.82
200.0	-6.34	2.13

光变曲线图：



- (5) 根据星等差公式，可以得到流星的绝对星等公式： $M = m - 5 \lg \frac{r}{100 \text{ km}}$ 。与太阳常数相比，可以获得流星的光度。计算流星在 1 AU 处的星等： $M_{1 \text{ AU}} = M - 5 \lg \frac{100 \text{ km}}{1 \text{ AU}}$ 。与太阳光度相比： $M_{1 \text{ AU}} - M_{\odot} = -2.5 \lg \frac{L_{\text{met}}}{L_{\odot}}$ ，相减并整理可得：

$$M_{\odot} = M - 5 \lg \frac{100 \text{ km}}{1 \text{ AU}} + 2.5 \lg \frac{L_{\text{met}}}{L_{\odot}}. \quad (1)$$

$$L_{\text{met}} = 10^{[M_{\odot} - M + 5 \lg(100 \text{ km}/1 \text{ AU})]/2.5} L_{\odot}. \quad (2)$$

使用给出的流星距离计算绝对星等和光度。

时间/ms	$M$	$L_{\text{met}}/\text{W}$
0.0	1.55	832
33.3	0.77	1709
66.7	0.34	2522
100.0	0.13	3070
133.3	0.46	2257
166.7	0.87	1548
200.0	2.20	455

每帧时间 0.0333 秒，乘以光度并求和可得 413 J. 流星体的总动能为  $413/0.5 = 826$  J.

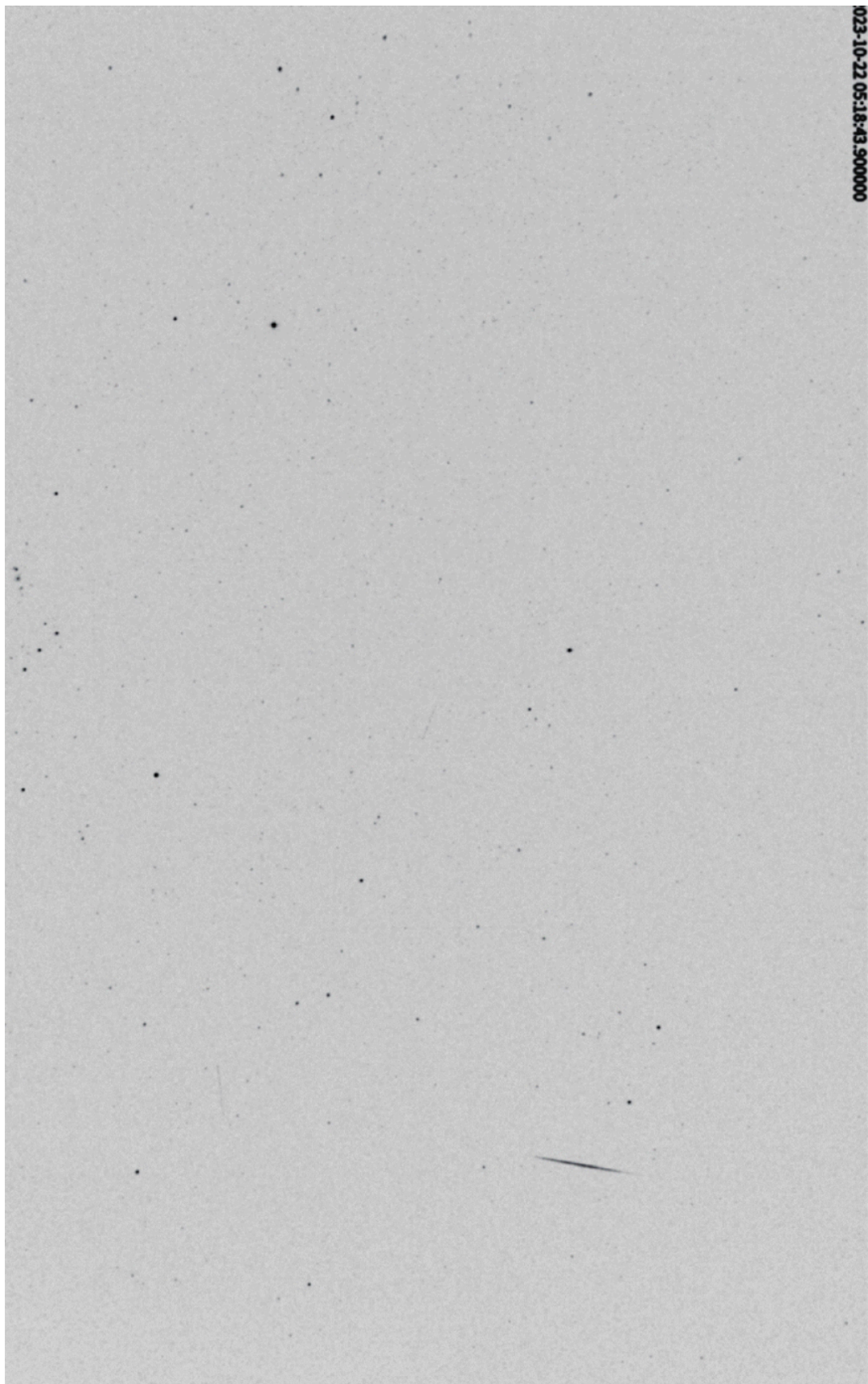


图 4: 流星视频叠加图