

第4周 高能天体和宇宙学

一、选择题

(一) 红移, 消光与红化

1. 遥远天体发出的电磁辐射由于宇宙自身膨胀而频率降低、波长变长, 表现为光谱的谱线朝红端 (波长更长方向) 移动了一段距离, 该现象称为宇宙学红移。请问在可见光的 g 波段 (波长范围 400~550nm), 我们可以探测到红移为 3 的年轻星系产生的哪条谱线 (不考虑相对论效应)? 【2025 年预赛 25】

- (A) Ly α (121.6nm) (B) MgII(279.8nm)
(C) [OII](372.7nm) (D) H β (486.8nm)

【答案解析】A 观测波长 λ_{obs} 与静止波长 λ_0 的关系为 $\lambda_{obs} = \lambda_0(1+z)$ 。已知 $z = 3$, 则 $\lambda_{obs} = 4\lambda_0$ 。选项中只有 A: $\lambda_0 = 121.6\text{nm}$ 时, $\lambda_{obs} = 4\lambda_0$ 的值落在 400~550nm 的范围内。

2. 视向速度为 1000 km/s 的超高速恒星对应的红移/蓝移是多少? 【2023 年预赛 31】

- (A) 3 (B) 0.3 (C) 0.03 (D) 0.003

【答案解析】D 速度较低时, 不考虑相对论效应, $z = \frac{v}{c}$,

$v = 1000\text{km/s}$, $c \approx 3 \times 10^5\text{km/s}$, 即

$z = 1000/300000 \approx 0.0033$ 。

3. 退行速度为 150000 km/s 的遥远星系对应的红移/蓝移是多少? (提示: 是否要考虑相对论效应?) 【自命题】

- (A) 0.53 (B) 0.73 (C) 0.93 (D) 1.13

【答案解析】B 速度较高时 (通常为 $v > 0.1c$) 时, 必须考虑相对论效

应: $1+z = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}$ 。 $1+z = \sqrt{\frac{1.5}{0.5}} = \sqrt{3} \approx 1.732$, 故

$z \approx 0.73$ 。

4. 在恒星光谱中, 显示出波长等于 422.7nm 的钙线向光谱的紫端移动了

0.07nm。此恒星沿视线方向的运动速度为 () 千米/秒。【2003 年预赛 32 题】

- (A) 25 (B) 50 (C) 70 (D) 600

【答案解析】 B

$$v = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 3 \times 10^5 \times \frac{0.07}{422.7} \approx 49.68\text{km/s} \approx 50\text{km/s}。$$

5. 无论是在美丽的夏季星空照片中，还是到极黑暗的地方用肉眼观察，我们都能看到一些暗色的条带穿插在明亮的银河之中。造成银河上出现这些暗色条带或者区域的原因是 ()。

- (A) 暗色的地方恒星比较少 (B) 星际物质消光
(C) 银心黑洞吞噬光线 (D) 地球大气消光

【答案解析】 B 银河系盘面分布着大量的星际尘埃，它们会吸收和散射背后的星光，产生暗条带（如著名的“大裂缝”），这种现象称为星际消光。

(二) 宇宙微波背景辐射，哈勃定律与宇宙膨胀

1. 第一个建立了热大爆炸宇宙学模型的科学家是 () 【2022 年预赛 26】

- (A) 伽莫夫 (B) 爱因斯坦 (C) 哈勃 (D) 奥本海默

【答案解析】 A 乔治·伽莫夫在 20 世纪 40 年代提出了大爆炸理论，并预言了宇宙微波背景辐射的存在。

2. 在红移 $z=1$ 时宇宙的尺度因子是现在的 ()。【2022 年预赛 32】

- (A) 10 倍 (B) 十分之一 (C) 一半 (D) 2 倍

【答案解析】 C 尺度因子 R 与红移 z 的关系为 $R = \frac{1}{1+z}$ 。当 $z = 1$ 时， $R = 1/(1+1) = 1/2$ 。

3. 假设宇宙匀速膨胀，已知今天的哈勃常数 $H_0=70 \text{ km/s/Mpc}$ ，请问宇宙的年龄大约为？【2023 年预赛 28】

- (A) 1 亿年 (B) 10 亿年 (C) 100 亿年 (D) 1000 亿年

【答案解析】 C 宇宙年龄 $t \approx \frac{1}{H_0}$ 。注意单位换算， $1\text{Mpc} \approx 3.08 \times 10^{19}\text{km}$ 。 $t = \frac{3.08 \times 10^{19}}{70}\text{s} \approx 4.4 \times 10^{17}\text{s}$ 。一年约为 $3.15 \times 10^7\text{s}$ ，故 $t \approx 140$ 亿年，最接近 C。(注：此题也可以根据知识积累做)

4. 下列哪个选项不是大爆炸宇宙学理论的证据？（ ）【2020 年预赛 22】

- (A) 哈勃定律 (B) 暴胀理论
(C) 轻元素的比例 (D) 宇宙微波背景辐射

【答案解析】B 大爆炸的三大支柱是：哈勃定律（膨胀）、CMB（余热）、轻元素丰度（核合成）。暴胀理论是用于解决平坦性等问题的模型补充，而非直接观测证据。

5. 宇宙微波背景辐射的谱线轮廓形状是（ ）。

- (A) 幂律谱 (B) 抛物线 (C) 正弦曲线 (D) 黑体谱

【答案解析】D 宇宙微波背景辐射是宇宙早期处于热平衡态的遗迹，是目前自然界中测得的最完美的黑体谱。

(三) 高能天体

1. 位于银河系中心的超大黑洞质量大约是太阳的（ ）倍。【2014 年预赛 16】

- (A) 400 (B) 4 万 (C) 400 万 (D) 4 亿

【答案解析】C

2. 首先提出“黑洞蒸发”理论的天文学家是（ ）。【2018 年预赛 21】

- (A) 爱因斯坦 (B) 爱丁顿 (C) 钱德拉塞卡 (D) 霍金

【答案解析】D

3. 日前我国的硬 X 射线调制望远镜（慧眼卫星，HXMT）首次认证了快速射电暴 FRB200428 的高能对应体，证明了该快速射电暴来源于（ ）。【2022 年预赛 14】

- (A) 地外文明 (B) 黑洞吸积辐射
(C) 高度磁化中子星 (D) 激变双星

【答案解析】C 2020 年，科学家观测到银河系内磁星 SGR 1935+2154 爆发了 X 射线，并关联到了快速射电暴，证实了其起源。

4. 已知银河系中心黑洞质量大约为 400 万倍太阳质量 M_{\odot} ，距离太阳系有 26000 光年，G 为引力常数，c 为光速，这个黑洞的史瓦西半径是（ ）。

【2024 年预赛 9】

- (A) $1.54 \times 10^2 GM_{\odot} / c$
(B) $1.54 \times 10^2 GM_{\odot} / c^2$
(C) $8 \times 10^6 GM_{\odot} / c^2$
(D) $4 \times 10^6 GM_{\odot} / c$

【答案解析】C 史瓦西半径公式 $R_s = \frac{2GM}{c^2}$ 。题目问 R_s 与 M 的关系。

若 $M = 4 \times 10^6 M_\odot$ ，则

$$R_s = 2 \times \frac{G(4 \times 10^6 M_\odot)}{c^2} = 8 \times 10^6 \frac{GM_\odot}{c^2}。$$

5. 宇宙线是来自外太空的高能次原子粒子的总称，其最主要的成分是（ ）。

【2025 年预赛 21】

(A) 电子 (B) 中子 (C) 质子 (D) 中微子

【答案解析】C 宇宙线中约 90% 是质子（氢原子核），约 9% 是 α 粒子（氦核）。

6. 在 2021 年的美国电影《不要抬头》(Don't look up) 中，主人公研究已耗尽气体的宁静星系中超新星时发现了一颗要撞击地球的彗星。考虑各种类型超新星的前身星，在这类星系中最常发现的超新星是（ ）。【2022 年预赛

35】

(A) II 型超新星 (B) Ia 型超新星 (C) Ib 型超新星 (D) Ic 型超新星

【答案解析】B 宁静星系缺乏恒星形成活动，没有大质量短寿命的恒星。Ia 型超新星起源于双系统中的白矮星吸积，不需要年轻大质量恒星。

7. 哪种类型的超新星可以作为测量星系距离的标准烛光？（ ）【2017 年预赛 30】

(A) Ia (B) Ib (C) Ic (D) II

【答案解析】A Ia 型超新星具有高度一致的峰值绝对星等，被誉为“标准烛光”。

8. 超新星爆发后光度会缓慢下降，这个过程中光度能量的主要来源是（ ）。

【2017 年预赛 33】

(A) 核裂变 (B) 核聚变

(C) 放射性元素衰变 (D) 周围物质散射超新星爆发时的光

【答案解析】C 超新星爆发后的光变曲线主要由合成的放射性同位素（如 $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ ）衰变释放的能量维持。

9. 人类最近一次观测到银河系内的超新星爆发是在（ ）年。【2018 年预赛 15】

(A) 1054 (B) 1604 (C) 1987 (D) 2018

【答案解析】B 1604 年的开普勒超新星 (SN 1604) 是银河系内最后一次肉眼可见的爆发。1987A 位于大麦哲伦云（银河系卫星星系，非银河系内）。

(四) 暗物质与暗能量

1. 在标准宇宙学模型 (Λ CDM) 中, 暗能量 (Dark Energy) 的主要物理效应是 ()。【自命题】
 - (A) 提供额外的引力, 帮助维系星系团的稳定
 - (B) 产生排斥力, 导致宇宙加速膨胀
 - (C) 作为宇宙早期的“种子”, 促使结构形成
 - (D) 通过电磁相互作用加热星系际介质

【答案解析】 B 暗能量具有负压强, 在宇宙尺度上表现为斥力, 导致宇宙在近 60 亿年来加速膨胀。

2. 在目前的宇宙总质能构成中, 普通物质 (重子物质)、暗物质和暗能量的占比排序正确的是 ()。【自命题】
 - (A) 暗能量 > 暗物质 > 普通物质
 - (B) 暗物质 > 暗能量 > 普通物质
 - (C) 普通物质 > 暗物质 > 暗能量
 - (D) 三者比例大约相等

【答案解析】 A 根据普朗克卫星观测: 暗能量 $\sim 68\%$, 暗物质 $\sim 27\%$, 普通物质 $\sim 5\%$ 。

3. 20 世纪 70 年代, 天文学家薇拉·鲁宾 (Vera Rubin) 通过观测旋涡星系的 (), 为暗物质的存在提供了决定性的证据【自命题】
 - (A) 恒星光谱红移
 - (B) 核心黑洞质量
 - (C) 星系转动曲线
 - (D) 超新星爆发频次

【答案解析】 C 鲁宾发现星系外围的恒星旋转速度并没有随距离增加而下降, 而是保持“平坦”, 暗示存在看不见的质量。

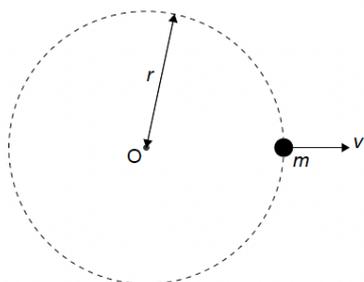
4. “宇宙常数”通常被用作解释暗能量的最简单模型, 它最初是由哪位科学家为了维持“静态宇宙”而提出的?【自命题】
 - (A) 爱因斯坦
 - (B) 弗里德曼
 - (C) 哈勃
 - (D) 勒梅特

【答案解析】 A 爱因斯坦最初为了抵消引力以维持一个静态的宇宙模型, 在方程中加入了 Λ (宇宙常数)。

二、 计算题

【IB 物理 HL 2023 Nov Paper 3 第 20 题】

宇宙可以被看作充满了密度均匀的尘埃。一个质量为 m 的粒子，在距离中心点 O 为 r 处时，其速度为 $v = H_0 r$ （其中 H_0 为哈勃常数）。假设只有半径为 r 的球体内部的质量会对该粒子产生引力作用。



(a)(i)证明：如果要求该粒子恰好能够到达无穷远处（即脱离引力束缚），宇宙的密度 ρ 必须满足：

$$\rho = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

(ii)使用 $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 估算该密度值。

(b)在包含暗能量的宇宙模型中，描述临界密度的意义。

(a)(i) 证明过程：

粒子的能量守恒。在距离 r 处，粒子的总能 $E = K + U$ 。

- 动能 $K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(H_0 r)^2$
- 势能 $U = -\frac{GMm}{r}$ ，其中 $M = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$
- 代入 M ： $U = -\frac{G(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho)m}{r} = -\frac{4\pi G \rho m r^2}{3}$

若粒子恰好到达无穷远，则在无穷远处速度为 0，总能 $E \geq 0$ 。临界状态 $E = 0$ ：

$$\frac{1}{2}mH_0^2 r^2 = \frac{4\pi G \rho m r^2}{3}$$

消去 m 和 r^2 ，解得：

$$\rho = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

(a)(ii) 估算值:

已知 $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc} \approx 2.27 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。

$$\rho_c = \frac{3 \times (2.27 \times 10^{-18})^2}{8 \times \pi \times 6.67 \times 10^{-11}} \approx 9.2 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

(约每立方米 5 个氢原子)。

(b) 描述临界密度的意义:

临界密度是决定宇宙几何形状和最终命运的阈值。

- 若实际物质密度 $\rho > \rho_c$, 宇宙闭合;
- 但在包含暗能量的模型中, 即使 $\rho < \rho_c$, 宇宙也会因为暗能量的排斥作用而永久加速膨胀, 不会发生大挤压。

【IB 物理 HL 2023 May Paper 3 第 18 题】

(a) 证明: 当红移 $z = 1.74$ 时, 宇宙当时的尺寸与现在尺寸的比值为 0.365。

(b) (i) 证明: 宇宙微波背景 (CMB) 辐射的温度 T 与尺度因子 R 成反比。

(b) (ii) 已测得该星际云处的 CMB 温度为 7.4K。计算 CMB 目前的温度值。

(a) 证明过程:

利用尺度因子与红移的关系: $\frac{R_{then}}{R_{now}} = \frac{1}{1+z}$

已知 $z = 1.74$:

$$\text{Ratio} = \frac{1}{1 + 1.74} = \frac{1}{2.74} \approx 0.365$$

(b)(i) 证明过程:

宇宙膨胀导致光子的波长随尺度因子成正比拉伸, 即 $\lambda \propto R$ 。

根据维恩位移定律, 黑体辐射的波长与温度成反比: $\lambda_{max} T = \text{const.}$ 。

因此, $R \propto \frac{1}{T}$, 即 $T \propto \frac{1}{R}$ 。

(b)(ii) 计算当前温度:

利用 $T_{then} \cdot R_{then} = T_{now} \cdot R_{now}$ 。

已知当时温度 $T = 7.4\text{K}$, 当时尺度因子占比为 0.365:

$$7.4 \times 0.365 = T_{now} \times 1$$

$$T_{now} \approx 2.7\text{K}$$

(此即目前测得的 CMB 宇宙背景辐射标准温度)。