

1 高年组简答题：疲倦的光子

在大爆炸模型提出的早期，有人为了反对大爆炸模型同时解释哈勃定律，提出了“疲倦的光子”假说。该假说认为宇宙是静态的，而光子会随着自己在宇宙中穿梭而失去能量。单位距离内损失的能量由下式表达：

$$\frac{dE}{dr} = -kE$$

其中 k 为一常数， E 为光子的能量。

请证明当 $z \ll 1$ ，上述假说会给出一个线性的红移-距离关系（即哈勃定律），并求出满足这个条件的 k 。

1.1 参考答案

解微分方程，有：

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dr} &= -kE \\ \frac{dE}{E} &= -kdr \\ \int_{E_0}^E \frac{dE}{E} &= -k \int_0^r dr \\ \ln \frac{E}{E_0} &= -kr \\ E(r) &= E_0 e^{-kr}\end{aligned}$$

其中 E_0 为光子初始的能量， r 是光子走过的距离。

红移和能量也有关系：

$$\begin{aligned}z &= \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\frac{hc}{E} - \frac{hc}{E_0}}{\frac{hc}{E_0}} \\ &= \frac{\frac{1}{E} - \frac{1}{E_0}}{\frac{1}{E_0}} \\ &= E_0 \cdot \frac{E_0 - E}{EE_0} \\ &= \frac{E_0 - E}{E}\end{aligned}$$

带入能量的表达式，有：

$$\begin{aligned} z &= \frac{E_0 - E_0 e^{-kr}}{E_0 e^{-kr}} \\ &= e^{kr} (1 - e^{-kr}) \\ &= e^{kr} - 1 \end{aligned}$$

当 $z \ll 1$ ，即 $kr \ll 1$ 时，有

$$z \approx kr$$

同时带入多普勒效应 ($v = cz$)

$$\begin{aligned} cz &= H_0 r \\ ckr &= H_0 r \\ k &= \frac{H_0}{c} = 2.267 \cdot 10^{-4} \text{Mpc}^{-1} \end{aligned}$$

2 普通单选题：第四宇宙速度

定义第四宇宙速度为从地球发射的卫星逃逸银河系的速度，请求出第四宇宙速度的数值，（不切实际的）假设银河系物质全部集中在银河系中心。

取银河系质量为 $M_{Gal} = 1 \cdot 10^{12} M_{Sun}$ ，太阳距离银心距离为 $R_{Gal} = 8.3$ kpc

- A. 493.927 km/s
- B. 510.628 km/s
- C. 298.681 km/s
- D. 298.216 km/s

2.1 参考答案

为了求出第四宇宙速度，先求出第三宇宙速度，地球轨道处逃逸太阳的速度为

$$v = \sqrt{\frac{2GM_s}{R}} = 42.127 \text{ km/s}$$

考虑到卫星在逃逸的过程中，卫星会获得地球绕转太阳的轨道速度，故在脱离地球引力后，逃离太阳引力所需的速度为

$$v'_{esc} = \sqrt{\frac{2GM_s}{R}} - \sqrt{\frac{GM_s}{R}} = (\sqrt{2} - 1) \sqrt{\frac{GM_s}{R}} = 12.339 \text{ km/s}$$

设此时探测器的动能为 E_f ，为了逃离地球，探测器需要达到第二宇宙速度，记探测器逃离地球所需的动能为 E_2 ，那么探测器从地球出发，逃离太阳需要的总动能为

$$E_3 = E_f + E_2$$

三者的速度则有如下关系

$$v_3^2 = v'_{esc}^2 + v_2^2$$

其中 v_3 为第三宇宙速度， v_2 为第二宇宙速度， $v_2 = 11.187 \text{ km/s}$ ，因此第三宇宙速度为

$$v_3 = \sqrt{v'_{esc}^2 + v_2^2} = 16.655 \text{ km/s}$$

同理我们可以求出第四宇宙速度，考虑到太阳绕转银河系带来的速度后，银河系边缘的逃逸速度为

$$v_{esc} = (\sqrt{2} - 1) \sqrt{\frac{GM_{gal}}{R_{gal}}} = 298.216 \text{ km/s}$$

因此第四宇宙速度为

$$v_4 = \sqrt{v_{esc}^2 + v_3^2} = 298.681 \text{ km/s}$$

答案为C。

3 低年组单选题：太阳还是黑洞

如果太阳突然被一个质量相同的黑洞替代，地球的轨道会如何的变化？

- A. 什么都不会发生
- B. 地球会立刻飞出太阳系
- C. 地球会被立刻吸入黑洞
- D. 地球的轨道会变成一个离心率更大的椭圆

3.1 参考答案

牛顿万有引力定律给出

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

其中 M 为中央天体质量，题中说明该质量不变，因此地球受黑洞的引力和受太阳的引力相同，故地球的轨道不会变化。

答案是A。

4 高年组单选：核聚变

已知恒星的能源来自于核聚变，假设氢原子的动能全部由热运动提供，估算经典条件下发生核聚变的最低温度，假设两个氢原子发生聚变时最近距离为 $r = 10^{-15}$ m。

- A. 10^8 K
- B. 10^9 K
- C. 10^{10} K
- D. 10^{11} K

4.1 参考答案

气体热运动的平均动能为

$$K = \frac{3}{2}k_B T$$

聚变过程中，氢原子需要克服库仑力势能从而发生聚变，由于库伦力和引力均为平方反比力，其势能形式应该相同。

$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r}$$

其中 Q 为氢原子的电荷， $Q = e$ 为基本电荷，如果聚变要发生，动能必须大于势能，否者两原子无法接近彼此，因此边界条件为

$$\frac{3}{2}k_B T_{min} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = 0$$

解出 T_{min} ，有

$$T_{min} = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{k_B r} \approx 10^{10} \text{ K}$$

答案是C。

可以发现经典条件下聚变所发生的最低温度远大于太阳核心温度，经典理论在此处失效了。量子隧穿效应可以解释为何太阳核心会发生核聚变，在量子隧穿效应中，一个原子有可能穿过库伦势能构造的势能壁垒，故所需的动能相比经典理论中会大大降低。

5 高年组单选：距离

通过哈勃定律和多普勒效应，估算 $z = 1$ 处的距离

- A. 4282 Mpc
- B. 2569 Mpc
- C. 7138 Mpc
- D. 退行速度为光速，没有对应的物理背景，该问题无意义

5.1 参考答案

首先该问题肯定是有意义的，宇宙星体的退行速度是可以超过光速的，因为超光速运动的是膨胀的宇宙，而不是星体，这个假设不违反相对论的基本假设，即物体运动速度不能超过光速。

求这个问题需要引入相对论修正后的红移与速度的关系：

$$1 + z = \sqrt{\frac{c + v}{c - v}}$$

解 v ，有

$$v = \frac{(1 + z)^2 - 1}{(1 + z)^2 + 1} c$$

带入 $z = 1$ ，有

$$v = \frac{2^2 - 1}{2^2 + 1} c = \frac{3}{5} c$$

求出退行速度后，带入哈勃定律

$$d = \frac{v}{H_0} = \frac{3}{5} \frac{c}{H_0} = 2569 \text{ Mpc}$$

答案是B

6 普通简答题：太阳核心

假设太阳保持流体静力平衡，并且太阳核心是理想气体，估算

1. 太阳核心的压强
2. 太阳核心的粒子数密度
3. 太阳核心的粒子数密度与地球大气粒子数密度的比

太阳核心温度为 $T_c = 10^7$ K。

提示：流体静力平衡方程为：

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

等式左端本质上这是一个导数（可以理解为斜率），但是在粗略近似（意味着你可以忽略掉某些系数）情况下，取 $dP \approx P_c - P_s$ 为太阳核心压力与表面压力的差， $dr \approx r_c - r_s$ 为太阳核心半径与表面半径的差，取 M 为恒星的质量， ρ 为恒星的平均密度

如果你不会，考虑从量纲方面下手，压力与引力常数 G ，恒星质量 M 和恒星半径 R 相关

6.1 参考答案

1. 注意到 $P_s = 0$ 且 $r_c = 0$ (恒星的压力由引力提供, 恒星表面没有物质, 因此没有压力) 于是, 有

$$\frac{P_s}{-R} \approx -\frac{GM\rho}{R^2}$$

带入密度的定义, 有

$$\frac{P_s}{R} \approx \frac{GM}{R^2} \cdot \frac{M}{4/3\pi R^3}$$

化简得出

$$P_c \approx \frac{GM^2}{R^4} = 1.135 \cdot 10^{15} \text{ Pa}$$

这里的系被忽略掉了 (导数都被近似成了斜率还留着系数干啥), 提示中说了忽略系数, 因此系数必须忽略掉, 用量纲的角度就会直接得到这个式子。

2. 根据理想气体方程

$$PV = Nk_B T$$

数密度定义为 $n = \frac{N}{V}$, 为单位体积内粒子的数量, 可以得出:

$$n = \frac{P}{k_B T} = 8.221 \cdot 10^{30} / m^3$$

3. 假设地球大气为理想气体 地球大气压 $P_E = 10^5 \text{ Pa}$, 地球大气温度取 $T_E = 300 \text{ K}$, 根据理想气体方程

$$n_E v = \frac{P_E}{k_B T_E} = 2.414 \cdot 10^{25} / m^3$$

两个数密度相比, 有:

$$\frac{n}{n_E} = 340555$$

7 普通简答题：变轨

考虑一颗卫星，在一个椭圆轨道上绕地球公转，半长轴 $a_1 = 15000\text{km}$ ，偏心率 $e_1 = 0.2$ （称其为旧轨道）。卫星需要变轨到一个新的椭圆轨道，半长轴为 $a_2 = 25000\text{km}$ ，偏心率为 $e_2 = 0.4$ （称其为新轨道），两轨道共面。

已知第一次变轨位于旧轨道的近日点，第二次变轨位于新轨道的半短轴处，请求出两次变轨需要的速度增量，以及速度增量与速度矢量的夹角

提示：变轨时速度矢量不一定共线

7.1 参考答案

假设变轨时，卫星的轨道也为椭圆，我们可以通过这个求出变轨轨道的极坐标方程。

设变轨轨道的极坐标方程为

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}$$

这个轨道近日点与旧轨道近日点重合，即

$$\frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos 0} = a_1(1 - e_1) = 12000 \text{ km}$$

该轨道的另外一点位于新轨道的半短轴处，我们需要先求出来第二次变轨瞬间的卫星的极坐标。

位于椭圆半短轴处的点距离椭圆焦点的距离是椭圆的半长轴，因此 $r_2 = a_2 = 25000\text{km}$ ，此时其极角的余弦值为

$$\cos \theta_2 = \frac{1}{e_2} \frac{a_2(1 - e_2^2)}{r_2} - 1 = -\frac{2}{5}$$

因此得出第二个关于变轨轨道的方程

$$r_2 = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta_2} = 25000 \text{ km}$$

联立两方程，有

$$\begin{cases} \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos 0} = a_1(1 - e_1) = 12000 \text{ km} \\ r_2 = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta_2} = 25000 \text{ km} \end{cases}$$

解出

$$\begin{cases} a = 29333 \text{ km} \\ e = 0.591 \end{cases}$$

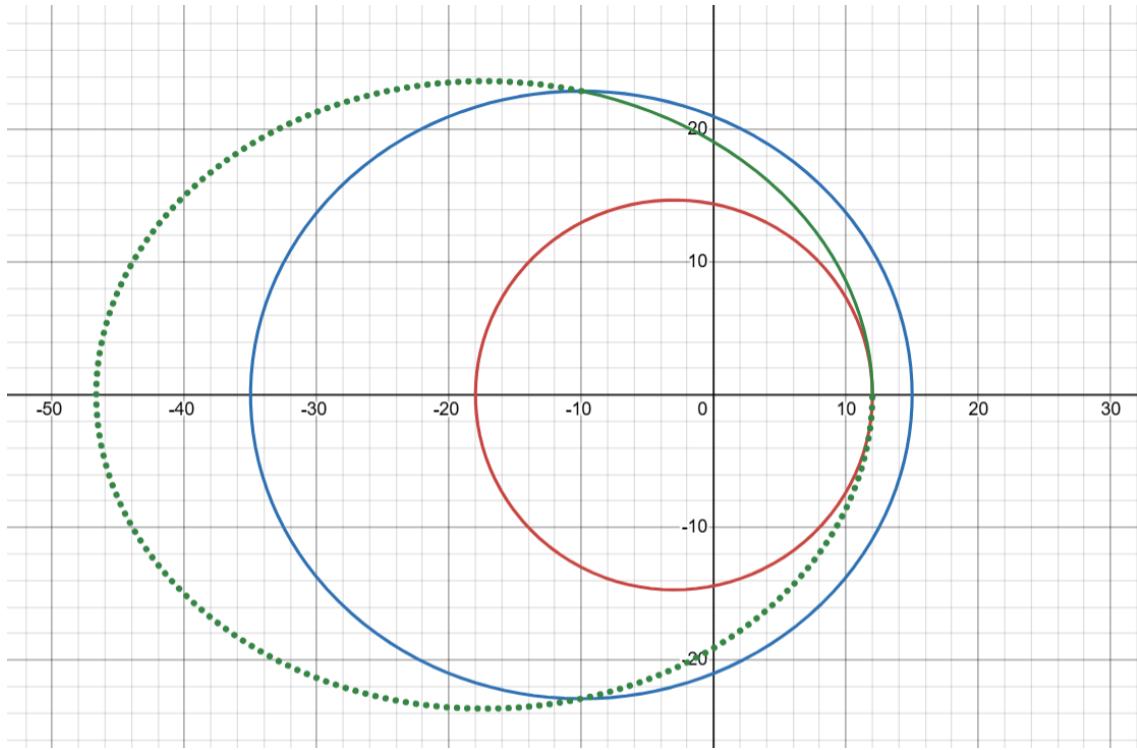


图 1: 变轨示意图

上图是变轨示意图，红色的是旧轨道，蓝色的是新轨道，实线绿色的是卫星实际上走过的变轨轨道，虚线绿色是卫星完整的变轨轨道

根据活力公式可以解出第一次变轨所需的速度

$$v_1 = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r_1} - \frac{1}{a_1} \right)} = 6314.02 \text{ m/s}$$

$$v_{peri} = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r_1} - \frac{1}{a} \right)} = 7270.050 \text{ m/s}$$

速度增量为

$$\Delta v_1 = v_{peri} - v_1 = 956.030 \text{ m/s}$$

此时速度矢量共线，故速度增量与速度矢量的夹角为0

同样可以求出第二次变轨所需的速度，但是需要注意到这次变轨时，速度矢量并不重合

$$v_2 = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r_2} - \frac{1}{a_2} \right)} = 3993.337 \text{ m/s}$$

$$v = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r_2} - \frac{1}{a} \right)} = 4378.125 \text{ m/s}$$

现在需要求出来两个速度矢量的夹角，最直观的想法当然是通过求导求出来夹角的大小，但是我们可以用角动量守恒来处理（及开普勒第二定律）

$$L = mv_{peri}r_1 = mvr_2 \sin \alpha$$

其中 α 是第二次变轨前速度矢量和位置矢量的夹角，因此可以解出 α

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{v_{peri}}{v} \cdot \frac{r_1}{r_2}\right) = 52.850^\circ$$

因此速度矢量和位置矢量的夹角为

$$\beta = \pi - \alpha = 127.15^\circ$$

两个速度矢量的夹角为

$$\gamma = \beta - \frac{\pi}{2} = 37.15^\circ$$

根据余弦定理，变轨所需的速度为

$$\Delta v_2 = \sqrt{v^2 + v_2^2 - 2vv_2 \cos \gamma} = 2691.522 \text{ m/s}$$

考虑到卫星在此处需要减速， $\Delta v = -2691.522 \text{ m/s}$ 与 v 的夹角为

$$\sin i = \frac{v_2}{\Delta v} \sin \gamma$$

解出 $i = 63.637^\circ$