

GRADUS

物理 III

循迹而上 · 拾级登顶

寻迹 · 梦叶子 编著

目录

0.1	分子动理论：三句话看微观	1
0.2	气体压强的微观解释：分子在“敲门”	2
0.3	气体三定律的图像与 p-V 图	3
0.4	内能：分子动能与分子势能之和	6
0.5	热力学第一定律：能量守恒在热学	7
0.6	热力学第二定律：热量不会自动倒流	8
0.7	光的反射与折射：斯涅尔定律	10
0.8	光的波动性：干涉、衍射、偏振	11
0.9	光速与电磁波谱：光也是电磁波	12
0.10	光电效应：光是一份一份的	15
0.11	光的波粒二象性与物质波	16
0.12	原子结构：从汤姆孙到玻尔	16
0.13	原子核：衰变、核反应、质能方程	17
0.14	狭义相对论的两个前提	20
0.15	质能方程：质量就是能量	21
0.16	激光：受激辐射的光放大	23
0.17	LED 与能级：量子化的光	24
0.18	太阳能电池：光电效应的逆过程	24
0.19	光纤通信：全反射的现代版	24
0.20	核电站：可控链式反应	25
0.21	医学影像：X 光、CT 与核医学	25
0.22	GPS 与相对论：每天 38 微秒的修正	25
0.23	量子计算与量子通信：下一个时代	25
0.24	热机与能源：效率的边界	26
0.25	太空望远镜与宇宙学：看见 138 亿年	26

0.1 分子动理论：三句话看微观

考点精要

- Q1 分子动理论是哪三句话？为什么说它是“三句话看微观”？

A (1) 物质由大量分子组成 (1 mol 任何物质约含 6.02×10^{23} 个分子，即阿伏伽德罗常数 $N_a = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)；(2) 分子永不停息地做无规则热运动 (布朗运动是证据)；(3) 分子间同时存在引力和斥力 ($r = r_0$ 时平衡， $r < r_0$ 斥力主导， $r > r_0$ 引力主导， $r > 10r_0$ 几乎为零)。

- Q2 布朗运动是“分子在动”还是“颗粒在动”？它证明了什么？

A 布朗运动是悬浮在液体中的花粉颗粒被周围水分子撞击而做的无规则运动——是**颗粒**在动，不是分子在动；但它**间接证明了**水分子永不停息地做无规则热运动。温度越高，颗粒越小，布朗运动越明显。

- Q3 温度到底是什么？为什么说“温度相同，平均动能就相同，与分子种类无关”？

A 温度是分子平均动能的度量： $\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$ (k 为玻尔兹曼常数)。温度相同 $\rightarrow$ 平均动能相同；但不同分子质量不同，所以平均速率不同 (轻的快、重的慢)。

- Q4 分子数问题怎么算？“摩尔汇率”是什么？

A 三步： $n = m/M$ (或 $n = V/V_m$)， $N = n \cdot N_a$ ，单个分子质量 $m_0 = M/N_a$ 。总质量 $\div$ 单个分子质量 = 分子数。阿伏伽德罗常数 + 摩尔质量就是宏观量与微观量之间的“汇率”。

例题 1.1

1 mol 水 (18 g) 中有多少个水分子？每个水分子的质量约多大？($N_a = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

A 层 · 基础过关

A1. 估算 1 cm^3 水中含有的水分子数。(水的密度取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，摩尔质量 18 g/mol)

A2. 判断下列说法是否正确，并说明理由：

- (1) 布朗运动就是水分子的运动；
- (2) 液体温度越高，布朗运动越明显；
- (3) 分子的无规则热运动只有在显微镜下才能观察。

A3. 关于分子间作用力，下列说法正确的是 ()

- A. 当分子间距离 $r = r_0$ 时，分子间既无引力也无斥力
- B. 当 $r < r_0$ 时，分子间只存在斥力，不存在引力
- C. 当 $r > r_0$ 时，分子间作用力表现为引力，且随 r 增大先增大后减小到几乎为零
- D. 当 $r > 10r_0$ 时，分子间引力仍很强，不能忽略

0.2 气体压强的微观解释：分子在“敲门”

考点精要

- Q5 气体压强是怎么产生的？影响压强的两个微观因素是什么？

A 大量分子对器壁频繁碰撞的平均效果就是压强。两个因素：(1) 分子数密度越大（越“挤”，碰撞次数越多）；(2) 分子平均动能越大（越“猛”，每次碰撞越有力）。宏观规律：等温压缩 p 增大（数密度增大），等容升温 p 增大（平均动能增大）。

- Q6 理想气体状态方程是什么？三个特例分别对应什么定律？

A $pV = nRT$ (n 物质的量, $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)；一定质量气体 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ 。三特例：等温 $\rightarrow$ 玻意耳定律 $pV = \text{常数}$ ；等容 $\rightarrow$ 查理定律 $p/T = \text{常数}$ ；等压 $\rightarrow$ 盖-吕萨克定律 $V/T = \text{常数}$ 。

- Q7 用气体定律解题的第一步是什么？为什么？

A 第一步永远是：把摄氏温度换成开尔文温标 ($T = t + 273$)。因为定律中的 T 是热力学温度，直接代入 $^{\circ}\text{C}$ 是热学题第一大失分点。

例题 1.2

夜间 17°C 时汽车轮胎胎压为 2.9 个标准大气压，胎内气体体积、质量不变。次日中午 27°C ，胎压为多少？

A 层 · 基础过关

A4. 一定质量的气体在温度不变时体积从 2.0 L 等温膨胀到 4.0 L，初态压强为 $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，求末态压强。

A5. 密闭容器内的气体在 0°C 时压强为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，体积不变，升温到 100°C 时压强为多大？

A6. 一定质量的气体在 0°C 时体积为 1.0 L，压强不变，升温到 100°C 时体积为多大？

0.3 气体三定律的图像与 p-V 图

考点精要

- Q8 p-V 图上等温线是什么形状？p-T 图和 V-T 图上的等容线、等压线呢？

A p-V 图上等温线是双曲线 ($pV = \text{常数}$)；p-T 图上等容线是过原点的直线 ($p/T = \text{常数}$)；V-T 图上等压线是过原点的直线 ($V/T = \text{常数}$)。读图题先判过程：曲线沿哪条线走，就套哪个定律。

- Q9 多过程问题怎么算？

A 按“过程段”逐步算，每段套对应定律，段间用状态量衔接；算完用 p-V 图上的路径检查结果（等温双曲线、等容竖线、等压横线）。

- Q10 一定质量气体等温压缩，压强为什么增大？(微观解释)

A 体积减小 $\rightarrow$ 分子数密度增大 $\rightarrow$ 单位时间内碰撞器壁的分子数增多 $\rightarrow$ 压强增大。

例题 1.3

一定质量气体从状态 A (p_0 、 V_0 、 T_0) 等温膨胀到体积 $2V_0$ ，再等容升温到 $2T_0$ 。末态压强是多少？

A 层 · 基础过关

A7. 一定质量气体从状态 A ($p_0 = 2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_0 = 3.0 \text{ L}$, $T_0 = 300 \text{ K}$) 先等容升温到 $2T_0$ ，再等温膨胀到体积 $2V_0$ 。求末态的压强与温度。

A8. 关于一定质量理想气体的图像，下列说法正确的是 ()

- A. p-V 图中的等温线是过原点的直线
- B. p-T 图中过原点的直线表示等压过程
- C. V-T 图中过原点的直线表示等压过程
- D. p-V 图中等温线是竖直线

A9. 一定质量气体在体积不变的条件下温度升高，压强增大。用分子动理论从微观角度解释这一过程。

B 层 · 真题研习

B1. (2023 · 山东卷, 多选) 一定质量理想气体，初始状态 300 K、 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。等容过程吸收 400 J 热量后温度升高 100 K；等压过程需吸收 600 J 热量才能使温度升高 100 K。下列说法正确的是 ()

A. 两个过程气体内能变化相同

B. 等容过程气体对外做功

C. 等压过程气体对外做功 200 J

D. 等压过程气体吸收的热量全部转化为内能

B2. (2024 · 北京卷) 一个气泡从恒温水槽的底部缓慢上浮, 将气泡内的气体视为理想气体, 且气体分子个数不变, 外界大气压不变。在上浮过程中气泡内气体 ()

A. 内能变大

B. 压强变大

C. 体积不变

D. 从水中吸热

B3. (2023 · 全国甲卷, 多选) 在一汽缸中用活塞封闭着一定量的理想气体, 发生下列缓慢变化过程, 气体一定与外界有热量交换的过程是 ()

A. 气体的体积不变, 温度升高

B. 气体的体积减小, 温度降低

C. 气体的体积减小, 温度升高

D. 气体的体积增大, 温度不变

E. 气体的体积增大, 温度降低

C 层 · 创新拓展

C1. (防晒喷雾罐 · 查理定律与安全警示) 防晒喷雾罐内气体可视为理想气体。常温 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时罐内气体压强为 $2.5 \times 10^5\text{ Pa}$, 罐体容积不变, 罐体能承受的最大压强为 $3.2 \times 10^5\text{ Pa}$ 。

(1) 求罐内气体温度升到多少摄氏度时, 压强恰达到上限值;

(2) 从分子动理论角度解释: 为什么温度升高时罐内压强增大;

(3) 若罐体被太阳暴晒后温度升至 $127\text{ }^{\circ}\text{C}$, 判断此时罐体是否安全, 说明理由。

C2. (一呼一吸中的分子数) 一个成年人平静时一次吸气约 0.5 L (折合为标准状况, 标准状况下气体摩尔体积为 22.4 L/mol), 空气的平均摩尔质量约为 29 g/mol , $N_A = 6.02 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$ 。

(1) 估算一次吸气吸入的气体分子个数;

(2) 估算一次吸气吸入的空气质量;

(3) 一次吸气吸入的分子数大约是 1 mol 水中分子数的几分之几?

C3. (油膜法估测分子大小) 用油膜法估测油酸分子的大小: 将油酸按 1:1999 的体积比溶于酒精制成油酸酒精溶液 (即 2000 倍稀释), 用滴管滴出 50 滴共 1 mL 溶液; 在浅盘中倒入清水并撒上痱子粉, 滴入 1 滴溶液, 油酸在水面展开形成单分子油膜, 测得油膜面积 $S = 100\text{ cm}^2$ 。

- (1) 简述“撒痱子粉”和“滴入 1 滴溶液”后应注意的操作要点（使测量准确的要点）；
- (2) 求 1 滴溶液中油酸的体积 V ；
- (3) 求油酸分子的直径 d （结果用 m 表示）；
- (4) 若油膜未充分展开（测得面积偏小），对 d 的影响是偏大还是偏小？为什么？

C4.（探究等温气体压强与体积关系）用带刻度的注射器和压强传感器研究“一定质量气体在等温条件下压强与体积的关系”，记录数据如下：

V (mL)	20	18	16	14	12
p (kPa)	100	111	125	143	167

- (1) 实验中“缓慢推拉活塞”和“手不握注射器筒”分别是为了什么？
- (2) 计算各组 pV 乘积，判断玻意耳定律是否成立；
- (3) 若以 p 为纵轴、 $1/V$ 为横轴作图，得到的图线应是什么形状？说明理由；
- (4) 若实验过程中活塞处有漏气， pV 乘积会如何变化？为什么？

C5.（玻璃管-水银柱封闭气体）一端封闭、粗细均匀的玻璃管开口向上竖直放置，管内用水银柱封闭一段空气柱：水银柱长 $h = 19\text{ cm}$ ，空气柱长 $L_1 = 15\text{ cm}$ ，外界大气压 $p_0 = 76\text{ cmHg}$ ，全过程温度不变。

- (1) 求封闭气体的压强 p_1 ；
- (2) 将玻璃管缓慢倒转成开口向下竖直放置（水银不流出），求空气柱长度 L_2 ；
- (3) 再缓慢转至水平放置，求空气柱长度 L_3 。

C6.（气体变质量·打气与抽气）篮球容积 $V_0 = 2.0\text{ L}$ ，内有同温同压（ 1.0 atm ）的空气。用打气筒向球内打气，每次打进 $V = 0.1\text{ L}$ 的 1.0 atm 空气，全过程温度不变。

- (1) 打 10 次后，球内压强为多大？
- (2) 若球内压强达到 2.5 atm 时篮球会爆裂，求最多能打多少次；
- (3) 若改用抽气筒抽气（每次抽出 0.2 L 气体，等温），写出抽 n 次后球内压强的表达式，并说明抽气与打气的本质区别。

本章综合·S 层

S1.（三定律串线）一定质量理想气体，初始状态 A： $p_0 = 1.0 \times 10^5\text{ Pa}$ ， $V_0 = 4.0\text{ L}$ ， $T_0 = 300\text{ K}$ 。先等压膨胀到体积 6.0 L （状态 B），再等容升温使压强变为 $1.5 \times 10^5\text{ Pa}$ （状态 C），最后等温压缩回到体积 4.0 L （状态 D）。

- (1) 求状态 B 的温度；
- (2) 求状态 C 的温度；

(3) 求状态 D 的压强，并判断 A、D 两状态温度是否相同。

S2. (p-V 图与微观解释) 一定质量理想气体在 p-V 图上从状态 A ($p_A = 2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_A = 2.0 \text{ L}$) 等温变化到状态 B ($p_B = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_B = 4.0 \text{ L}$), 再等压变化到状态 C ($V_C = 6.0 \text{ L}$)。

(1) A→B 过程气体分子的平均动能如何变化? 为什么?

(2) 求状态 C 的压强, 并说明 B→C 过程气体温度如何变化;

(3) 比较 A、B 两状态下气体单位体积内的分子数, 并用分子动理论解释 A 状态压强大于 B 状态的原因。

0.4 内能: 分子动能与分子势能之和

考点精要

- Q1 物体的内能由什么决定? 理想气体有什么特殊性?

A 内能 = 所有分子的动能 (由温度决定) + 分子势能 (由分子间距/体积决定)。理想气体分子间无作用力、无势能, 内能只由温度决定: $\Delta U = nC_V \Delta T$ 。

- Q2 做功与热传递改变内能的本质区别是什么?

A 做功是宏观能量的转化 (机械能 → 内能, 如摩擦生热、压缩气体); 热传递是微观能量的转移 (高温 → 低温)。效果相同, 本质不同。

- Q3 内能可以为零吗?

A 不能。分子永不停息地做热运动, 任何温度下 ($>0 \text{ K}$) 分子都有动能, 内能永远大于零。

例题 2.1

一定质量理想气体绝热压缩, 体积减半, 内能如何变? (提示: 压缩过程中外界对气体做功, 与外界无热交换)

A 层 · 基础过关

A1. (多选) 关于内能, 下列说法正确的有 ()

- A. 内能是物体内部所有分子动能和分子势能的总和
- B. 机械能可以为零, 但内能不会为零

C. 一定质量的理想气体温度升高，内能一定增大

D. 做功和热传递都可以改变物体的内能

A2. 用做功和用热传递两种方式让一杯水升高相同温度，效果相同但本质不同。请指出本质区别。

A3. 一定质量理想气体做等温膨胀，体积增大。(1) 气体内能如何变化？(2) 气体对外做功还是外界对气体做功？(3) 从热力学第一定律看，气体吸热还是放热？

0.5 热力学第一定律：能量守恒在热学

考点精要

- **Q4 热力学第一定律的公式与符号约定是什么？**

A $\Delta U = Q + W$ 。符号约定：Q 吸热为正、放热为负；W 外界对气体做功为正、气体对外做功为负。

- **Q5 应用热力学第一定律的四步是什么？**

A (1) 判过程（等温/等容/等压/绝热）；(2) 定 Q（绝热 $Q = 0$ ）；(3) 定 W（等容 $W = 0$ ，体积减小外界做功为正）；(4) 代入 $\Delta U = Q + W$ 。先判过程，再定谁为零。

- **Q6 等容、等温、绝热三个过程各有什么“零”？**

A 等容： $W = 0$ （Q 全变内能）；等温（理想气体）： $\Delta U = 0$ （吸热全对外做功）；绝热： $Q = 0$ （ $\Delta U = W$ ）。

- **Q7 “绝热压缩升温、绝热膨胀降温”对应什么生活现象？**

A 打气筒筒壁发热（压缩做功使内能增加）、喷雾罐喷出时罐体变凉（气体膨胀对外做功内能减小）。

例题 2.2

一定质量理想气体绝热压缩，体积减半，内能如何变？

A 层 · 基础过关

A4. 一定质量理想气体做等容升温过程，吸收热量 500 J。(1) 气体对外做功还是外界对气体做功？(2) 气体内能变化多少？

A5. 一定质量理想气体做绝热膨胀，体积增大。下列说法正确的是（ ）

- A. 气体内能增大，温度升高
- B. 气体内能减小，温度降低
- C. 气体吸收热量，内能不变
- D. 气体温度不变，内能不变

A6. 一定质量理想气体从外界吸收热量 300 J，同时气体对外做功 120 J。求气体内能的变化。

0.6 热力学第二定律：热量不会自动倒流

考点精要

• Q8 热力学第二定律的两种表述是什么？

A 克劳修斯表述：热量不能自发地从低温物体传到高温物体（空调要耗电才能“倒流”）；开尔文表述：不可能从单一热源吸热全部转化为功而不留下影响（热机必须向低温热源排热）。

• Q9 熵是什么？“熵增”说的是什么？

A 熵是系统混乱程度的量度。孤立系统的熵永不减少——能量总是从“有序”流向“无序”，这是第二定律的本质。

• Q10 卡诺热机的效率公式是什么？为什么效率永远到不了 100%？

A $\eta = 1 - T_2/T_1$ (T_2 低温热源温度、 T_1 高温热源温度)。因必须向低温热源排热 ($T_2 \neq 0$)， $\eta < 1$ 。

例题 2.3

卡诺热机高温热源 500 K、低温热源 300 K，最大效率为多少？实际蒸汽机效率只有 30% 左右，差在哪？

A 层 · 基础过关

A7. 关于热力学第二定律，下列说法正确的是（ ）

- A. 热量不可能从低温物体传到高温物体
- B. 可以从单一热源吸热使之完全转化为功而不产生其他影响
- C. 热机的效率可以达到 100%

D. 第二类永动机不违背能量守恒定律，但违背热力学第二定律，不可能制成
A8. 某卡诺热机工作于高温热源 600 K 与低温热源 300 K 之间，求其最大效率。

A9. 关于熵和热力学第二定律，下列说法正确的是（ ）

- A. 孤立系统的熵可能减小
- B. 熵是系统混乱程度的量度，孤立系统的熵永不减少
- C. 热量从高温物体自发传到低温物体是熵减小的过程
- D. 热力学第二定律说明能量可以凭空消灭

B 层·真题研习

B1. (2024·福建卷，填空) 洗衣机水箱导管内有一竖直空气柱，空气柱压强为 p_1 时长度为 L_1 。水位下降后温度不变、压强变为 p_2 。则该过程中空气柱长度 $L_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ，气体对外做 $\underline{\hspace{2cm}}$ (选填“正”或“负”) 功。

B2. (2023·江苏卷) 密闭容器内一定质量的理想气体由状态 A 变化到状态 B (p-T 图像，图略，沿过原点的直线温度升高)。该过程中（ ）

- A. 气体分子的数密度增大
- B. 气体分子的平均动能增大
- C. 单位时间内气体分子对单位面积器壁的作用力减小
- D. 单位时间内与单位面积器壁碰撞的气体分子数减小

B3. (2022·江苏卷) 自主学习活动中，同学们对密闭容器中的氢气性质进行讨论，下列说法中正确的是（ ）

- A. 体积增大时，氢气分子的密集程度保持不变
- B. 压强增大是因为氢气分子之间斥力增大
- C. 因为氢气分子很小，所以氢气在任何情况下均可看成理想气体
- D. 温度变化时，氢气分子速率分布中各速率区间的分子数占总分子数的百分比会变化

C 层·创新拓展

C1. (空调与热力学定律) 某空调制冷时，从室内 (27°C) 吸取热量 $Q_2 = 2000\text{ J}$ ，向室外 (37°C) 排出热量 Q_1 ，同时消耗电能 $W = 500\text{ J}$ 。

(1) 求向室外排出的热量 Q_1 ；

(2) 求该空调的制冷系数 (Q_2/W)，并解释其含义；

(3) 有人说“空调把热量从低温的室内搬到高温的室外，违背了热力学第二定律”，请用热力学第一、第二定律作出判断并说明理由。

C2. (冰水混合物与内能) 一杯 0°C 的冰水混合物放在室温约 30°C 的环境中，冰缓慢熔化。

(1) 熔化过程中温度保持 0°C ，水分子的平均动能如何变化？

(2) 熔化过程中水 (冰水系统) 的内能如何变化？这个变化主要来自分子动能还是分子势

能？

(3) 从热力学第一定律角度看，冰吸收的热量转化成了什么？

C3. (热机效率·开放探究) 某汽油发动机的热机效率约为 30%，汽油的热值 $q = 4.6 \times 10^7$ J/kg，密度约 0.7 kg/L。

(1) 消耗 1 L 汽油，发动机对外做的有用功约多少？

(2) 其余约 70% 的能量分别以什么形式散失？(从能量转化与热力学第二定律的角度分析)

(3) 提出至少两条提高发动机效率的可行途径，并说明各自的原理。

本章综合·S 层

S1. (热一律 + 等压过程) 一定质量理想气体在压强 $p = 1.0 \times 10^5$ Pa 保持不变的情况下，体积从 $V_0 = 2.0$ L 缓慢膨胀到 4.0 L，温度从 300 K 升高到 600 K，过程中吸收热量 $Q = 700$ J。

(1) 求气体对外做的功；

(2) 求气体内能的变化；

(3) 该过程中气体分子的平均动能如何变化？

S2. (卡诺热机与效率边界) 某热机工作于高温热源 $T_1 = 800$ K 与低温热源 $T_2 = 400$ K 之间。

(1) 求该热机的卡诺效率；

(2) 若该热机实际效率为 30%，从高温热源吸热 $Q_1 = 2.0 \times 10^4$ J，求输出的有用功 W 与向低温热源排放的热量 Q_2 ；

(3) 用热力学第二定律解释：为什么实际热机的效率一定小于卡诺效率？

0.7 光的反射与折射：斯涅尔定律

考点精要

• Q1 折射定律 (斯涅尔定律) 怎么写？折射率 n 怎么定义？

A $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ；折射率 $n = c/v$ (真空光速与介质中光速之比， $n \geq 1$)。光从光疏介质进光密介质，向法线靠拢 (折射角小于入射角)。

• Q2 发生全反射的两个条件是什么？

A (1) 光从光密介质射向光疏介质 (如水 $n = 1.33$ 、玻璃 $n = 1.5$ 射向空气)；(2) 入射角 $\geq$ 临界角 C ， $\sin C = n_{\text{疏}}/n_{\text{密}}$ 。光从空气射入水中永远不会全反射。

• Q3 潜水员看天空为什么是一个“圆窗”？

A 只有入射角小于临界角（约 49° ）的光才能从水中射入空气，水面外的世界被压缩在一个临界角锥里，锥外全是全反射。

• Q4 光从空气进入水中，频率、波长、波速各怎么变？

A 频率不变（由光源决定）、波速变小（ $v = c/n$ ）、波长变短（ $\lambda = v/f$ ）。口诀：变的是波长和波速，不变的是频率。

例题 3.1

水的折射率为 1.33，光从水射向空气的临界角为多大？潜水员看天空的“圆窗”半径由什么决定？

A 层 · 基础过关

A1. 光从空气（ $n = 1$ ）以入射角 60° 射入玻璃（ $n = 1.5$ ），求折射角的正弦值及折射角大小。

A2. 玻璃的折射率为 1.5。光从玻璃射向空气。

（1）求临界角；

（2）若入射角为 50° ，会发生什么现象？

A3. 下列说法正确的是（ ）

A. 光从空气射入水中，入射角足够大时可以发生全反射

B. 光从水中射向空气，入射角小于临界角时发生全反射

C. 海市蜃楼、光纤通信都利用了光的全反射

D. 折射率越大的介质，光在其中的传播速度越大

0.8 光的波动性：干涉、衍射、偏振

考点精要

• Q5 双缝干涉条纹间距公式是什么？怎么用？

A $\Delta x = \frac{L\lambda}{d}$ （ L 缝到屏距离、 d 双缝间距、 λ 波长）。条纹间距与波长成正比——测波长就靠它；红光比紫光条纹宽。

• Q6 衍射和干涉分别证明了光的什么？

A 衍射证明光“绕得过去”（单缝衍射中央亮纹最宽最亮）；干涉证明光“加得起来”（双缝明暗相间条纹）——两者都是波动性的铁证。

• Q7 怎么判断光是横波？为什么说偏振是横波特有的性质？

A 用偏振现象：横波振动方向可以限制在某个平面内，纵波不行。光通过偏振片后振动方向被限制 → 光是横波。声波（纵波）不能偏振。

• Q8 薄膜干涉（油膜彩色、肥皂泡）的原理是什么？

A 薄膜前后两个表面反射的光发生干涉：厚度不同处的光程差不同，不同位置呈现不同的亮暗/颜色，形成彩色条纹。

例题 3.2

双缝间距 $d = 0.5 \text{ mm}$ ，缝到屏距离 $L = 1 \text{ m}$ ，测得相邻亮纹间距 $\Delta x = 1.3 \text{ mm}$ ，求光的波长，并判断它是什么颜色的光。

A 层 · 基础过关

A4. 用波长为 500 nm 的绿光做双缝干涉实验，双缝间距 $d = 0.2 \text{ mm}$ ，缝到屏距离 $L = 1 \text{ m}$ 。求相邻亮纹间距。

A5. 在上述装置中把绿光换成长 700 nm 的红光，相邻亮纹间距变为多大？条纹是变疏还是变密？

A6. 下列说法正确的是（ ）

- A. 声波也能发生偏振现象
- B. 单缝衍射的中央亮纹最宽最亮
- C. 光的干涉说明光是横波
- D. 肥皂泡呈现彩色条纹是光的衍射现象

0.9 光速与电磁波谱：光也是电磁波

考点精要

• Q9 波长、频率、波速的关系？可见光的波长范围？

A $c = \lambda f$ （真空中光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）。可见光约 $380 \sim 780 \text{ nm}$ 。光进入介质后频率不变、波长变短。

• Q10 电磁波谱从长波到短波怎么排？

A 无线电波、微波、红外、可见光、紫外、X 射线、 γ 射线——可见光只是其中很窄的一段。波长越长频率越低。

例题 3.3

可见光中心波长取 500 nm ，求它对应的频率。

A 层 · 基础过关

A7. 一束波长为 600 nm 的红光从空气进入水中（水的折射率 $n = 1.33$ ）。

- (1) 频率是否变化？
- (2) 求光在水中的波速和波长。

A8. 将下列电磁波按频率从低到高排列：红外线、 γ 射线、紫外线、可见光、无线电波。

A9. 某调频广播电台发射的电磁波频率为 100 MHz ，求该电磁波的波长。

B 层 · 真题研习

B1. (2024 · 天津卷) 下列说法正确的是 ()

- A. 光电效应揭示了光具有波动性
- B. 光从真空进入介质，波长不变
- C. 光纤通信利用了光的全反射现象
- D. 油膜呈现彩色条纹是光的偏振现象

B2. (2024 · 辽宁卷) 某同学自制双缝干涉实验装置，在纸板上割出一条窄缝，于窄缝中央沿缝方向固定一根拉直的头发丝形成双缝，将该纸板与墙面平行放置。用绿色激光照双缝，能在墙面上观察到干涉条纹。下列做法可以使相邻两条亮纹中央间距变小的是 ()

- A. 换用更粗的头发丝
- B. 换用红色激光照双缝
- C. 增大纸板与墙面的距离
- D. 减小光源与纸板的距离

B3. (2022 · 北京卷) 下列现象能说明光是横波的是 ()

- A. 光的衍射现象
- B. 光的折射现象
- C. 光的偏振现象
- D. 光的干涉现象

C 层 · 创新拓展

C1. (光纤通信 · 全反射的现代版) 某光纤芯层的折射率 $n_1 = 1.5$ ，包层的折射率 $n_2 = 1.48$ 。

- (1) 求光在芯-包界面发生全反射的临界角；
- (2) 若光在芯层内射到界面的入射角为 83° ，能否发生全反射？

(3) 求光在芯层中的传播速度；光沿光纤轴线方向前进 1 m 时，为什么实际走的路径比 1 m 长？

C2. (偏光太阳镜·偏振的应用) 水面反射的太阳光是部分偏振光，其振动方向主要偏向水平方向。偏光太阳镜的镜片只让振动方向沿竖直方向的光通过。

- (1) 解释偏光太阳镜为什么能显著减弱水面反光的眩光；
- (2) 普通镜片为什么没有这个效果？
- (3) 开车时为什么水面/路面反光会影响视线，偏光镜能解决？

C3. (光路作图·折射与全反射)

(1) 一束光以入射角 45° 从空气射向折射率 $n = \sqrt{2}$ 的玻璃上表面。画出光路图（标注入射角、折射角），并求折射角；

(2) 光从该玻璃射向空气时，临界角为多大？若入射角为 60° ，画出光路图并说明观察到的现象；

(3) 光从水中 ($n = \frac{4}{3}$) 以 60° 的入射角射向水面，画出光路图，并判断能否发生全反射 ($\sin 60^\circ \approx 0.866$)。

C4. (插针法测玻璃折射率) 某同学用插针法测定玻璃砖的折射率：

- (1) 简述实验的主要步骤（说明四根大头针 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 的插法及入射光线、出射光线的确定方法）；
- (2) 实验中测得入射角 $i = 45^\circ$ ，折射角 $r = 30^\circ$ ，求玻璃的折射率 n ；
- (3) 若玻璃砖的两个光学面不平行（制成楔形），能否用插针法测出折射率？说明理由；
- (4) 本实验的主要误差来源有哪些？如何减小误差？

本章综合·S 层

S1. (折射 + 全反射综合) 折射率 $n = \sqrt{2}$ 的玻璃，光从空气以入射角 45° 射到玻璃表面。

- (1) 求光进入玻璃后的折射角；
- (2) 求光从玻璃射向空气时的临界角；
- (3) 若光在玻璃内部射向玻璃-空气界面，入射角为 60° ，试判断会发生什么现象。

S2. (波动性综合) 关于光的波动性，下列说法正确的有 ()

- A. 双缝干涉条纹间距与光的波长成正比
- B. 单缝衍射的中央亮纹最宽、最亮
- C. 光的偏振现象说明光是横波
- D. 干涉和衍射现象都只能由横波产生
- E. 用白光做双缝干涉实验，中央亮纹为白色，两侧出现彩色条纹

0.10 光电效应：光是一份一份的

考点精要

• Q1 光电效应的三个实验规律是什么？哪一个最“打脸”经典波动说？

A (1) 存在截止频率（低于它，光再强也没电子）；(2) 光电子最大初动能只与频率有关（与光强无关）；(3) 光强只决定光电子数目（饱和电流）。最打脸的是**截止频率**——波动说以为光强决定能量，可光电效应偏偏看频率。

• Q2 爱因斯坦如何解释光电效应？光电效应方程是什么？

A 光是一份一份的（光子），每份能量 $E = h\nu$ ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)。光电效应方程： $h\nu = W_0 + E_{k\max}$ （光子能量 = 逸出功 + 最大初动能）。

• Q3 遏制电压 U_c 怎么用？

A $eU_c = E_{k\max}$ ——把光电子动能拦下来的最小反向电压，直接读出最大初动能。“频率决定能量、光强决定数量”是光电效应的两条命。

• Q4 截止频率由什么决定？换一种金属会变吗？

A 由金属的逸出功决定： $h\nu_0 = W_0$ 。换金属 $\rightarrow$ 逸出功变 $\rightarrow$ 截止频率就变。“能不能发生光电效应”看的是频率够不够打穿这种材料的“门槛”。

例题 4.1

某金属逸出功 $W_0 = 2.5 \text{ eV}$ 。求截止频率；用频率为 $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的光照射，求光电子最大初动能。（ $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ， $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ）

A 层 · 基础过关

A1.（多选）关于光电效应，下列说法正确的有（ ）

- A. 只有入射光频率大于金属的截止频率才能发生光电效应
- B. 增大光强，光电子的最大初动能增大
- C. 增大光强，饱和电流增大
- D. 光电子最大初动能随入射光频率增大而线性增大

A2. 钠的逸出功为 2.3 eV 。用波长 500 nm 的光照射钠。

(1) 能否发生光电效应？(2) 若能，求光电子的最大初动能。（ $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ）

A3. 某金属的逸出功为 3.2 eV ，用频率 $1.0 \times 10^{15} \text{ Hz}$ 的光照射。

(1) 求光电子的最大初动能；(2) 求遏制电压。（ $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ）

0.11 光的波粒二象性与物质波

考点精要

- Q5 光为什么既是波又是粒子？分别有什么证据？

A 干涉、衍射证明波动性；光电效应、康普顿效应证明粒子性。康普顿效应（X 射线散射后波长变长）证明光子有动量 $p = h/\lambda$ 。

- Q6 德布罗意物质波是什么？电子衍射实验证明了什么？

A 一切实物粒子也有波长： $\lambda = h/p = h/(mv)$ 。电子束穿过晶体出现干涉环，证明电子具有波动性。

- Q7 为什么宏观物体观察不到波动性？

A 德布罗意波长与动量成反比——宏观物体动量大，波长小到不可观察（约 10^{-34} m），波动性只在微观显现。

例题 4.2

电子经 100 V 电压加速后的德布罗意波长约为多大？为什么电子显微镜的分辨率比光学显微镜高？（ $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J · s）

A 层 · 基础过关

A4. 求一颗质量 0.10 kg、速度 10 m/s 的子弹的德布罗意波长，并说明为什么宏观物体观察不到波动性。

A5. 求波长 500 nm 的光子具有的动量大小。（ $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J · s）

0.12 原子结构：从汤姆孙到玻尔

考点精要

- Q8 卢瑟福 α 粒子散射实验说明了什么？

A 绝大多数 α 粒子直穿、少数大角度偏转——说明原子内部是“空”的，正电荷和几乎全部质量集中在一个很小的核上（原子核半径约 10^{-15} m）。

- Q9 玻尔模型的核心是什么？氢原子能级公式？

A 电子只能在特定轨道（能级）上运动，能级量子化： $E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$ 。电子从高能级跳到低能级，辐射光子： $h\nu = E_{\text{高}} - E_{\text{低}}$ 。

• Q10 为什么原子光谱是“指纹”？

A 氢原子只能发出能级差对应的几条特定波长的光（如 656 nm 红、486 nm 蓝绿），每条谱线都是一个能级差的“签名”。

例题 4.3

氢原子从 $n=3$ 跃迁到 $n=2$ ，辐射光子的波长约为多大？它是什么颜色的光（可见光吗）？（ $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）

A 层 · 基础过关

A6. 求氢原子从 $n=2$ 跃迁到 $n=1$ 时辐射光子的能量与波长，并判断它属于哪一区（紫外/可见/红外）。（ $E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$ ）

A7. （多选）关于玻尔模型与能级跃迁，下列说法正确的有（ ）

- A. 电子在某一能级上运动时，氢原子不辐射能量
- B. 能级差越大，辐射光子的频率越高、波长越短
- C. 从高能级直接跃迁回基态的光子能量最大
- D. 氢原子只能辐射特定能量的光子

0.13 原子核：衰变、核反应、质能方程

考点精要

• Q11 核反应方程的两把“尺子”是什么？

A 质量数守恒 + 电荷数守恒。 α 衰变质量数减 4、电荷数减 2； β 衰变质量数不变、电荷数加 1——“ α 减 4 减 2、 β 只加 1”。

• Q12 三种射线的性质对比？

A α （氦核）：电离强、穿透弱； β （电子）：电离中、穿透中； γ （电磁波）：电离弱、穿透强。规律：电离越强穿透越弱，此消彼长。

• Q13 半衰期是什么？单个原子也有半衰期吗？

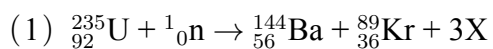
A 半衰期是大量原子核统计规律：一半原子核衰变所需时间，与外界条件无关。单个原子衰变是随机的，半衰期只对大量原子有意义。

• Q14 质能方程怎么用于核能计算？

$E = mc^2$ ；核能 = 质量亏损 $\times c^2$ ： $\Delta E = \Delta mc^2$ 。裂变（重核分裂，链式反应：核电站）与聚变（轻核合成，太阳）都靠质量亏损释放能量。

例题 4.4

完成下列核反应方程，并判断 X 是哪一种粒子：



A 层 · 基础过关

A8. 关于 α 、 β 、 γ 三种射线，下列说法正确的是（ ）

- A. γ 射线的电离能力最强
- B. α 射线的穿透能力最强
- C. β 射线是高速电子流
- D. α 、 β 、 γ 三种射线都是电磁波

A9. 某放射性元素的半衰期为 8 天。现有 80 g 该元素，经过 24 天后还剩多少克？

A10. 某核反应中质量亏损 $\Delta m = 3.1 \times 10^{-29} \text{ kg}$ ，求释放的核能。（ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）

B 层 · 真题研习

B1. （2024 · 湖南卷）下列说法正确的是（ ）

- A. 普朗克认为黑体辐射的能量是连续的
- B. 红光照射某金属可发生光电效应，改用紫光照射也一定可以
- C. 康普顿研究 X 射线散射，发现散射后仅有波长变短的成分
- D. 德布罗意认为质子具有波动性而电子没有波动性

B2. （2024 · 新课标 I 卷）氢原子能级 $E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$ 。光子能量在 1.63 eV 3.10 eV 的光为可见光。要使处于基态（ $n = 1$ ）的氢原子被激发后可辐射出可见光光子，最少应给氢原子供应的能量为（ ）

- A. 12.09 eV
- B. 10.20 eV
- C. 1.89 eV

D. 1.51 eV

B3. (2024 · 新课标 II 卷) 太阳内部核反应的主要模式之一是质子-质子循环, 可简化为 4 个质子转变成 1 个氦核: $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu$ 。已知质子质量 $m_{\text{H}} = 1.0078 \text{ u}$, 氦核质量 $m_{\text{He}} = 4.0026 \text{ u}$, $1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}/c^2$ (忽略电子质量与中微子质量), 则该过程释放的能量约为 ()

A. 8 MeV

B. 16 MeV

C. 26 MeV

D. 52 MeV

B4. (2024 · 重庆卷) 我国太阳探测科学技术试验卫星“羲和号”在国际上首次成功实现空间太阳 $\text{H}\alpha$ 波段光谱扫描成像。 $\text{H}\alpha$ 和 $\text{H}\beta$ 分别为氢原子由 $n=3$ 和 $n=4$ 能级向 $n=2$ 能级跃迁产生的谱线 (能级公式 $E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$), 则 ()

A. $\text{H}\alpha$ 的波长比 $\text{H}\beta$ 的小

B. $\text{H}\alpha$ 的频率比 $\text{H}\beta$ 的小

C. $\text{H}\beta$ 对应的光子能量为 3.4 eV

D. $\text{H}\beta$ 对应的光子不能使氢原子从基态跃迁到激发态

B5. (2026 · 湖南卷) 关于原子核衰变, 下列说法正确的是 ()

A. 原子核发生 α 衰变时, 电荷数增大

B. 原子核发生 α 衰变时, 质量数增大

C. 衰变产生的 α 粒子穿透能力强, 可以穿透几厘米厚的铅板

D. 理论研究表明, 氦核可能在一次衰变过程中放出两个 α 粒子

B6. (2026 · 广西卷) 两种重金属元素铀和钚, 它们的原子核质量数相同。下列选项中相等的是 ()

A. 核电荷数

B. 质量数

C. 原子质量

D. 中子数

C 层 · 创新拓展

C1. (荧光笔 · 高能光子换低能光子) 用验钞灯 (紫外光, 波长约 350 nm) 照射荧光笔写下的字, 荧光字发出绿光 (波长约 550 nm) 而“亮”起来。

(1) 求紫外光光子和绿光光子的能量各是多少;

(2) 单个紫外光子能量大于绿光光子, 多出的能量去哪了?

(3) 用能量观点解释: 为什么荧光笔的字在紫外灯下格外亮眼?

C2. (核电池 · 深空探测的能量来源) 月球车“玉兔二号”使用核电池供电, 核电池利用放

放射性同位素衰变释放的能量发电。某型核电池所用同位素的半衰期为 87.7 年，初始热功率为 100 W。

- (1) 估算约 263 年后该核电池的热功率约为多少；
- (2) 说明半衰期只对大量原子核有意义——为什么核电池还能“按设计”工作几十年？
- (3) 与太阳能电池相比，核电池在月夜和深空探测中有何优势？

C3. (信息阅读·“人造太阳”可控核聚变) 阅读材料：我国“人造太阳”EAST (全超导托卡马克核聚变实验装置) 实现 1.2 亿摄氏度等离子体运行。核聚变反应： ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \longrightarrow {}^4\text{He} + \text{n} + 17.6\text{ MeV}$ 。已知氘核质量 2.0141 u、氚核质量 3.0160 u、氦核质量 4.0026 u、中子质量 1.0087 u，1 u 对应能量约 931.5 MeV。

- (1) 写出该聚变反应的质量亏损表达式并计算 (用题目数据)；
- (2) 根据计算，1 次聚变释放的能量约为多少 MeV？与题目给出的 17.6 MeV 比较，说明结论；
- (3) 为什么核聚变被视为“终极能源”？结合材料与所学知识说明理由 (至少两点)。

本章综合·S 层

S1. (光电效应综合) 某金属逸出功 $W_0 = 4.0\text{ eV}$ ，用波长为 250 nm 的紫外光照射。

- (1) 求光子能量，判断能否发生光电效应；
- (2) 若能，求光电子的最大初动能与遏制电压；
- (3) 求该金属的截止波长 (恰好不发生光电效应的最长波长)，说明改用波长更长的光能否发生光电效应。

S2. (能级 + 光电效应综合) 金属钠的逸出功为 2.25 eV，氢原子能级 $E_n = -13.6/n^2\text{ eV}$ 。

- (1) 氢原子从 $n = 3$ 跃迁到 $n = 2$ 辐射的光子能否使钠发生光电效应？
- (2) 氢原子从 $n = 4$ 跃迁到 $n = 2$ 辐射的光子能否使钠发生光电效应？若能，求光电子的最大初动能；
- (3) 若用氢原子从 $n = 4$ 直接跃迁到 $n = 1$ 辐射的光子照射钠，求光电子的最大初动能。

0.14 狭义相对论的两个前提

考点精要

• Q1 狭义相对论的两个前提是什么？

A (1) 光速不变原理：真空中的光速在任何惯性系中都是 c ，与光源运动无关；(2) 相对性原理：物理定律在所有惯性系中形式相同。

• Q2 光速不变原理和经典速度叠加矛盾吗？

A 矛盾——经典叠加 $u = v + c$ 是低速近似；光速不变是实验事实（无论光源怎么动，测得光速都是 c ），狭义相对论以它为前提。

• Q3 时间膨胀怎么说？谁是“固有时间”？

A 运动的钟变慢： $\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ， Δt_0 是固有时间（相对物体静止的参考系测得的时间）。速度越接近 c ，膨胀越显著； $v \ll c$ 时 $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1$ ，日常无感。

• Q4 长度收缩怎么说？

A 运动方向的长度变短： $L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ， L_0 是固有长度（相对物体静止的参考系测得的长度）。收缩只发生在运动方向上。

例题 5.1

μ 子以 $0.99c$ 运动，其固有寿命为 $2.2 \mu\text{s}$ ，在地面参考系看寿命延长到多少？

A 层 · 基础过关

A1. 飞船以 $0.6c$ 的速度飞行。飞船上的人测得一段时间为 1.0 h ，地面参考系测得这段过程经历多长时间？

A2. 下列说法正确的是（ ）

- A. 光速与观察者的运动状态有关
- B. 光速与光源的运动状态无关，对任何惯性系都相同
- C. 经典速度叠加公式在所有情况下都成立
- D. 相对性原理认为物理定律在不同惯性系中形式不同

A3. 一根静止时长度为 10 m 的杆，沿长度方向以 $0.6c$ 的速度运动，地面参考系中测得的长度是多少？

A4. 为什么我们日常感受不到时间膨胀？高铁、飞机上的时钟真的会比地面慢吗？

A5. （多选）关于狭义相对论，下列说法正确的有（ ）

- A. 真空中的光速是宇宙中一切运动速度的上限
- B. 相对物体运动的钟会变慢
- C. 运动方向上物体的长度会变短
- D. 低速运动时相对论效应可以忽略，经典力学是它的近似

0.15 质能方程：质量就是能量

考点精要

• Q5 质能方程是什么？“质量亏损”是什么意思？

$E = mc^2$ ；核能 = 质量亏损 $\times c^2$ ： $\Delta E = \Delta mc^2$ 。注意：质量亏损是质量**转化**为能量（质能联合守恒），不是质量被“消灭”。

• Q6 为什么不可能超光速？

A 速度越接近光速，质量越大： $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ，继续加速需要的能量趋于无穷——超光速需要无穷能量，物理规律本身不允许。

• Q7 “1 g 质量完全转化”是什么量级？

$E = 1 \times 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13} \text{ J}$ ，约相当于 2.7 吨标准煤，够一户家庭用几十年。

例题 5.2

太阳每秒钟损失质量 $4.2 \times 10^9 \text{ kg}$ （聚变质量亏损），求它释放的功率。

A 层 · 基础过关

A6. 求 1 g 质量完全转化为能量释放的能量，并与标准煤的热值（约 $2.9 \times 10^7 \text{ J/kg}$ ）比较。

A7. 物体的静质量为 m_0 ，当它以 $0.6c$ 运动时，其质量变为静质量的多少倍？

A8. 某核聚变反应的质量亏损为 0.030 u ，求释放的能量。（ $1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}/c^2$ ）

A9. 下列说法正确的是（ ）

- A. 物体的速度可以无限增大，只要不断给它加速
- B. 质能方程说明质量可以凭空消灭
- C. 物体接近光速时质量急剧增大，需要无穷能量才能达到光速
- D. 核反应中释放的能量来自核外电子

B 层 · 真题研习

B1. （2023 · 全国乙卷）2022 年 10 月，全球众多天文设施观测到迄今最亮伽马射线暴，其中我国的“慧眼”卫星、“极目”空间望远镜等装置在该事件观测中作出重要贡献。由观测结果推断，该伽马射线暴在 1 分钟内释放的能量量级为 10^{48} J 。假设释放的能量来自物质质量的减少，则每秒钟平均减少的质量量级为（光速为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）（ ）

- A. 10^{19} kg
- B. 10^{24} kg
- C. 10^{29} kg
- D. 10^{34} kg

B2. (2025 · 上海卷, 填空) 太阳内部核聚变 P-P 循环, 核反应方程为 $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2\text{X}$, 则 X 是_____。

C 层 · 创新拓展

C1. (GPS 与相对论: 每天 38 微秒的修正) GPS 卫星在高速 (3.9 km/s) 和高空运行: 狭义相对论效应使卫星上的钟每天比地面慢 $7\text{ }\mu\text{s}$, 广义相对论效应使卫星上的钟每天比地面快 $45\text{ }\mu\text{s}$, 净效应每天快 $38\text{ }\mu\text{s}$ 。

- (1) 求 $38\text{ }\mu\text{s}$ 的光速误差对应多大的定位误差;
- (2) 若不修正, 定位误差会怎样累积? 说明相对论为何是导航工程的必需品。

C2. (1 g 铀 vs 2.8 吨煤) 1 g 铀 235 完全裂变释放的能量约为 $8.2 \times 10^{10}\text{ J}$ 。

- (1) 这些能量若由标准煤提供, 需多少千克标准煤? (标准煤热值约 $2.9 \times 10^7\text{ J/kg}$)
- (2) 从质能方程角度解释: 为什么核能如此 “浓缩”?

本章综合 · S 层

S1. (μ 子与时间膨胀) 宇宙射线 μ 子以 $v = 0.99c$ 的速度运动, 其固有寿命 $\tau_0 = 2.2\text{ }\mu\text{s}$ 。

- (1) 求地面参考系中观测到的 μ 子寿命;
- (2) 在地面参考系看, μ 子在这段时间内能前进多远?
- (3) 若不考虑相对论效应, 按固有寿命计算 μ 子只能前进多远? 结合大气层厚度说明时间膨胀的实验意义。

S2. (氘氚聚变 · 人造太阳的能量) 可控核聚变 (EAST/ITER) 的核心反应为 $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$ 。已知氘核质量 2.01410 u , 氚核质量 3.01605 u , 氦核质量 4.00260 u , 中子质量 1.00866 u , $1\text{ u} = 931\text{ MeV}/c^2$ 。

- (1) 求该反应的质量亏损;
- (2) 求每次反应释放的能量;
- (3) 1 mol 氘核 (6.02×10^{23} 个) 全部参与反应释放多少能量? ($1\text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13}\text{ J}$)

0.16 激光: 受激辐射的光放大

例题 6.1

红宝石激光器发出波长为 694 nm 的红光。

- (1) 求单个光子的能量;
- (2) 一次脉冲能量为 1 J , 含多少个光子? ($h = 6.63 \times 10^{-34}\text{ J} \cdot \text{s}$)

C 层 · 创新拓展

C1. (激光测距) 激光测距仪向月球表面发射激光脉冲, 经过 2.56 s 后收到返回信号。已知地月平均距离约 $3.84 \times 10^8 \text{ m}$ 。

- (1) 由此测得的光速是多少? 与真空光速对照;
- (2) 说明激光 (单色、相干、平行、高亮) 中哪些特性使它特别适合长距离测距。

0.17 LED 与能级: 量子化的光

C 层 · 创新拓展

C2. (LED 发光颜色) 红光 LED 的发光能级差约为 1.8 eV。

- (1) 求它发出的光的波长, 判断颜色; ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)
- (2) 若想得到蓝光 LED (波长约 450 nm), 需要多大能级差的发光材料?
- (3) 从能量转化角度解释: 为什么 LED 比白炽灯省电?

0.18 太阳能电池: 光电效应的逆过程

C 层 · 创新拓展

C3. (光伏发电) 太阳光在地面的功率密度约 1000 W/m^2 。某光伏电站单块电池板面积 2 m^2 , 光电转换效率为 20%。

- (1) 求单块电池板的发电功率;
- (2) 若该地每天等效满晒 4 小时, 一块电池板一天发多少度电? ($1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h}$)
- (3) 对照光电效应说明: 太阳能电池为什么可以看作“光电效应的逆过程”?

0.19 光纤通信: 全反射的现代版

C 层 · 创新拓展

C4. (光纤通信波长) 光纤通信常用波长为 1550 nm 的红外光。

- (1) 求该光的频率;
- (2) 若芯层折射率为 1.46, 求光在芯层中的传播速度;
- (3) 为什么不同波长的光可以在同一根光纤中同时传输、互不干扰?

0.20 核电站：可控链式反应

C 层·创新拓展

C5. (链式反应与控制棒) 铀 235 裂变时，一个中子轰击一个铀核，平均放出 2.3 个中子。

(1) 若有效增殖因子(下一代中子数 ÷ 上一代中子数)为 1.0，链式反应处于什么状态？控制棒吸收中子后增殖因子小于 1 时反应如何？

(2) 求 1 g 铀 235 中含有的原子核个数；($m = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$)

(3) 若每次裂变平均释放 200 MeV，1 g 铀 235 完全裂变释放多少能量？(1 MeV = $1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$)

0.21 医学影像：X 光、CT 与核医学

C 层·创新拓展

C6. (X 光管) X 光管中电子经 100 kV 电压加速后撞击金属靶。

(1) 求电子的最大动能；

(2) 求由此辐射的 X 射线最大光子能量及对应的最短波长。($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

0.22 GPS 与相对论：每天 38 微秒的修正

C 层·创新拓展

C7. (GPS 定位误差) GPS 卫星定位通过测量电磁波从卫星到接收机的传播时间实现。

(1) 若信号传播时间的测量误差为 1 μs ，引起的定位误差约为多大？

(2) 卫星上的钟因狭义相对论每天慢 7 μs 、因广义相对论每天快 45 μs ，说明为什么两个效应方向相反；

(3) 不修正的后果是什么？

0.23 量子计算与量子通信：下一个时代

C 层·创新拓展

C8. (量子比特与墨子号) “墨子号”量子科学实验卫星完成了千公里级量子密钥分发。

(1) 经典比特只有 0 和 1 两个状态；量子比特 (qubit) 可以处于 0 和 1 的叠加态。估算 10 个量子比特能同时表示多少个状态？

(2) 为什么量子密钥分发可以做到“窃听必被发现”？

(3) 简述量子计算对某些问题“指数级加速”的来源。

0.24 热机与能源：效率的边界

例题 6.2

燃气轮机入口燃气温度为 1400°C (即 1673 K)，出口温度为 600°C (即 873 K)，求其卡诺效率上限。

C 层 · 创新拓展

C9. (电动车 vs 内燃机) 电动汽车的电动机效率可达 90% 以上，而内燃机效率通常只有 30% 左右。

(1) 某内燃机最高燃气温度为 2000 K ，排出尾气温度 700 K ，其卡诺效率上限是多少？

(2) 实际内燃机效率远低于该上限，损失主要有哪些？

(3) 从热力学角度看，为什么电动机可以做到高效而内燃机受“效率边界”限制？

0.25 太空望远镜与宇宙学：看见 138 亿年

C 层 · 创新拓展

C10. (哈勃定律与宇宙膨胀) 哈勃望远镜观测到遥远星系的光普遍发生红移 (波长变长)。

(1) 红移说明这些星系在远离我们还是靠近我们？

(2) 某星系退行速度约为 $0.05c$ ，按哈勃定律 $v = H_0 d$ ($H_0 \approx 70\text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$) 估算该星系与我们的距离；($c = 3 \times 10^5\text{ km/s}$)

(3) 宇宙微波背景辐射 (“宇宙的第一缕光”) 为什么是宇宙大爆炸的重要证据？

B 层 · 真题研习

B1. (2023 · 浙江卷, 多选) “玉兔二号”装有核电池, 不惧漫长寒冷的月夜。核电池将 $^{238}_{94}\text{Pu}$ 衰变释放的核能一部分转换成电能。 $^{238}_{94}\text{Pu}$ 的衰变方程为 $^{238}_{94}\text{Pu} \rightarrow ^A_{92}\text{U} + ^4_2\text{He}$ (A 为铀核的质量数), 则 ()

A. A 等于 233

B. ^4_2He 的穿透能力比 γ 射线强

C. ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ 比 ${}_{92}^{234}\text{U}$ 的比结合能小

D. 月夜的寒冷导致 ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ 的半衰期变大

B2. (2024 · 天津卷, 多选) 我国核聚变研究大科学装置“人造太阳”2024 年获得重大突破, 等离子体中心电子温度首次达到 1 亿度, 为人类开发利用核聚变能源奠定了重要的技术基础。下列关于聚变的说法正确的是 ()

A. 核聚变比核裂变更为安全、清洁

B. 任何两个原子核都可以发生聚变

C. 两个轻核结合成质量较大的核, 总质量较聚变前增加

D. 两个轻核结合成质量较大的核, 核子的比结合能增加

本章综合 · S 层

S1. (核电站的能量链) 核电站的能量转化链条: 反应堆中铀核裂变释放核能 → 冷却剂带走热量使水变成高温高压蒸汽 → 蒸汽推动汽轮机旋转 → 汽轮机带动发电机发电。

(1) 写出各环节对应的能量转化形式;

(2) 若反应堆热功率为 $3.0 \times 10^9 \text{ W}$, 发电效率为 40%, 求输出电功率;

(3) 汽轮机工作于高温热源 $T_1 = 600 \text{ K}$ 与低温热源 $T_2 = 320 \text{ K}$ 之间, 求卡诺效率上限, 并判断 40% 的发电效率是否合理。

S2. (太阳能电池与光电效应) 单晶硅太阳能电池的能隙 (价带顶到导带底的能量差, 相当于“逸出功”) 约为 1.1 eV 。

(1) 求能使硅电池工作的人射光最大波长 (即截止波长); ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)

(2) 用波长 500 nm 的可见光照射, 能否激发电子产生光电流? 计算说明;

(3) 太阳光谱中能量大于 1.1 eV 的光子对应波长范围, 说明为什么硅电池可以用太阳光发电。

一、单项选择题 (每题 4 分, 共 20 分)

Z1. 关于分子动理论和气体, 下列说法正确的是 ()

A. 布朗运动是液体分子的无规则运动

B. 温度是物体分子平均速率的度量

C. 一定质量气体等温压缩, 分子平均动能不变、压强增大

D. 分子间距离越大, 分子间作用力一定越小

Z2. 一定质量理想气体从外界吸收热量 200 J , 同时外界对气体做功 300 J , 则气体内能的变化为 ()

A. 增加 500 J

B. 减少 100 J

C. 增加 100 J

D. 减少 500 J

Z3. 一束光从空气射入折射率为 $\sqrt{2}$ 的玻璃，折射角为 30° ，则入射角为 ()

A. 30°

B. 45°

C. 60°

D. 90°

Z4. 氢原子从 $n = 3$ 能级跃迁到 $n = 1$ 能级辐射光子的能量为 () (能级公式 $E_n = -13.6/n^2$ eV)

A. 1.89 eV

B. 10.2 eV

C. 12.09 eV

D. 13.6 eV

Z5. 宇宙飞船以 $0.6c$ 的速度飞行，地面观察者测得飞船上的时钟 ()

A. 变快

B. 变慢

C. 与地面钟快慢相同

D. 无法判断

二、多项选择题 (每题 6 分，共 18 分)

Z6. 下列说法正确的有 ()

A. 光纤通信利用了光的全反射

B. 光的偏振现象说明光是横波

C. 光电效应说明光具有波动性

D. 双缝干涉条纹间距与光的波长成正比

E. 核反应方程满足质量数守恒和电荷数守恒

Z7. 一定质量理想气体从状态 A (p_0 、 V_0 、 T_0) 经等温膨胀到状态 B (体积 $2V_0$)，再经等容升温到状态 C (温度 $2T_0$)。下列说法正确的有 ()

A. B 状态压强为 $p_0/2$

B. C 状态压强为 p_0

C. A→B 过程气体内能不变

D. B→C 过程气体吸收热量

E. B→C 过程气体对外做功

Z8. 关于核反应，下列说法正确的有（ ）

- A. 核聚变和核裂变都会发生质量亏损
- B. 半衰期与外界温度、压强无关
- C. α 衰变电荷数减 2、质量数减 4
- D. β 衰变质量数不变、电荷数加 1
- E. 核反应方程只需满足电荷数守恒，不必满足质量数守恒

三、实验题（共 12 分）

Z9. 在“用双缝干涉测量光的波长”实验中：

- (1) (4 分) 写出测量波长的原理公式（用 Δx 、 L 、 d 表示）；
- (2) (4 分) 测得相邻亮纹间距 $\Delta x = 1.4 \text{ mm}$ ，双缝间距 $d = 0.3 \text{ mm}$ ，双缝到光屏距离 $L = 1.2 \text{ m}$ ，求光的波长；
- (3) (4 分) 若把绿光换成红光重新实验，相邻亮纹间距将如何变化？为什么？

四、计算题（共 50 分）

Z10. (12 分) 某钢瓶容积为 40 L ，装有压强为 $1.2 \times 10^7 \text{ Pa}$ 、温度为 27°C 的氧气（视为理想气体， $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ）。

- (1) 求瓶中氧气的物质的量；
- (2) 若温度降到 7°C （体积不变），求瓶内压强；
- (3) 若用掉瓶内一半质量的氧气后温度恢复到 27°C ，求瓶内剩余气体的压强。

Z11. (12 分) 一束单色光从空气射入折射率 $n = 4/3$ 的水中，入射角为 53° ($\sin 53^\circ = 0.8$)。

- (1) 求折射角；
- (2) 求光在水中的传播速度；
- (3) 求光从水中射向空气时的临界角。

Z12. (12 分) (1) 某金属的逸出功为 3.5 eV ，用波长 250 nm 的紫外光照射，求光电子的最大初动能与遏制电压；($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ， $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)

- (2) 某核反应的质量亏损为 0.023 u ，求释放的能量。($1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}/c^2$)

Z13. (8 分) 宇宙飞船以 $0.8c$ 的速度飞行，地面观察者测得飞船沿运动方向的长度缩短为 60 m ，求飞船的固有长度。

Z14. (6 分) 一定质量理想气体从状态 A ($p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， $V_0 = 2.0 \text{ L}$ ， $T_0 = 300 \text{ K}$) 开始，先等压膨胀到体积 3.0 L (状态 B)，过程中吸收热量 $Q = 250 \text{ J}$ ；再等容放热，使温度回到 300 K (状态 C)。

- (1) 求状态 B 的温度；
- (2) 求 A→B 过程中气体对外做的功；
- (3) 求 A→B 过程中气体内能的变化；

(4) 求 $B \rightarrow C$ 过程中气体放出的热量。