

GRADUS

物理 III

解答册

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	9
0.5	热力学第一定律：能量守恒在热学	10
0.6	热力学第二定律：热量不会自动倒流	12
0.7	光的反射与折射：斯涅尔定律	16
0.8	光的波动性：干涉、衍射、偏振	17
0.9	光速与电磁波谱：光也是电磁波	18
0.10	光电效应：光是一份一份的	22
0.11	光的波粒二象性与物质波	23
0.12	原子结构：从汤姆孙到玻尔	24
0.13	原子核：衰变、核反应、质能方程	25
0.14	狭义相对论的两个前提	30
0.15	质能方程：质量就是能量	32
0.16	激光：受激辐射的光放大	35
0.17	LED 与能级：量子化的光	36
0.18	太阳能电池：光电效应的逆过程	37
0.19	光纤通信：全反射的现代版	37
0.20	核电站：可控链式反应	37
0.21	医学影像：X 光、CT 与核医学	38
0.22	GPS 与相对论：每天 38 微秒的修正	38
0.23	量子计算与量子通信：下一个时代	39
0.24	热机与能源：效率的边界	39
0.25	太空望远镜与宇宙学：看见 138 亿年	40

0.1 分子动理论：三句话看微观

例题 1.1 解析

思考路径：

- 读题：问“多少个水分子” $\rightarrow$ 1 mol 任何物质的分子数就是阿伏伽德罗常数，直接给答案；
- 问“每个水分子的质量” $\rightarrow$ 用“摩尔汇率”：单个分子质量 = 摩尔质量 $\div$ 阿伏伽德罗常数；
- 单位先行：18 g = 18×10^{-3} kg，除以 6.02×10^{23} 得 10^{-26} kg 量级——分子质量的数量级是 10^{-26} kg。

规范解：

$$N = N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ 个};$$

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{18 \times 10^{-3}}{6.02 \times 10^{23}} \approx 3.0 \times 10^{-26} \text{ kg}.$$

答：1 mol 水含 6.02×10^{23} 个水分子，每个水分子约 3.0×10^{-26} kg。

易错点：单个分子质量量级必须落在 10^{-26} 10^{-27} kg——若算出 10^{-23} kg 一定是单位换算错了（g 没换 kg）；“摩尔汇率”（ N_A + 摩尔质量）是微观量与宏观量之间的桥梁。

A1 解析

思路：分子数 $N = n \cdot N_A$ ，物质的量 $n = m/M$ ；m 由体积和密度求出。

规范解： $V = 1 \text{ cm}^3 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$,

$$m = \rho V = 1.0 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg} = 1 \text{ g};$$

$$n = m/M = 1.0 \times 10^{-3} / 0.018 \approx 5.6 \times 10^{-2} \text{ mol};$$

$$N = nN_A = 5.6 \times 10^{-2} \times 6.02 \times 10^{23} \approx 3.3 \times 10^{22} \text{ 个}.$$

答：1 cm^3 水中约有 3.3×10^{22} 个水分子。

易错点：体积、质量都要换算成国际单位；摩尔质量 M 用 kg/mol（18 g/mol = 0.018 kg/mol）才能与 kg 质量直接约分。

A2 解析

思路：布朗运动的本质是“颗粒被分子撞击的无规则运动”，不是分子本身的运动。

规范解：

（1）错。布朗运动是花粉颗粒（悬浮颗粒）被水分子撞击而做的无规则运动，运动的主体是颗粒，不是水分子；它只是**间接证明**了水分子的无规则热运动。

(2) 对。温度越高，水分子热运动越剧烈，对颗粒的撞击越频繁、越不平衡，布朗运动越明显。

(3) 错。布朗运动在普通光学显微镜下就能看到（悬浮颗粒）；分子本身则肉眼和光学显微镜都看不见。

易错点：把“布朗运动证明了分子运动”误说成“布朗运动就是分子运动”——颗粒是被撞的“证人”，不是“凶手”。

A3 解析

思路：分子间同时存在引力与斥力，二者随距离变化的快慢不同，合力才表现为某一方向的“净作用”。

规范解：A 错： $r=r_0$ 时引力和斥力都仍存在，只是大小相等、合力为零（平衡位置）；B 错： $r < r_0$ 时斥力 $>$ 引力，合力表现为斥力，但引力依然存在；C 对： $r > r_0$ 时合力表现为引力，且随 r 增大先增大后减小， r 很大时趋于零；D 错： $r > 10r_0$ 时分子间作用力已微弱到可以忽略。

选 C。

易错点： $r=r_0$ 是“合力为零”而不是“没有力”；分子间引力和斥力始终同时存在，不能只讲一个。

0.2 气体压强的微观解释：分子在“敲门”

例题 1.2 解析

思考路径：

- 读题：“胎内气体体积、质量不变” $\rightarrow$ 等容过程，套查理定律 $p_1/T_1 = p_2/T_2$ ；
- 温度单位！ 17°C 、 27°C 是摄氏温度，必须先换成开尔文： $T_1 = 290\text{ K}$ ， $T_2 = 300\text{ K}$ ；
- 预期检查：温度升高，压强应变大，答案 $3.0\text{ atm} > 2.9\text{ atm}$ ，方向自洽。

规范解： $T_1 = 17 + 273 = 290\text{ K}$ ， $T_2 = 27 + 273 = 300\text{ K}$ 。

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} : \frac{2.9}{290} = \frac{p_2}{300},$$

$$p_2 = 2.9 \times 300 \div 290 = 3.0 \text{ 个标准大气压。}$$

答：次日中午胎压约为 3.0 个标准大气压。

易错点：直接把 17°C 、 27°C 代入公式是经典错误——气体定律中的 T 一律是热力学温度；温度升高 10 K ，胎压约涨 3.4%，这就是夏天高速跑完胎压升高、要求“冷态测胎压”的原因。

A4 解析

思路：温度不变 $\rightarrow$ 玻意耳定律 $p_1 V_1 = p_2 V_2$ ，直接代入。

规范解： $p_2 = p_1 V_1 / V_2 = 3.0 \times 10^5 \times 2.0 / 4.0 = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

答：末态压强 $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

易错点：等温膨胀压强减半，别算反（体积翻倍压强应减半）；体积单位 L 在公式两侧同时出现可抵消，不需换算。

A5 解析

思路：体积不变 $\rightarrow$ 查理定律； $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$ ， $100^\circ\text{C} = 373 \text{ K}$ 。

规范解： $T_1 = 273 \text{ K}$ ， $T_2 = 373 \text{ K}$ 。

$$p_2 = p_1 \cdot T_2 / T_1 = 1.0 \times 10^5 \times 373 / 273 \approx 1.37 \times 10^5 \text{ Pa}。$$

答：压强约为 $1.37 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

易错点： 0°C 就是 273 K ，不是 0 K ；若把 0°C 当 0 K 直接除零，就全错了。

A6 解析

思路：压强不变 $\rightarrow$ 盖-吕萨克定律 $V_1 / T_1 = V_2 / T_2$ 。

规范解： $T_1 = 273 \text{ K}$ ， $T_2 = 373 \text{ K}$ 。

$$V_2 = V_1 \cdot T_2 / T_1 = 1.0 \times 373 / 273 \approx 1.37 \text{ L}。$$

答：体积约为 1.37 L 。

易错点：盖-吕萨克定律是 V 与热力学温度 T 成正比，与 $^\circ\text{C}$ 不成正比—— 0°C 时体积不为零。

0.3 气体三定律的图像与 p-V 图

例题 1.3 解析

思考路径：

• 第一步等温膨胀：玻意耳定律 $p_0 V_0 = p_1 \cdot 2V_0 \rightarrow p_1 = p_0 / 2$ ；

• 第二步等容升温：查理定律 $p_1 / T_1 = p_2 / T_2$ ， $T_1 = T_0$ ， $T_2 = 2T_0$ ；

• 预期检查：两步合起来 $(p_0 V_0) / T_0$ 与 $(p_2 \cdot 2V_0) / (2T_0)$ 相等 $\rightarrow$ 末态应回到 p_0 ，用状态方程一验即知。

规范解：

等温： $p_0 V_0 = p_1 \times 2V_0$ ， $p_1 = p_0 / 2$ ；

等容: $\frac{p_0/2}{T_0} = \frac{p_2}{2T_0}$, $p_2 = p_0$ 。

答: 末态压强为 p_0 (体积翻倍、温度翻倍, 压强回到初压)。

易错点: 多过程题不能“一步到位”套状态方程, 必须分段算; 结果可用 $\frac{pV}{T} = \text{常数}$ 检验 ($p_0V_0/T_0 = p_0 \cdot 2V_0/2T_0$ ✓)。

A7 解析

思路: 与例题同构但路径顺序不同: 先等容升温 (压强翻倍), 再等温膨胀 (压强减半)。

规范解:

等容升温: $T_1 = 2T_0 = 600 \text{ K}$, $p_1 = p_0 \cdot T_1/T_0 = 2.0 \times 10^5 \times 2 = 4.0 \times 10^5 \text{ Pa}$;

等温膨胀: $p_2 = p_1 \cdot V_1/V_2 = 4.0 \times 10^5 \times V_0/(2V_0) = 2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_2 = T_1 = 600 \text{ K}$ 。

答: 末态压强 $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, 温度 600 K 。

易错点: 本题末态压强恰好等于初压, 但温度变成 600 K ——“压强相等”不等于“状态相同”, 判断状态要看全部状态量。

A8 解析

思路: 对号入座: 等温线 ($pV = \text{常数}$) 在 p - V 图是双曲线; 等容线 ($p/T = \text{常数}$) 在 p - T 图是过原点直线; 等压线 ($V/T = \text{常数}$) 在 V - T 图是过原点直线。

规范解: A 错: p - V 图等温线是双曲线, 不是直线; B 错: p - T 图过原点的直线表示等容过程; C 对: V - T 图过原点的直线表示等压过程; D 错: p - V 图中等容线才是竖直线。

选 C。

易错点: “ p - T 过原点直线 = 等容, V - T 过原点直线 = 等压”——哪条轴是什么量, 配哪条定律, 别张冠李戴。

A9 解析

思路: 压强由“分子数密度”和“分子平均动能”两个微观因素决定; 体积不变 $\rightarrow$ 数密度不变, 那就只能从平均动能入手。

规范解: 体积不变时分子数密度不变; 温度升高使分子平均动能增大, 分子对器壁的撞击更猛烈 (每次撞击的力更大、平均撞击频率更高), 单位时间内器壁受到的冲量增大, 故压强增大。

答: 体积不变时, 温度升高 $\rightarrow$ 分子平均动能增大 $\rightarrow$ 单位时间碰撞器壁的分子数与每次碰撞强度都增大 $\rightarrow$ 压强增大。

易错点: 微观解释要“两步”说全: 数密度变了没有? 平均动能变了没有? ——等容升温只有“动能变大”这一个因素起作用。

B 层·真题研习

B1 解析 (2023·山东卷)

思路：理想气体内能只由温度决定——两个过程温度变化相同，内能变化必相同；再分别用热力学第一定律 $\Delta U = Q + W$ (W 外界对气体做功为正) 判定做功。

规范解：

A 对：两个过程温度都升高 100 K，内能变化相同，均为 $\Delta U = 400 \text{ J}$ ；

B 错：等容过程体积不变， $W = 0$ ，不做功；

C 对：等压过程 $Q = 600 \text{ J}$ ， $\Delta U = 400 \text{ J}$ ，由 $\Delta U = Q + W$ 得 $W = 400 - 600 = -200 \text{ J}$ ，负号表示气体对外做功 200 J；

D 错：等压过程 600 J 中 400 J 转化为内能、200 J 对外做功，并非全部变内能。

选 A、C。

易错点：“温度变了 = 内能变了” (理想气体) 是本题的钥匙；等压过程吸热更多，多的那部分就是对外做的功 ($\Delta Q = W$)。

B2 解析 (2024·北京卷)

思路：恒温水槽 → 等温过程；上浮 → 外界水压逐渐减小 → 气泡内外压平衡，气泡内压强随之减小。

规范解：A 错：恒温，内能不变；B 错：上浮时水压减小，气泡内压强减小；C 错：等温下压强减小则体积增大；D 对：等温膨胀 $\Delta U = 0$ 且对外做功 ($W < 0$)，由 $\Delta U = Q + W$ 得 $Q > 0$ ，即从水中吸热。

选 D。

易错点：气泡上浮是“等温膨胀”而非“等温压缩”——水越浅压强越小，气泡越变越大；能量来源是水中吸热，不是“上浮做的功”。

B3 解析 (2023·全国甲卷)

思路：逐一用 $\Delta U = Q + W$ 分析，符号约定：体积减小 $W > 0$ (外界做功)，体积增大 $W < 0$ ；温度升高 $\Delta U > 0$ ，温度降低 $\Delta U < 0$ 。要求“一定”有热交换，即 Q 的符号能唯一确定。

规范解：

A：体积不变 $W = 0$ ，温度升高 $\Delta U > 0 \rightarrow Q = \Delta U > 0$ ，一定吸热 ✓

B：体积减小 $W > 0$ ，温度降低 $\Delta U < 0 \rightarrow Q = \Delta U - W < 0$ ，一定放热 ✓

C：体积减小 $W > 0$ ，温度升高 $\Delta U > 0 \rightarrow Q = \Delta U - W$ 符号不定 ×

D：体积增大 $W < 0$ ，温度不变 $\Delta U = 0 \rightarrow Q = -W > 0$ ，一定吸热 ✓

E：体积增大 $W < 0$ ，温度降低 $\Delta U < 0 \rightarrow Q = \Delta U - W = \Delta U + |W|$ 符号不定 (绝热膨胀即 $Q = 0$ 的反例) ×

选 A、B、D。

易错点：C、E 两个“不确定”选项都是绝热过程的反例 (绝热压缩升温、绝热膨胀降温恰好

满足体积与温度的组合, 但 $Q=0$); “一定”二字的陷阱就在这两项。

C 层·创新拓展

C1 解析 (防晒喷雾罐·查理定律)

思路: 罐内容积不变 $\rightarrow$ 等容过程, 查理定律; “安全与否”用 127°C 对应的压强与上限值比较。

规范解:

$$(1) T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ K}, p_1 = 2.5 \times 10^5 \text{ Pa}, p_2 = 3.2 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

$$\text{由 } p_1/T_1 = p_2/T_2: T_2 = 3.2 \times 10^5 \div 2.5 \times 10^5 \times 300 = 384 \text{ K}, \text{ 即 } 384 - 273 = 111^\circ\text{C}.$$

(2) 容积不变 $\rightarrow$ 分子数密度不变; 温度升高使分子平均动能增大, 分子碰撞器壁更频繁、更有力, 单位面积上受的力增大 $\rightarrow$ 压强增大。

(3) $127^\circ\text{C} = 400 \text{ K}$, 此时压强 $p = p_1 \cdot T/T_1 = 2.5 \times 10^5 \times 400/300 \approx 3.33 \times 10^5 \text{ Pa} > 3.2 \times 10^5 \text{ Pa}$, 超过罐体上限, 不安全。

答: 111°C 时压强达上限; 127°C 时压强约 $3.33 \times 10^5 \text{ Pa}$, 超过上限, 有胀罐危险。

易错点: 摄氏与开尔文换算; 比较安全必须“算出具体压强再和上限比”, 不能只看温度多少就下结论——上限对应 111°C , 100°C 以内反而安全。

C2 解析 (一呼一吸中的分子数)

思路: 标准状况下体积可以直接换物质的量 ($n = V/V_m$), 再乘 N_a 得分子数; 质量用 $n \cdot M$ 。

规范解:

$$(1) n = 0.5 / 22.4 \approx 2.23 \times 10^{-2} \text{ mol},$$

$$N = nN_a = 2.23 \times 10^{-2} \times 6.02 \times 10^{23} \approx 1.3 \times 10^{22} \text{ 个}.$$

$$(2) m = nM = 2.23 \times 10^{-2} \times 29 \approx 0.65 \text{ g}.$$

$$(3) 1 \text{ mol 水的分子数为 } 6.02 \times 10^{23}, \text{ 比值} = 1.3 \times 10^{22} / (6.02 \times 10^{23}) \approx 0.022, \text{ 即约为 } 1/45.$$

答: 一次吸气约吸入 1.3×10^{22} 个分子、约 0.65 g 空气, 约为 1 mol 水分子的 $1/45$ 。

易错点: 数量级检验——一次呼吸的分子数在 10^{22} 量级; 空气密度 $1.29 \text{ kg/m}^3 \times 0.5 \text{ L} \approx 0.65 \text{ g}$, 与 (2) 的结果互相印证, 两个途径算出的质量应一致。

C3 解析 (油膜法估测分子大小)

思路: 油酸在水面形成单分子层油膜 (油酸一端亲水一端疏水, 平躺展开), 分子直径 = 油酸体积 $\div$ 油膜面积, 即 $d = \frac{V}{S}$ 。

规范解:

(1) 要点: 痱子粉要撒得薄而均匀 (太厚油膜铺不开、面积偏小); 滴液时滴管口距水面近些, 让液滴自由落下 (不溅起); 待油膜稳定后再测面积; 用坐标纸数格子 (不足半格舍去、超过半格算一格)。

$$(2) 1 \text{ 滴体积} = \frac{1}{50} \text{ mL}; \text{ 含油酸 } V = \frac{1}{50} \times \frac{1}{2000} = 1 \times 10^{-5} \text{ mL} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^3.$$

$$(3) S = 100 \text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-2} \text{ m}^2;$$

$$d = \frac{V}{S} = \frac{1 \times 10^{-11}}{1 \times 10^{-2}} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}。$$

(4) 面积偏小 $\rightarrow d = V/S$ 偏大——油膜未展开时，分子“挤”在更小面积上，算出的“单层厚度”虚高。

答：(1) 痱子粉薄匀、滴管靠近水面、油膜稳定后测面积；(2) $1 \times 10^{-11} \text{ m}^3$ ；(3) $1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ；(4) 偏大。

易错点：(1) 单位换算： $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$ ，1 滴 $0.02 \text{ mL} = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ ；(2) 油膜是单分子层——这是方法成立的根基，别当成“体积直接除以面积”的普通除法；(3) 酒精的作用是稀释（便于滴出微小油酸量），酒精会挥发，不计入油膜。

C4 解析（探究等温气体压强与体积关系）

思路：玻意耳定律 $pV = C$ （等温、质量一定）。验证方法：计算各组 pV 乘积是否近似相等，或画 $p-1/V$ 图看是否过原点直线。

规范解：

(1) “缓慢推拉活塞”：使气体与外界充分热交换，保持温度不变（快速压缩会升温）；“手握注射器筒”：避免手的温度使气体升温——两条都是保证等温条件。

(2) pV ： $100 \times 20 = 2000$ ； $111 \times 18 = 1998$ ； $125 \times 16 = 2000$ ； $143 \times 14 = 2002$ ； $167 \times 12 = 2004$ ——各乘积近似相等（相对偏差 $< 0.2\%$ ），玻意耳定律成立。

(3) 过原点的直线。 $pV = C \rightarrow p = C \cdot \frac{1}{V}$ ， p 与 $1/V$ 成正比，图像为过原点直线——比 $p-V$ 双曲线更容易判断“是否成正比”。

(4) 漏气 $\rightarrow$ 气体质量减少 $\rightarrow$ 同一体积下压强偏小 $\rightarrow pV$ 乘积偏小；且压缩越狠（ V 越小）漏得越多，乘积偏离越明显。

答：(1) 保证等温；(2) $pV \approx 2000$ 恒定，定律成立；(3) 过原点直线， $p \propto 1/V$ ；(4) 乘积偏小且 V 越小偏差越大。

易错点：(1) 本实验三个前提：质量一定、温度不变、压强大时气体不能太稀薄（理想气体近似）；(2) 画图验证用 $p-1/V$ 直线更“硬”，双曲线肉眼难辨；(3) 漏气是系统误差：乘积系统性偏小，不是随机波动。

C5 解析（玻璃管-水银柱封闭气体）

思路：水银柱封闭气体的压强 = 大气压 $\pm$ 水银柱产生的压强（开口向上加压、开口向下减压）；等温变化用玻意耳定律 $p_1 L_1 = p_2 L_2$ 。

规范解：

$$(1) \text{ 开口向上: } p_1 = p_0 + h = 76 + 19 = 95 \text{ cmHg}。$$

$$(2) \text{ 倒转开口向下: } p_2 = p_0 - h = 76 - 19 = 57 \text{ cmHg}；$$

$$\text{等温: } p_1 L_1 = p_2 L_2, L_2 = \frac{95 \times 15}{57} = 25 \text{ cm}。$$

$$(3) \text{ 水平: } p_3 = p_0 = 76 \text{ cmHg}; L_3 = \frac{95 \times 15}{76} = 18.75 \text{ cm} \approx 18.8 \text{ cm}。$$

答：(1) 95 cmHg；(2) 25 cm；(3) 18.8 cm。

易错点：(1) 压强单位用 cmHg 时，直接加减水银柱高度，别换算成 Pa 再算回来；(2) 倒转后是“减压”($p_0 - h$) 不是加压——气体体积增大， $L_2 > L_1$ 是自洽检查；(3) 玻璃管长度要足够 (本题 $25 + 19 = 44$ cm)，水银不流出是隐含条件。

C6 解析 (气体变质量·打气与抽气)

思路：变质量问题统一用“等效等压变换”处理：把球内气体和打进的空气都折算成同一压强下的体积，再按玻意耳定律求末态压强。抽气是每次“按体积比降压”，是等比数列。

规范解：

(1) 打 10 次后，1 atm 下气体总体积 $= 2.0 + 10 \times 0.1 = 3.0$ L；球容积不变： $p = \frac{3.0}{2.0} \times 1.0 = 1.5$ atm。

(2) 爆裂前最多： $\frac{2.0 + 0.1n}{2.0} \leq 2.5 \rightarrow 0.1n \leq 3.0 \rightarrow n \leq 30$ ，最多打 30 次。

(3) 每次抽出 $V = 0.2$ L：抽后压强 $p_1 = p_0 \frac{V_0}{V_0 + V} = 1.0 \times \frac{2.0}{2.2}$ ；第 n 次后 $p_n = p_0 \left(\frac{2.0}{2.2}\right)^n = 1.0 \times \left(\frac{10}{11}\right)^n$ atm。

本质区别：打气是“质量增加” (压强上升)，抽气是“质量减少” (压强下降)；打气时每次等量气体进入，抽气时每次按比例抽出，所以打气对应等差数列式累积、抽气对应等比衰减。

答：(1) 1.5 atm；(2) 30 次；(3) $p_n = (10/11)^n$ atm。

易错点：(1) 打气折算时“球内原有气体也要算”，别只算打进的部分；(2) 抽气每抽一次压强乘 $V_0/(V_0 + V)$ ，指数式衰减——别写成等差数列；(3) 温度不变的隐含条件必须说明，否则玻意耳定律不适用。

本章综合·S 层

S1 解析 (三定律串线)

思路：三段过程各判一步：B→A 等压 (V/T 常数)、B→C 等容 (p/T 常数)、C→D 等温 (pV 常数)；段间状态量衔接。

规范解：

(1) A→B 等压： $V_A/T_A = V_B/T_B$ ， $T_B = 300 \times 6.0/4.0 = 450$ K。

(2) B→C 等容， $p_B = p_0 = 1.0 \times 10^5$ Pa： $p_B/T_B = p_C/T_C$ ， $T_C = 450 \times 1.5 \times 10^5 / 1.0 \times 10^5 = 675$ K。

(3) C→D 等温， $V_C = 6.0$ L： $T_D = T_C = 675$ K，

$p_D = p_C \cdot V_C/V_D = 1.5 \times 10^5 \times 6.0/4.0 = 2.25 \times 10^5$ Pa。

A 状态 $T_A = 300$ K，D 状态 $T_D = 675$ K，温度不同。

答： $T_B = 450$ K； $T_C = 675$ K； $p_D = 2.25 \times 10^5$ Pa，A、D 温度不同。

易错点：等温压缩的“温度不变”是对 C→D 段而言 ($T_D = T_C$)，不等于 $T_D = T_A$ ——

只有 A、D 落在同一条等温线上才有 T 相同，判断要算出来，不能想当然。

S2 解析 (p-V 图与微观解释)

思路：A→B 等温 ($pV = 2 \times 10^5 \times 2 = 4 \times 10^5 = 1 \times 10^5 \times 4 \checkmark$)；B→C 等压；温度由 V 判断，压强微观解释分“数密度 + 平均动能”两方面。

规范解：

(1) A→B 为等温膨胀： $p_A V_A = 2.0 \times 10^5 \times 2.0 = 4.0 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{L}$ ， $p_B V_B = 1.0 \times 10^5 \times 4.0 = 4.0 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{L}$ ，乘积不变，等温过程。温度不变 → 分子平均动能不变。

(2) B→C 等压： $p_C = p_B = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。体积从 4.0 L 增至 6.0 L，由 $V/T = \text{常数}$ ， $T_C > T_B$ ，温度升高。

(3) A 状态体积小，气体质量一定 → A 状态单位体积内分子数（数密度）更大；两状态温度相同 → 分子平均动能相同，但 A 态数密度大，单位时间碰撞器壁的分子数更多，故 A 态压强 ($2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$) 大于 B 态 ($1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$)。

答：A→B 平均动能不变； $p_C = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，B→C 温度升高；A 态数密度大、每次碰撞动能相同但碰撞频率高，故压强更大。

易错点：压强比大小不能只盯“分子撞得多猛”，还要看“撞得多勤”——数密度和平均动能两个因素一个都不能漏；等温线上 p 大的一侧就是 V 小、数密度大的一侧。

0.4 内能：分子动能与分子势能之和

例题 2.1 解析

思考路径：

- 读题：“绝热” → $Q = 0$ ，与外界无热交换；
- “压缩、体积减半” → 体积减小，外界对气体做功， $W > 0$ ；
- 代入 $\Delta U = Q + W = 0 + W > 0$ → 内能增加、温度升高；
- 生活对应：打气筒筒壁发热，就是这个过程的现场版。

规范解：绝热 $Q = 0$ ，外界对气体做功 $W > 0$ ，

$$\Delta U = Q + W = W > 0。$$

答：内能增加、温度升高。

易错点：“绝热”不是“温度不变”——绝热是 $Q = 0$ ，此时内能只随做功变；绝热压缩升温、绝热膨胀降温是高频结论，别和等温混。

A1 解析

思路：逐项对照内能的定义与性质。

规范解：A 对：内能是物体内所有分子热运动动能与分子势能之和；B 对：分子永不停息地运动，内能永不为零；C 对：理想气体无分子势能，内能只由温度决定，温度升高内能必增大；D 对：做功与热传递是改变内能的两种方式。

选 A、B、C、D。

易错点：B 项是易错点——机械能为零不等于内能为零（静止的物体分子仍在热运动）；C 项注意前提“理想气体”。

A2 解析

思路：从“能量的来源与去向”区分两种方式的本质。

规范解：做功改变内能是宏观能量的转化——通过摩擦、压缩等把机械能（或其他形式的能）转化为内能；热传递改变内能是微观能量的转移——高温物体把内能转移给低温物体，能量形式不变，只是“搬运”。两者效果相同（都使内能改变相同量），但本质不同。

易错点：说“热传递也是做功”是错的；做功必有宏观位移（力 $\times$ 位移），热传递靠的是温差。

A3 解析

思路：等温 $\rightarrow$ 温度不变 $\rightarrow$ 理想气体内能不变 ($\Delta U = 0$)；体积增大 $\rightarrow$ 气体对外做功 ($W < 0$)。

规范解：

(1) 等温过程温度不变，理想气体内能只由温度决定， $\Delta U = 0$ 。

(2) 体积增大，气体对外做功。

(3) 由 $\Delta U = Q + W$ ： $0 = Q + W$ ， $W < 0$ ，故 $Q > 0$ ，气体吸热。

答：内能不变；气体对外做功；吸热（吸的热全部转化为对外做的功）。

易错点：“等温吸热全做功”成立的前提是理想气体 ($\Delta U = 0$)；对非理想气体等温过程内能也可能变化（势能变）。

0.5 热力学第一定律：能量守恒在热学

例题 2.2 解析

思考路径：

- 关键词：“绝热压缩” $\rightarrow Q = 0$ ， $W > 0$ （外界对气体做功）；
- “体积减半”确认压缩方向；
- 预期检查：压缩该升温（绝热），结果 $\Delta U > 0$ 与打气筒发热的经验一致。

规范解：绝热 $Q = 0$ ；体积减小，外界对气体做功 $W > 0$ 。

$$\Delta U = Q + W = W > 0。$$

答：内能增加、温度升高。

易错点：四个“零”要先认全——绝热看 Q 、等容看 W 、等温看 ΔU ；本题同时出现“绝热”与“压缩”， Q 和 W 的符号都要判对。

A4 解析

思路：等容 $\rightarrow W = 0$ ， Q 全部转化为内能。

规范解：

(1) 体积不变，气体不做功，外界也不做功， $W = 0$ 。

(2) $\Delta U = Q + W = 500 + 0 = 500 \text{ J}$ 。

答：不做功；内能增加 500 J。

易错点：等容过程中“体积不变 $\rightarrow W = 0$ ”要先写出来，再代入公式；吸热为正，内能增加。

A5 解析

思路：绝热 $Q = 0$ ；膨胀对外做功 $W < 0$ 。

规范解： $\Delta U = Q + W = 0 + (\text{负}) < 0$ ，内能减小；理想气体内能只由温度决定，内能减小 $\rightarrow$ 温度降低。

选 B。

易错点：绝热膨胀是“对外做功、自己降温”，与绝热压缩正好相反；看到“绝热”先写 $Q = 0$ ，再判 W 正负。

A6 解析

思路：注意符号约定——“气体对外做功”则 W （外界对气体做功）为负。

规范解： $Q = +300 \text{ J}$ （吸热），气体对外做功 120 J，即 $W = -120 \text{ J}$ 。

$$\Delta U = Q + W = 300 + (-120) = 180 \text{ J}。$$

答：气体内能增加 180 J。

易错点：符号陷阱——“气体对外做功 120 J”在公式里 W 是 -120 J ；若误当正号，会得出 420 J 的错误答案。

0.6 热力学第二定律：热量不会自动倒流

例题 2.3 解析

思考路径：

- 最大效率 $\rightarrow$ 卡诺效率 $\eta = 1 - T_2/T_1$ ；

- 代入 $T_1 = 500\text{ K}$ 、 $T_2 = 300\text{ K}$ ；

- 追问“差在哪”：理想卡诺已经假设无摩擦、准静态，仍要向低温热源排热；实际热机还有摩擦、散热等不可逆损失。

规范解： $\eta = 1 - T_2/T_1 = 1 - 300/500 = 0.4 = 40\%$ 。

答：最大效率 40%；实际蒸汽机效率约 30%，低于 40% 是因为摩擦、散热、非准静态等不可逆损失。

易错点：卡诺效率只由两个热源温度决定，提高效率的关键是提高高温热源温度 T_1 ；“40% 是理论天花板”意味着无论怎么改进，不提高 T_1 就突破不了。

A7 解析

思路：第二定律禁止的是“自发”与“不留下影响”，逐项对号。

规范解：A 错：热量不能自发地从低温传到高温——空调耗电搬运不算自发；B 错：从单一热源吸热完全变功且不产生其他影响正是第二类永动机，违背开尔文表述；C 错：热机必须排热，效率不可能达 100%；D 对：第二类永动机不违背能量守恒（第一定律），但违背第二定律。

选 D。

易错点：第一定律管“能量守恒不守恒”，第二定律管“过程能不能自发发生”——两个定律都满足的过程才可能实现。

A8 解析

思路：卡诺效率公式直接代入，T 用开尔文。

规范解： $\eta = 1 - T_2/T_1 = 1 - 300/600 = 0.5 = 50\%$ 。

答：最大效率 50%。

易错点：温度要用开尔文；若题目给摄氏温度必须先换算。

A9 解析

思路：熵增定律：孤立系统熵永不减少。

规范解：A 错：孤立系统熵永不减少（只可能增大或不变）；B 对：熵是混乱程度量度，孤立系统熵永不减少；C 错：热量自发从高温传到低温使系统趋于均匀，是**熵增大**的过程；D 错：能量守恒，能量不会凭空消灭，第二定律说的是能量转化方向的限制。

选 B。

易错点：“热量自发流动方向”与“熵增减”的对应关系——自发传热（有序变均匀）是熵增；把 C 说成熵减是常见的张冠李戴。

B 层·真题研习

B1 解析（2024·福建卷）

思路：温度不变 → 等温（玻意耳定律） $p_1 L_1 S = p_2 L_2 S$ ；水位下降 → 管外压差变小 → 空气柱变长 → 体积增大 → 对外做正功；等温 $\Delta U = 0$ ，对外做功则吸热补充能量。

规范解： $p_1 L_1 S = p_2 L_2 S$ ， $L_2 = p_1 L_1 / p_2$ 。

水位下降使管内外压强差变小，空气柱变长（ $L_2 > L_1$ ），气体体积增大，**对外做正功**。

答： $L_2 = p_1 L_1 / p_2$ ；对外做正功（等温膨胀，同时从外界吸热）。

易错点：“水柱高度差”决定气压——水位下降 → 压差变小 → 气体压强减小 → 空气柱变长；玻意耳 + 热一律 + 符号约定一题三考。

B2 解析（2023·江苏卷）

思路：p-T 图沿过原点的直线 → 斜率 p/T 不变 → 等容；密闭容器体积不变 → 数密度不变；温度升高 → 平均动能增大、压强增大。

规范解：A 错：p-T 图中过原点的直线斜率 $\frac{p}{T} = \frac{C}{V}$ 不变 → V 不变，分子数不变 → 数密度不变；B 对：温度升高，分子平均动能增大；C 错：压强增大 → 单位面积器壁受力增大（不是减小）；D 错：压强增大且体积不变 → 单位时间碰撞器壁分子数增多（不是减小）。

选 B。

易错点：p-T 图过原点直线是“等容”的标志——用斜率关系 $\frac{p}{T} = \frac{nR}{V}$ 判断；温度升高从分子动理论看“动能增大、碰撞更猛”，与“碰撞更勤”要一起想。

B3 解析（2022·江苏卷）

思路：分子动理论的两个结论逐一核对：数密度与体积、压强与碰撞、理想气体条件、速率分布与温度。

规范解：A 错：体积增大，分子数不变，数密度减小；B 错：气体压强来源于分子对器壁的碰撞（理想气体分子间无作用力），与分子间斥力无关；C 错：能否看成理想气体取决于分子间距是否足够大、相互作用能否忽略，不是“分子小”就行；D 对：温度变化时分子速率分布发生变化，各速率区间的分子数占比随之改变（温度越高，速率大的分子占比增大）。

选 D。

易错点：理想气体的压强是“碰撞效应”不是“斥力效应”——这是分子动理论最常被误判的选项；“分子小 = 理想气体”是把必要不充分当充分。

C 层·创新拓展

C1 解析（空调与热力学定律）

思路：能量守恒求 Q_1 ；制冷系数定义 Q_2/W ；“违不违背第二定律”关键看是否“自发”。

规范解：

(1) 由能量守恒： $Q_1 = Q_2 + W = 2000 + 500 = 2500 \text{ J}$ 。

(2) 制冷系数 $= Q_2/W = 2000/500 = 4$ ，含义：消耗 1 J 电能可“搬走”4 J 热量——这是热泵类装置“省电”的物理来源。

(3) 不违背。热力学第二定律说的是热量**不能自发**地从低温传到高温；空调靠消耗电能（外界对系统做功）强制搬运热量，不是自发过程。同时它满足热力学第一定律（能量守恒： $2500 = 2000 + 500$ ）。两个定律都满足，所以“合法”。

答： $Q_1 = 2500 \text{ J}$ ；制冷系数 4；不违背第二定律（耗电强制搬运，非自发）。

易错点：第二定律从不禁止“费点代价倒流热量”，禁止的是“白拿”；判断是否违背只看过程是否自发、是否产生其他影响，而不是看热流方向。

C2 解析（冰水混合物与内能）

思路：温度不变 $\rightarrow$ 平均动能不变；熔化是相变 $\rightarrow$ 吸收热量主要用于“拆晶格”（增大分子势能）。

规范解：

(1) 温度保持 $0^\circ\text{C} \rightarrow$ 分子平均动能不变。

(2) 冰熔化吸收热量，内能增大；温度没变（平均动能不变），增大的内能全部来自分子势能增大——熔化破坏冰的晶体结构，分子间距改变、势能上升。

(3) 冰吸收的热量 $Q > 0$ ，冰熔化时体积变化极小可视为不做功（ $W \approx 0$ ），由 $\Delta U = Q + W$ ，热量全部转化为内能，即转化为分子势能的增加。

答：平均动能不变；内能增大，来自分子势能；热量转化为分子势能。

易错点：以为“温度不变 = 内能不变”——那是理想气体（无势能）的结论；晶体熔化（ 0°C 冰 $\rightarrow$ 水）是“温度不变、内能增大”的经典反例，增的是分子势能。

C3 解析（热机效率·开放探究）

思路：效率 = 有用功/总能量；热机散失的能量去向要按“热力学第二定律”的视角归类；提高效率的思路本质是“减少不必要的散热与摩擦、提高燃烧与做功的利用率”。

规范解：

(1) 1 L 汽油质量 $m = 0.7 \text{ kg}$ ；总能量 $Q = 0.7 \times 4.6 \times 10^7 = 3.22 \times 10^7 \text{ J}$ ；

有用功 $W = \eta Q = 0.3 \times 3.22 \times 10^7 \approx 9.7 \times 10^6 \text{ J}$ 。

(2) 能量去向：(1) 废气带走大量内能（高温废气直接排入大气——最大的一项）；(2) 冷却系统散热（水箱/风扇带走的热量）；(3) 机械摩擦损耗（活塞、曲轴等）；(4) 不完全燃烧损失。按热力学第二定律，热机不可能把所有热量转化为机械功，必须向低温热源排热。

(3) 可行途径 (答出两条即可): (1) 提高压缩比/燃烧效率——让燃料更充分燃烧、提高循环最高温度 (卡诺效率随高温热源温度升高而升高); (2) 废气涡轮增压/余热回收——把废气带走的热能再利用; (3) 降低摩擦——用低摩擦材料与润滑油; (4) 改进燃烧室设计, 减少不完全燃烧与散热。

答: (1) 约 $9.7 \times 10^6 \text{ J}$; (2) 废气、冷却散热、摩擦、不完全燃烧; (3) 见上 (任意两条)。

易错点: (1) 效率是“有用功/总能量”, 别把散失能量当有用功; (2) 热力学第二定律决定了“效率不可能为 100%”——“减少损耗” $\neq$ “消灭损耗”; (3) 开放题答题要“现象+原理”, 只写“提高效率”不给原理不得分。

本章综合·S 层

S1 解析 (热一律+等压过程)

思路: 等压膨胀对外做功 $W = p\Delta V$; $\Delta U = Q - W$ (气体对外做功取负, 或写成 $\Delta U = Q + W'$, $W' = -p\Delta V$); 平均动能看温度。

规范解:

$$(1) \Delta V = 4.0 - 2.0 = 2.0 \text{ L} = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3,$$

$$W = p\Delta V = 1.0 \times 10^5 \times 2.0 \times 10^{-3} = 200 \text{ J} \text{ (气体对外做功)}。$$

$$(2) \Delta U = Q - W = 700 - 200 = 500 \text{ J}。$$

$$(3) \text{温度从 } 300 \text{ K 升到 } 600 \text{ K, 分子平均动能增大。}$$

答: 对外做功 200 J; 内能增加 500 J; 平均动能增大。

易错点: 单位换算 ($\text{L} \rightarrow \text{m}^3$, $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$); “对外做功”在 $\Delta U = Q - W$ 中直接减, 在 $\Delta U = Q + W$ 中要带负号——两种写法只用一种, 别混用。

S2 解析 (卡诺热机与效率边界)

思路: 卡诺效率公式; 实际效率 $\eta = W/Q_1$ 与能量守恒 $Q_2 = Q_1 - W$; 第三问回到第二定律的“必须排热”。

规范解:

$$(1) \eta_c = 1 - T_2/T_1 = 1 - 400/800 = 0.5 = 50\%。$$

$$(2) W = \eta \cdot Q_1 = 0.30 \times 2.0 \times 10^4 = 6.0 \times 10^3 \text{ J};$$

$$Q_2 = Q_1 - W = 2.0 \times 10^4 - 6.0 \times 10^3 = 1.4 \times 10^4 \text{ J}。$$

(3) 热机必须向低温热源排热 (第二定律开尔文表述: 不可能从单一热源吸热全部变功而不留下影响)。卡诺效率 50% 是“不留额外影响”时的理论上限; 实际热机还有摩擦、散热、非准静态等不可逆因素, 效率必小于卡诺效率。

答: 卡诺效率 50%; $W = 6.0 \times 10^3 \text{ J}$, $Q_2 = 1.4 \times 10^4 \text{ J}$; 实际效率低于卡诺效率是因为不可逆损失+第二定律“必须排热”。

易错点: 卡诺效率是“天花板”, 实际效率只可能更低; 计算中 $W = Q_1 - Q_2$ 与 $Q_2 = Q_1 - W$ 是同一关系, 注意谁减谁别反。

0.7 光的反射与折射：斯涅尔定律

例题 3.1 解析

思考路径：

- 读题：“光从水射向空气” → 光密（水）到光疏（空气），用临界角公式 $\sin C = n_{\text{疏}}/n_{\text{密}}$ ；
- $n_{\text{密}} = 1.33$, $n_{\text{疏}} = 1$ ；
- “圆窗”想物理图景：只有小于临界角的光才能出射，水上世界被压在锥角 $2C$ 的圆锥里，锥外全反射。

规范解： $\sin C = \frac{n_{\text{疏}}}{n_{\text{密}}} = \frac{1}{1.33} \approx 0.752$, $C \approx 49^\circ$ 。

答：临界角约 49° ；潜水员看到的“圆窗”由临界角决定——超过 49° 的光全部反射回水中，看不到。

易错点：全反射必须先判方向（光密 → 光疏），光从空气射入水中永远不发生全反射；“圆窗”的锥角是 $2C$ （约 98° ），别只说 49° 。

A1 解析

思路：斯涅尔定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, $n_1 = 1$, $n_2 = 1.5$ 。

规范解： $\sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 / n_2 = 1 \times \sin 60^\circ / 1.5 = 0.866 / 1.5 \approx 0.577$, $\theta_2 \approx 35^\circ$ 。

答：折射角约 35° 。

易错点：光从光疏进光密，折射角小于入射角（ $35^\circ < 60^\circ$ ）——算出来折射角比入射角大就说明代反了。

A2 解析

思路：玻璃射向空气（光密 → 光疏）， $\sin C = 1/n$ ；入射角与临界角比较。

规范解：

(1) $\sin C = 1/1.5 \approx 0.667$, $C \approx 42^\circ$ 。

(2) 入射角 $50^\circ >$ 临界角 42° ，发生全反射——光全部反射回玻璃中，没有折射光。

答：临界角约 42° ；入射角 50° 时发生全反射。

易错点：判断全反射要“两个条件一起看”——方向（光密 → 光疏）+ 角度（入射角 $\geq C$ ）；本题方向、角度都满足。

A3 解析

思路：逐项核对全反射的条件与折射率的定义。

规范解：A 错：光从空气（光疏）进入水（光密），不会发生全反射；B 错：入射角大于等于临界角才全反射，小于临界角只会折射；C 对：海市蜃楼（空气密度梯度导致的光线弯曲与全反射）、光纤通信都是全反射的应用；D 错： $n = c/v$ ， n 越大 v 越小。

选 C。

易错点：“光疏进光密”永远不全反射，反过来“光密进光疏”角度够了才全反射；折射率大意味着光速小，二者成反比。

0.8 光的波动性：干涉、衍射、偏振

例题 3.2 解析

思考路径：

- 读题：给了 d 、 L 、 Δx ，求 $\lambda \rightarrow$ 变形公式 $\lambda = \frac{d\Delta x}{L}$ ；
- 单位统一成米： $d = 0.5 \text{ mm} = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ， $\Delta x = 1.3 \text{ mm} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}$ ；
- 量级检查：算出的 λ 应在 10^{-7} m （数百 nm）量级。

规范解： $\lambda = \frac{d\Delta x}{L} = \frac{0.5 \times 10^{-3} \times 1.3 \times 10^{-3}}{1} = 6.5 \times 10^{-7} \text{ m} = 650 \text{ nm}$ 。

答：波长 650 nm，是红光。

易错点：单位不统一是双缝题第一失分点；条纹间距与波长成正比——换绿光（波长变短）条纹变密，换红光变疏。

A4 解析

思路： $\Delta x = L\lambda/d$ ，单位全换 m。

规范解： $\lambda = 500 \text{ nm} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$ ， $d = 0.2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。

$$\Delta x = 1 \times 5 \times 10^{-7} / (2 \times 10^{-4}) = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.5 \text{ mm}。$$

答：相邻亮纹间距 2.5 mm。

易错点： $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ；算完检查量级——双缝到屏 1 m、缝距 0.2 mm 时条纹间距在毫米量级，正常。

A5 解析

思路：换波长，其他量不变， Δx 与 λ 成正比。

规范解： $\lambda_2/\lambda_1 = 700/500 = 1.4$ ， $\Delta x_2 = 2.5 \times 1.4 = 3.5 \text{ mm}$ 。

条纹间距从 2.5 mm 变为 3.5 mm，条纹变疏。

答：间距 3.5 mm，条纹变疏。

易错点：红光波长比绿光长 → 条纹更宽；“变疏”指间距变大，别把方向和波长关系记反。

A6 解析

思路：对号入座——哪个现象证明什么。

规范解：A 错：声波是纵波，不能偏振；B 对：单缝衍射中央亮纹最宽最亮；C 错：干涉只能说明光是波，说明“横波”靠的是偏振；D 错：肥皂泡彩色条纹是薄膜干涉，不是衍射。

选 B。

易错点：干涉、衍射证明“光是波”，偏振证明“光是横波”——三个现象各自“管”哪件事要分清楚；“薄膜干涉”与“衍射”别混。

0.9 光速与电磁波谱：光也是电磁波

例题 3.3 解析

思考路径：

- 波长、频率、波速关系： $c = \lambda f$ ；
- 单位换算： $500 \text{ nm} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$ ；
- 量级检查：可见光频率 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ Hz}$ 。

规范解： $f = c/\lambda = 3 \times 10^8 / (5 \times 10^{-7}) = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。

答：频率约 $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ （每秒振荡 600 万亿次）。

易错点：nm 与 m 的换算 ($\times 10^{-9}$)；算完检查量级在 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ Hz}$ ，若得 10^6 Hz 就是单位错了。

A7 解析

思路：频率由光源决定不变； $v = c/n$ ； $\lambda = v/f = \lambda_0/n$ 。

规范解：

- (1) 频率不变（由光源决定）。
- (2) $v = c/n = 3 \times 10^8 / 1.33 \approx 2.26 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；
 $\lambda = v/f = \lambda_0/n = 600 / 1.33 \approx 451 \text{ nm}$ 。

答：频率不变；水中波速约 $2.26 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，波长约 451 nm。

易错点：“光进介质频率不变”是核心；波长变短 ($600 \rightarrow 451 \text{ nm}$)，如果用 λ_0/n 一步算最方便，别先算频率再绕。

A8 解析

思路：电磁波谱按波长从长到短、频率从低到高排列。

规范解：频率从低到高：无线电波 → 红外线 → 可见光 → 紫外线 → γ 射线。

答：无线电波、红外线、可见光、紫外线、 γ 射线。

易错点：记忆顺序要“一条线”背下（无线电-微波-红外-可见-紫外-X- γ ）；红外和紫外谁在可见光“外”哪个方向要想清楚。

A9 解析

思路： $\lambda = c/f$ ，电磁波在真空中速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

规范解： $\lambda = 3 \times 10^8 / (100 \times 10^6) = 3 \text{ m}$ 。

答：波长 3 m。

易错点： $100 \text{ MHz} = 100 \times 10^6 \text{ Hz}$ ，别把 M (10^6) 漏掉；无线电波波长在米量级，与可见光 (10^{-7} m) 相差悬殊。

B 层 · 真题研习

B1 解析 (2024 · 天津卷)

思路：光学选择题的常客题型“谁揭什么、谁靠什么”——每个现象对号入座。

规范解：A 错：光电效应揭示的是光的**粒子性**；B 错：光从真空进入介质，频率不变、波速变小、波长变短 ($\lambda = v/f$)；C 对：光纤通信利用光的全反射；D 错：油膜彩色条纹是**薄膜干涉**，不是偏振。

选 C。

易错点：光电效应 → 粒子性、光纤 → 全反射、油膜彩色 → 薄膜干涉、偏光镜 → 偏振——这个对应表要背熟，是近代光学题的“送分账”。

B2 解析 (2024 · 辽宁卷)

思路： $\Delta x = L\lambda/d$ ，问“怎样使间距变小” → 让 d 变大、 λ 变小或 L 变小。

规范解：A 对：换更粗的头发丝，双缝间距 d 变大， $\Delta x = L\lambda/d$ 变小；B 错：红光波长比绿光大， λ 变大 → Δx 变大；C 错：增大纸板与墙距离即 L 增大 → Δx 变大；D 错：改变光源与纸板的距离不影响 Δx (Δx 只由 L、 λ 、d 决定)。

选 A。

易错点：双缝干涉的“三个变量” (L、 λ 、d) 各自对间距的作用方向要记牢；光源位置与条纹间距无关，只影响亮暗程度。

B3 解析 (2022 · 北京卷)

思路：横波的特有性质是能偏振。

规范解：偏振是横波特有的现象，光的偏振说明光是横波。衍射、折射、干涉纵波（如声波）

同样能发生，只能说明“光是波”，不能区分横波纵波。

选 C。

易错点：问“说明横波”只选偏振；问“说明波动性”可选干涉/衍射——看清题干问的是哪一个。

C 层·创新拓展

C1 解析（光纤通信·全反射的现代版）

思路：全反射方向是芯层（光密）→包层（光疏）， $\sin C = n_2/n_1$ ；速度用 $v = c/n_1$ ；路径问题想“之”字形。

规范解：

$$(1) \sin C = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.48}{1.5} \approx 0.987, C \approx 81^\circ.$$

(2) 入射角 $83^\circ >$ 临界角 81° ，能发生全反射，光被完全反射回芯层。

(3) $v = c/n_1 = 3 \times 10^8 / 1.5 = 2 \times 10^8$ m/s。光沿“之”字形路径前进，实际路径是斜线，斜线长度大于沿轴线的直距离，所以沿轴线前进 1 m 对应光实际走的路径更长，这也使光信号在光纤中传播的时间比沿直线略长。

答：临界角约 81° ； 83° 能全反射；芯层光速 2×10^8 m/s，之字形路径比轴线距离长。

易错点：全反射方向是芯 → 包（光密 → 光疏），公式分子是包层折射率；“传播时间”题要用实际路径长 ÷ 光速，不能用轴线距离。

C2 解析（偏光太阳镜·偏振的应用）

思路：抓住“反射光是部分偏振光（水平振动为主）+ 偏光片只让特定方向通过”。

规范解：

(1) 水面反射光主要沿水平方向振动；偏光太阳镜镜片只让竖直方向振动的光通过，把水平振动的反射光滤掉，所以眩光大大减弱。

(2) 普通镜片对各个方向的振动“一视同仁”，只是整体减光，无法针对性地滤掉反射光，效果远不如偏光镜。

(3) 水面、潮湿路面的反光都是部分偏振光（水平振动为主），直射入眼造成眩光；偏光镜恰好“卡掉”水平振动，保留从物体本身来的、振动方向杂乱的光，视线立刻清晰——这就是驾驶偏光镜的原理。

答：偏光镜利用“反射光偏振 + 镜片选振方向”滤除水平振动反射光。

易错点：不是“所有反射光都被滤掉”，而是“振动方向与镜片透振方向垂直的反射光被滤掉”；这题考的是偏振方向与透振方向的配合。

C3 解析（光路作图·折射与全反射）

思路：折射定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ；全反射条件：光从光密介质射向光疏介质且入射角 $\geq$ 临界角（ $\sin C = \frac{1}{n}$ ）；作图时折射光线向法线靠拢（光密）或远离法线（光疏）。

规范解：

(1) 作图：法线过入射点垂直界面；入射角 45° 标在入射光线与法线之间；由 $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ ：
$$\sin r = \frac{\sin 45^\circ}{\sqrt{2}} = \frac{0.707}{1.414} = 0.5, r = 30^\circ$$
。折射光线向法线靠拢（玻璃是光密介质）。

(2) $\sin C = \frac{1}{n} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707, C = 45^\circ$ 。入射角 $60^\circ >$ 临界角 $45^\circ \rightarrow$ 发生全反射：光路图中只有反射光线，无折射光线，反射角 = 入射角 = 60° 。

(3) 水中临界角 $\sin C = \frac{1}{4/3} = 0.75, C \approx 48.6^\circ$ ；入射角 $60^\circ > 48.6^\circ \rightarrow$ 发生全反射。光路图：入射光线射到水面，反射光线回到水中（反射角 60° ），无折射光线。

答：(1) 30° ；(2) 45° ， 60° 入射发生全反射；(3) 能，全反射。

易错点：(1) 全反射必须满足“光密 $\rightarrow$ 光疏”——光从空气射向玻璃永远不会全反射；(2) 临界角公式 $\sin C = 1/n$ 里的 n 是光密介质折射率；(3) 画图时折射角、反射角都是“与法线的夹角”，不是与界面的夹角。

C4 解析（插针法测玻璃折射率）

思路：光沿直线传播 + 光路可逆—— P_1 、 P_2 确定入射光线方向， P_3 、 P_4 与 P_1 、 P_2 的像重合确定出射光线方向，连接两光线延长线在玻璃砖内的交点即得内部光路，量出入射角、折射角代入折射定律。

规范解：

(1) 步骤：(1) 白纸上画出玻璃砖两界面，插 P_1 、 P_2 确定入射光线（两针相距远些）；(2) 透过玻璃砖观察 P_1 、 P_2 的像，移动另一侧插 P_3 使它与 P_1 、 P_2 的像在同一条直线上，再插 P_4 与 P_3 及两像共线；(3) 连接 P_3 、 P_4 得折射光线，反向延长与出射界面相交，与入射光线在入射界面的交点连线即玻璃内光路；(4) 用量角器量 i 、 r ，算 $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ ，多次测量取平均。

$$(2) n = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ} = \frac{0.707}{0.5} \approx 1.41。$$

(3) 可以。插针法只依赖“光沿直线传播”和“折射定律”，玻璃砖两表面是否平行不影响折射定律本身——楔形砖同样能确定入射光线与出射光线，只是作图时内部光路略有不同，仍可算出 n 。

(4) 误差来源：大头针插得歪、视线方向不正（应透过玻璃砖沿光路观察）、量角器读数误差、玻璃砖界面画线不准。减小方法：大头针间距大些（角度误差小）、入射角取大些（ 30° 60° ）、多次测量取平均值。

答：(1) 见上；(2) 约 1.41；(3) 可以，折射定律与界面平行性无关；(4) 见上。

易错点：(1) 四根针共线判据是“透过玻璃砖看 P_3 、 P_4 挡住 P_1 、 P_2 的像”，不是肉眼看针本身；(2) 入射角、折射角都以法线为基准；(3) 楔形砖时“玻璃内光路”不再与两界面法线共面于同一平行光线——但折射定律仍成立。

本章综合 · S 层

S1 解析（折射 + 全反射综合）

思路：折射用斯涅尔定律；临界角 $\sin C = 1/n$ ；全反射比较入射角与 C 。

规范解：

$$(1) n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2: 1 \times \sin 45^\circ = \sqrt{2} \times \sin \theta_2,$$

$$\sin \theta_2 = (\sqrt{2}/2)/\sqrt{2} = 0.5, \theta_2 = 30^\circ。$$

$$(2) \sin C = \frac{1}{n} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}, C = 45^\circ。$$

(3) 入射角 $60^\circ >$ 临界角 45° ，光在玻璃-空气界面发生全反射。

答：折射角 30° ；临界角 45° ；入射角 60° 时发生全反射。

易错点：第一问注意光是从空气 ($n=1$) 入射，别把空气折射率写错；第二问 $\sin C = 1/n$ 里 n 是光密介质的折射率。

S2 解析（波动性综合）

思路：逐项核对干涉、衍射、偏振各自“证明什么”。

规范解：A 对： $\Delta x = L\lambda/d$ ，条纹间距与波长成正比；B 对：单缝衍射中央亮纹最宽、最亮；C 对：偏振证明光是横波；D 错：干涉、衍射纵波也能发生（如声波），只有偏振是横波特有的；E 对：白光含各种波长，中央（光程差为零）各色重叠为白色，两侧因波长不同条纹错开而呈现彩色。

选 A、B、C、E。

易错点：D 项是最隐蔽的陷阱——“干涉衍射证明波动性”不分横纵波，“偏振”才是横波的专属证明；白光的彩色条纹是“波长不同 $\rightarrow$ 条纹位置不同”造成的色散式分布。

0.10 光电效应：光是一份一份的

例题 4.1 解析

思考路径：

- 读题：给逸出功 W_0 ，求截止频率 $\rightarrow h\nu_0 = W_0$ ；
- 单位先行：2.5 eV 要换成焦耳 ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)；
- 给频率求最大初动能 $\rightarrow$ 决策链：先算光子能量 $h\nu$ ，再减逸出功得 E_{kmax} ——顺序不能乱。

规范解：

$$\nu_0 = W_0/h = (2.5 \times 1.6 \times 10^{-19})/(6.63 \times 10^{-34}) \approx 6.0 \times 10^{14} \text{ Hz};$$

$$h\nu = 6.63 \times 10^{-34} \times 7.5 \times 10^{14} \approx 4.97 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 3.1 \text{ eV};$$

$$E_{kmax} = h\nu - W_0 = 3.1 - 2.5 = 0.6 \text{ eV}。$$

答：截止频率约 $6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ，最大初动能 0.6 eV。

易错点：eV 与 J 换算必做 ($\times 1.6 \times 10^{-19}$)；光电效应永远走「光子能量 $\rightarrow$ 减逸出功 $\rightarrow$ 得动能」一条链，看到“截止频率/逸出功/最大初动能”立刻反应 $h\nu = W_0 + E_{kmax}$ 。

A1 解析

思路：三规律对号：截止频率、动能只与频率有关、光强决定数量。

规范解：A 对：发生光电效应的条件是 $\nu > \nu_0$ ；B 错：最大初动能只由频率决定，光强只改变光电子数目；C 对：光强越大，单位时间打出的光电子越多，饱和电流越大；D 对： $E_{kmax} = h\nu - W_0$ ，随频率线性增大。

选 A、C、D。

易错点：光强决定“数量”不决定“能量”——这是光电效应与经典波动说冲突的核心，也是选择题常设陷阱。

A2 解析

思路：先算光子能量 $h\nu = hc/\lambda$ ，再与逸出功比较。

规范解： $h\nu = hc/\lambda = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (500 \times 10^{-9}) \approx 3.98 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 2.49 \text{ eV}$ 。

(1) $2.49 \text{ eV} > 2.3 \text{ eV}$ ，能发生光电效应。

(2) $E_{kmax} = 2.49 - 2.3 = 0.19 \text{ eV}$ 。

答：能发生光电效应；最大初动能约 0.19 eV。

易错点：500 nm 换米是 $\times 10^{-9}$ （不是 $\times 10^{-6}$ ）；“恰好发生”的条件是 $h\nu = W_0$ ，本题 2.49 eV 略大于 2.3 eV，余量小，数字易算错。

A3 解析

思路： $E_{kmax} = h\nu - W_0$ ；遏制电压 $eU_c = E_{kmax}$ 。

规范解： $h\nu = 6.63 \times 10^{-34} \times 1.0 \times 10^{15} \approx 6.63 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 4.14 \text{ eV}$ ；

$E_{kmax} = 4.14 - 3.2 = 0.94 \text{ eV}$ ；

$U_c = E_{kmax}/e = 0.94 \text{ eV}/e = 0.94 \text{ V}$ 。

答：最大初动能 0.94 eV，遏制电压 0.94 V。

易错点：eV 除以电子电荷 e 数值上“eV 数 = 伏特数”（1 eV/e = 1 V），但要明白 U_c 的单位是 V；遏止电压与光强无关，只由频率和逸出功决定。

0.11 光的波粒二象性与物质波

例题 4.2 解析

思考路径：

• 读题：电子经 $U = 100 \text{ V}$ 加速 $\rightarrow$ 动能 $E_k = eU$ ；

- 求速度： $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$;
- 求波长： $\lambda = h/(mv)$;
- 比分辨率：与可见光（约 500 nm）比短了多少倍。

规范解：

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 100}{9.1 \times 10^{-31}}} \approx 5.9 \times 10^6 \text{ m/s};$$

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 5.9 \times 10^6} \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.12 \text{ nm}.$$

答：德布罗意波长约 0.12 nm，比可见光（约 500 nm）短 4000 多倍——波长越短分辨率越高，所以电子显微镜看得更细。

易错点：动能定理先求速度是必经步骤；0.12 nm 与 X 射线同量级；德布罗意波长与速度成反比——速度越快波长越短。

A4 解析

思路： $\lambda = h/(mv)$ ，直接代入；说明宏观物体波长小到不可测。

规范解： $\lambda = 6.63 \times 10^{-34} / (0.10 \times 10) \approx 6.6 \times 10^{-34} \text{ m}.$

答：子弹的德布罗意波长约 $6.6 \times 10^{-34} \text{ m}$ ，比原子核尺寸（ 10^{-15} m ）还小十几个数量级，远远小于任何实验可分辨的尺度，波动性完全观察不到——所以宏观物体“看”起来只表现出粒子性。

易错点：数量级检查——宏观物体的德布罗意波长必然是 10^{-34} m 量级的“天文数字般的小”；若算出 10^{-8} m 就是动量代错了。

A5 解析

思路：光子动量 $p = h/\lambda$ ，与光的粒子性（康普顿效应）对应。

规范解： $p = h/\lambda = 6.63 \times 10^{-34} / (500 \times 10^{-9}) \approx 1.33 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$

答：动量约 $1.33 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$

易错点： λ 要用米；光子动量极小（ 10^{-27} 量级），但碰撞时仍能“撞动”电子——这正是康普顿效应把波长撞长的原因。

0.12 原子结构：从汤姆孙到玻尔

例题 4.3 解析

思考路径：

- 先算两个能级的能量： $E_3 = -13.6/9 \approx -1.51 \text{ eV}$ ， $E_2 = -13.6/4 = -3.40 \text{ eV}$ ；
- 能级差 $\Delta E = E_3 - E_2 = 1.89 \text{ eV}$ ，换成焦耳；
- $\lambda = hc/\Delta E$ ；
- 对答案：算出约 660 nm，是红光，正好对应氢的 $H\alpha$ 谱线（真实值 656 nm）。

规范解： $\Delta E = -1.51 - (-3.40) = 1.89 \text{ eV} = 3.02 \times 10^{-19} \text{ J}$ ；

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{3.02 \times 10^{-19}} \approx 6.6 \times 10^{-7} \text{ m} = 660 \text{ nm}。$$

答：波长约 660 nm，是红光，可见光——这就是氢光谱 $H\alpha$ 线的来历。

易错点：能级差用“高能级－低能级”（正数）； $\lambda = hc/\Delta E$ 中 ΔE 必须用焦耳；算出的 660 nm 与 $H\alpha$ 真实值 656 nm 吻合，可作为验算基准。

A6 解析

思路： $n = 2 \rightarrow n = 1$ ， $\Delta E = E_2 - E_1$ ； $\lambda = hc/\Delta E$ ；波长短于 380 nm 即紫外。

规范解： $\Delta E = -3.40 - (-13.6) = 10.2 \text{ eV} = 1.632 \times 10^{-18} \text{ J}$ ；

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.632 \times 10^{-18}} \approx 1.22 \times 10^{-7} \text{ m} = 122 \text{ nm}。$$

答：光子能量 10.2 eV，波长约 122 nm，属紫外线（< 380 nm）。

易错点： $n = 2 \rightarrow n = 1$ 是氢原子最大的一级能级差（莱曼系首线），能量 10.2 eV、波长 122 nm，要背熟；能级差越大波长越短。

A7 解析

思路：玻尔模型“定态不辐射、跃迁才辐射”，光子能量等于能级差。

规范解：A 对：电子在某一能级（定态）上运动时不辐射能量；B 对： $E = h\nu = hc/\lambda$ ，能级差越大频率越高、波长越短；C 对：从高能级直接跃迁回基态的能级差最大，光子能量最大；D 对：辐射光子能量只能是能级差，而能级是量子化的，所以只能辐射特定能量的光子。

选 A、B、C、D。

易错点：能级图中“负值能量”越来越大（ $-13.6 \rightarrow -3.4 \rightarrow -1.51$ ）——从 n 大的能级跳回基态，能级差（绝对值）最大，光子能量最大。

0.13 原子核：衰变、核反应、质能方程

例题 4.4 解析

思考路径：

- 核反应题就两把尺子：质量数守恒、电荷数守恒；

- 先标已知核素的质量数/电荷数，再对 X 列方程；
- (1) 3X: 一个 X 的质量数 = $(235+1-144-89)/3$ ，电荷数 = $(92-56-36)/3$ ；
- (2) 单个 X: 质量数 = $14+4-17$ ，电荷数 = $7+2-8$ 。

规范解：

(1) 质量数: $235 + 1 = 144 + 89 + 3A \rightarrow A = 1$ ；电荷数: $92 = 56 + 36 + 3Z \rightarrow Z = 0$ 。X 为中子 ${}^1_0\text{n}$ 。

(2) 质量数: $14 + 4 = 17 + A \rightarrow A = 1$ ；电荷数: $7 + 2 = 8 + Z \rightarrow Z = 1$ 。X 为质子 ${}^1_1\text{H}$ 。

答: (1) X 是中子; (2) X 是质子。

易错点：先写方程再配平，质量数、电荷数分两条线各自守恒，别混在一起算；中子不带电 ($Z=0$)、质子 $Z=1$ ，靠 Z 分辨粒子种类。

A8 解析

思路：三种射线性质对比： α 电离强穿透弱， γ 电离弱穿透强， β 居中。

规范解：A 错： γ 电离能力最弱；B 错： α 穿透能力最弱（一张纸即可挡住）；C 对： β 射线是高速电子流；D 错： α 是氦核、 β 是电子，都是实物粒子流，只有 γ 是电磁波。

选 C。

易错点：“电离越强穿透越弱”此消彼长—— α 电离最强所以穿透最弱； γ 是唯一不带电的电磁波，穿透最强。

A9 解析

思路：半衰期公式 $N = N_0(1/2)^{(t/\tau)}$ ；24 天 = 3 个半衰期。

规范解： $t/\tau = 24/8 = 3$,

$$m = 80 \times (1/2)^3 = 80 \times 1/8 = 10 \text{ g}.$$

答: 还剩 10 g。

易错点： t/τ 是“几个半衰期”；剩的是 $(1/2)^n$ 倍，不是 $(1 - n/2)$ 倍——24 天剩 1/8 不是剩 1/3。

A10 解析

思路： $\Delta E = \Delta mc^2$ ，直接代入， $c^2 = 9 \times 10^{16}$ 。

规范解： $\Delta E = 3.1 \times 10^{-29} \times (3 \times 10^8)^2 = 3.1 \times 10^{-29} \times 9 \times 10^{16} \approx 2.79 \times 10^{-12} \text{ J}.$

答: 释放核能约 $2.8 \times 10^{-12} \text{ J}$ 。

易错点： c^2 是 $(3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16}$ ，别写成 3×10^{16} ；量级检查——原子核尺度反应释放约 10^{-12} J ，与 MeV 量级 ($1 \text{ MeV} \approx 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$) 吻合。

B 层·真题研习

B1 解析 (2024·湖南卷)

思路：近代物理选择题最爱考“谁提出什么、谁发现什么”——逐项对号入座。

规范解：A 错：普朗克正是量子化的提出者，黑体辐射能量是一份一份的（不连续）；B 对：紫光频率高于红光，若红光能使金属发生光电效应，紫光也一定能 ($h\nu > W_0$)；C 错：康普顿发现散射后波长变长（光子把动量交给电子）；D 错：德布罗意认为一切实物粒子都有波动性，质子和电子都有。

选 B。

易错点：对应表要背熟：普朗克 → 量子化、爱因斯坦 → 光子、康普顿 → 波长变长、德布罗意 → 一切物质波；C 项“变长”与“变短”一字之差是经典陷阱。

B2 解析 (2024·新课标 I 卷)

思路：要辐射可见光 (1.63 3.10 eV)，先找能产生这个能量范围光子的能级差；“最少供能”意味着激发到尽量低的能级。

规范解：基态 $E_1 = -13.6$ eV。若激发到 $n = 2$ ，只能从 $n = 2$ 跳回 $n = 1$ ，辐射 10.2 eV（紫外，不在可见光范围）；若激发到 $n = 3$ ，从 $n = 3$ 跳回 $n = 2$ 辐射 $E_3 - E_2 = -1.51 - (-3.40) = 1.89$ eV，落在 1.63 3.10 eV，是可见光。

$$\text{最少供能} = E_3 - E_1 = -1.51 - (-13.6) = 12.09 \text{ eV}。$$

选 A。

易错点：陷阱在“最少”——10.20 eV（到 $n = 2$ ）虽然便宜但只能出紫外光；必须想到 $n = 3$ 这个“能出可见光的最低能级”。 $n = 3$ 到 $n = 2$ 的 1.89 eV 是可见光。

B3 解析 (2024·新课标 II 卷)

思路：质量亏损 = 反应前总质量 - 反应后总质量； $\Delta E = \Delta m \times 931 \text{ MeV/u}$ 。

规范解： $\Delta m = 4 \times 1.0078 - 4.0026 = 4.0312 - 4.0026 = 0.0286 \text{ u}$ ；

$$\Delta E = 0.0286 \times 931 \approx 26.6 \text{ MeV}。$$

选 C（约 26 MeV）。

易错点：4 个质子的质量之和再减氦核质量（别先除后减）； $1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}/c^2$ 是“汇率”；约 26 MeV 这个结果要记住——它解释了太阳每秒钟“烧”掉 420 万吨质量的能量来源。

B4 解析 (2024·重庆卷)

思路：先算两条谱线的能级差与光子能量，再逐项判断。

规范解：

$$\text{H}\alpha: n = 3 \rightarrow 2, \Delta E_\alpha = -1.51 - (-3.40) = 1.89 \text{ eV}；$$

$$\text{H}\beta: n = 4 \rightarrow 2, \Delta E_\beta = -0.85 - (-3.40) = 2.55 \text{ eV}。$$

A 错： $E = hc/\lambda$ ， $\text{H}\alpha$ 能量小 → 波长大；B 对： $\text{H}\alpha$ 频率小；C 错： $\text{H}\beta$ 能量 2.55 eV，不是 3.4 eV；D 对：基态到激发态至少 10.2 eV，2.55 eV 的光子不足以使基态氢原子跃迁。

选 B、D。

易错点：能级图从 $n=3$ 、 $n=4$ 到 $n=2$ 的能级差要自己算，别记混；“能否使基态氢跃迁”的判断是光子能量 $\geq 10.2\text{ eV}$ 。

B5 解析 (2026 · 湖南卷 · 原子核衰变)

思路： α 衰变规律：质量数减 4、电荷数减 2；穿透能力： $\alpha < \beta < \gamma$ 。

规范解：A 错： α 衰变放出 ${}^4_2\text{He}$ 核，电荷数减少 2；B 错：质量数减少 4；C 错： α 粒子穿透能力最弱（一张纸即可挡住）， γ 射线穿透力最强（需厚铅板）；D 对：一次放出两个 α 粒子对应质量数减 8、电荷数减 4，理论上是可能的衰变方式。

答：D。

易错点：(1) α 衰变是“减”不是“增”， β 衰变才是电荷数加 1（质量数不变）；(2) 穿透力排序 $\alpha < \beta < \gamma$ 是送分考点；(3) “一次衰变放两个 α ”不违反守恒律（质量数、电荷数都守恒）。

B6 解析 (2026 · 广西卷 · 原子核符号)

思路：原子符号左上角为质量数、左下角为质子数（核电荷数）；中子数 = 质量数 - 质子数。

规范解：题干明示“质量数相同” $\rightarrow$ B 对；铀、钚是不同元素，质子数（核电荷数）不同 $\rightarrow$ A 错；原子质量由质子、中子的质量共同决定，两者数量不同 $\rightarrow$ C 错；中子数 = 质量数 - 质子数，质子数不同 $\rightarrow$ D 错。

答：B。

易错点：(1) 质量数相同 $\neq$ 原子质量相同——质子和中子质量有微小差异，且两者数量不同；(2) 元素种类由质子数（核电荷数）决定，与质量数无关；(3) 审题：选项 B 与题干直接呼应，别想复杂。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (荧光笔 · 高能光子换低能光子)

思路： $E = hc/\lambda$ 分别算两个光子能量；能量差转化为分子的振动（热）。

规范解：

$$(1) \text{ 紫外: } E_1 = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (350 \times 10^{-9}) \approx 5.68 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 3.55 \text{ eV};$$

$$\text{绿光: } E_2 = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (550 \times 10^{-9}) \approx 3.62 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 2.26 \text{ eV}.$$

(2) $\Delta E = E_1 - E_2 \approx 2.06 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 1.29 \text{ eV}$ ，这部分能量以分子振动（内能/热）的形式散失——吸收一个高能光子、发出一个低能光子，差额留在颜料分子里。

(3) 紫外光子能量 (3.55 eV) 大于激发颜料分子所需“门槛”，能把电子激发到较高的激发态；电子先通过无辐射跃迁落到较低激发态，再跃迁回基态时发出可见光。普通光光子能量不足时激发不了，所以在紫外灯下荧光字“亮眼”。

答：紫外光子约 3.55 eV、绿光光子约 2.26 eV，差额约 1.29 eV 转化为内能。

易错点：“荧光”是吸收高能光子、发射低能光子，能量必然“降级”（差额变成热）——若算出发射光子能量比吸收还大，一定错了。

C2 解析 (核电池·深空探测的能量来源)

思路：热功率按半衰期指数衰减；半衰期是大量原子核的统计规律；对比太阳能电池。

规范解：

(1) $t/\tau = 263/87.7 \approx 3$, $P = 100 \times (1/2)^3 = 12.5 \text{ W}$ 。

(2) 半衰期是大量原子核的统计规律，描述的是**群体**衰变的速度；核电池里含有天文数字个原子核（约 10^{23} 量级），宏观热功率按指数规律稳定衰减，几十年内功率变化可预测，因此能“按设计”长期工作——单个原子何时衰变才是随机的。

(3) 太阳能电池靠光照发电，月夜（约 14 个地球日）没有阳光就无法工作；深空探测器远离太阳时光照太弱。核电池靠放射性衰变持续放热发电，不受光照影响，寿命可达数十年——这正是“玉兔二号”不惧漫长寒冷月夜的原因。

答：约 12.5 W；核电池功率按统计规律稳定衰减；核电池不受光照约束、寿命长，适合月夜与深空。

易错点：“半衰期只对大量原子有意义”——不能理解成“每个原子必在 87.7 年内衰变”，而是群体衰变一半；宏观装置（核电池）恰好利用了这个统计确定性。

C3 解析 (信息阅读·“人造太阳”可控核聚变)

思路：信息题的套路：从材料提取关键数据 → 套用所学公式（质量亏损 → 质能方程）→ 结论与材料互证。聚变放能的本质是“生成物总质量小于反应物总质量”。

规范解：

(1) 质量亏损 $\Delta m = (m_{\text{氘}} + m_{\text{氚}}) - (m_{\text{氦}} + m_n) = (2.0141 + 3.0160) - (4.0026 + 1.0087) = 5.0301 - 5.0113 = 0.0188 \text{ u}$ 。

(2) $E = \Delta m \times 931.5 = 0.0188 \times 931.5 \approx 17.5 \text{ MeV}$ ，与材料给出的 17.6 MeV 基本一致（差值来自质量数据的有效数字）——验证了质能方程与质量亏损理论。

(3) 理由（任意两点）：(1) 原料丰富：氘在海水中储量巨大（每升海水约含 0.03 g 氘，可供人类使用上百亿年）；(2) 清洁：聚变产物主要是氦（惰性气体），无放射性废料堆积，不排放温室气体；(3) 能量密度极高：同样质量燃料，聚变释放能量远大于裂变和化学燃烧；(4) 无链式反应失控风险：等离子体一旦失控会自动熄灭，安全性好。

答：(1) 0.0188 u；(2) 约 17.5 MeV，与 17.6 MeV 吻合；(3) 原料丰富、清洁、能量密度高（任二）。

易错点：(1) 质量亏损是“反应物总质量 - 生成物总质量”，顺序别反；(2) 信息题的数值要“用材料的数算材料的事”，别凭空引入题目没有的条件；(3) $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$ 是换算桥梁，忘了它 (1) (2) 就连不起来。

本章综合·S 层

S1 解析 (光电效应综合)

思路： $E = hc/\lambda$ ；比较 $h\nu$ 与 W_0 ； $U_c = E_{k\max}/e$ ；截止波长 $\lambda_0 = hc/W_0$ 。

规范解：

(1) $E = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (250 \times 10^{-9}) \approx 7.96 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 4.97 \text{ eV} > 4.0 \text{ eV}$, 能发生光电效应。

(2) $E_{kmax} = 4.97 - 4.0 = 0.97 \text{ eV}$; $U_c = 0.97 \text{ V}$ 。

(3) $\lambda_0 = hc/W_0 = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (4.0 \times 1.6 \times 10^{-19}) \approx 3.11 \times 10^{-7} \text{ m} = 311 \text{ nm}$ 。波长比 311 nm 更长的光子能量更小, 不能发生光电效应。

答: 光子能量约 4.97 eV, 能发生; $E_{kmax} = 0.97 \text{ eV}$, $U_c = 0.97 \text{ V}$; 截止波长 311 nm, 波长更长的光不能发生。

易错点: 光子能量与波长成反比——“波长更长”对应“能量更小”; 截止波长是“最长波长”: $\lambda > \lambda_0$ 就不发生, 方向别反。

S2 解析 (能级 + 光电效应综合)

思路: 先算能级差 (光子能量), 再与钠的逸出功 2.25 eV 比较; 能发生则 $E_{kmax} = \text{光子能量} - W_0$ 。

规范解:

(1) $n = 3 \rightarrow 2$: $\Delta E = -1.51 - (-3.40) = 1.89 \text{ eV} < 2.25 \text{ eV}$, 不能发生光电效应。

(2) $n = 4 \rightarrow 2$: $\Delta E = -0.85 - (-3.40) = 2.55 \text{ eV} > 2.25 \text{ eV}$, 能发生;

$$E_{kmax} = 2.55 - 2.25 = 0.30 \text{ eV}。$$

(3) $n = 4 \rightarrow 1$: $\Delta E = -0.85 - (-13.6) = 12.75 \text{ eV}$,

$$E_{kmax} = 12.75 - 2.25 = 10.5 \text{ eV}。$$

答: $n = 3 \rightarrow 2$ 不能; $n = 4 \rightarrow 2$ 能, $E_{kmax} = 0.30 \text{ eV}$; $n = 4 \rightarrow 1$ 时光电子最大初动能 10.5 eV。

易错点: 能级差必须换算成“能否光电效应”的判据 (与 W_0 比); 同一套能级差用在“能不能”和“动能多大”两步上, 第一问比大小、第二问做减法, 别漏一步。

0.14 狭义相对论的两个前提

例题 5.1 解析

思考路径:

- 读题: “固有寿命 2.2 μs ” $\rightarrow$ 这就是 Δt_0 (在 μ 子自身参考系测得的时间);
- “以 0.99c 运动、地面看” $\rightarrow$ 地面是“运动参考系”, 用时间膨胀 $\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$;
- 先算因子 $\sqrt{1 - 0.99^2} = \sqrt{0.0199} \approx 0.141$, 再除;
- 预期检查: 速度接近 c, 寿命应延长很多倍 (约 7 倍)。

规范解: $\sqrt{1 - v^2/c^2} = \sqrt{1 - 0.99^2} = \sqrt{0.0199} \approx 0.141$,

$$\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = 2.2 / 0.141 \approx 15.6 \mu\text{s}。$$

答: 地面参考系看 μ 子寿命延长到约 15.6 μs (约 7 倍)。

易错点：固有时间一定是“相对物体静止的参考系”测的时间—— μ 子自己带的“钟”才是 $2.2\ \mu\text{s}$ ；地面测的时间更大，公式里 Δt_0 在分子上，别倒过来。

A1 解析

思路：飞船上测得的是固有时间 $\Delta t_0 = 1.0\ \text{h}$ ；地面测得 $\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。

规范解： $\sqrt{1 - v^2/c^2} = \sqrt{1 - 0.36} = \sqrt{0.64} = 0.8$,

$$\Delta t = 1.0/0.8 = 1.25\ \text{h}.$$

答：地面测得约 $1.25\ \text{h}$ 。

易错点：地面测得的时间比船上长（运动的钟慢）——算出 $0.8\ \text{h}$ 就是方向反了； $0.6c$ 时因子恰好 0.8 、时间放大 1.25 倍，这个组合要记牢。

A2 解析

思路：光速不变原理直接对号。

规范解：A 错：光速与观察者运动状态无关，对谁都一样；B 对：光速不变原理——与光源、观察者运动都无关；C 错：经典速度叠加是低速近似，高速下不成立；D 错：相对性原理说物理定律在所有惯性系中形式**相同**。

选 **B**。

易错点：光速不变是“对任何惯性系都是 c ”，不是“接近 c ”；C 项“所有情况”就是来套你“ $v + c$ ”直觉的。

A3 解析

思路：长度收缩 $L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ， L_0 是固有长度（相对杆静止时测得 $10\ \text{m}$ ）。

规范解： $\sqrt{1 - v^2/c^2} = 0.8$ ， $L = 10 \times 0.8 = 8\ \text{m}$ 。

答：地面测得杆长 $8\ \text{m}$ 。

易错点：收缩的是“运动方向”的长度，且观察者看到运动物体变短；固有长度是“跟着杆走”测出来的 $10\ \text{m}$ 。

A4 解析

思路：看因子 $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ 在低速下多接近 1 。

规范解：高铁、飞机的速度远小于光速（ $v/c \approx 10^{-8}$ 量级）， $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1$ ，时间膨胀效应小到测不出来——高铁上带原子钟飞行后与地面钟的差只有纳秒量级。所以相对论效应真实存在，但低速下可以忽略；经典力学是相对论在 $v \ll c$ 时的近似。这也正是 GPS 卫星（ $3.9\ \text{km/s}$ ）

需要修正、而日常运动无需考虑的原因。

答：日常速度下因子 ≈ 1 ，效应测不出来；高铁上的钟确实会慢，但慢到无法察觉。

易错点：不要说“高速下才有效、低速完全没有”——效应始终存在，只是大小不同；“忽略”不等于“没有”。

A5 解析

思路：狭义相对论两个前提 + 两个推论 + 低速近似。

规范解：A 对：光速是速度上限（超光速需无穷能量）；B 对：运动的钟变慢（时间膨胀）；C 对：运动方向长度收缩；D 对：低速时相对论效应可忽略，经典力学是它的极限近似。

选 A、B、C、D。

易错点：时间膨胀、长度收缩都“看参考系说话”——相对谁运动，谁的量就变；全部推论都以光速不变为前提，缺这个前提推论全不成立。

0.15 质能方程：质量就是能量

例题 5.2 解析

思考路径：

- 读题：给每秒质量亏损 $\Delta m = 4.2 \times 10^9 \text{ kg}$ ，求功率 $\rightarrow \Delta E = \Delta mc^2$ ， $P = \Delta E / \Delta t$ ；
- $c^2 = (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16}$ ；
- 预期检查：太阳总功率公认约 $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ ，答案应与之吻合。

规范解： $\Delta E = \Delta mc^2 = 4.2 \times 10^9 \times 9 \times 10^{16} \approx 3.8 \times 10^{26} \text{ J}$ ；

$P = \Delta E / \Delta t = 3.8 \times 10^{26} / 1 = 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ 。

答：太阳释放功率约 $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ （每秒“烧”掉 420 万吨质量）。

易错点： c^2 写成 3×10^{16} 是常见错误；结果 $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ 是检验标准——太阳功率就是这个数量级，算出来差太多说明单位或指数错了。

A6 解析

思路： $E = mc^2$ ， $m = 1 \text{ g} = 1 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 。

规范解： $E = 1 \times 10^{-3} \times 9 \times 10^{16} = 9 \times 10^{13} \text{ J}$ ；

折合标准煤： $9 \times 10^{13} / 2.9 \times 10^7 \approx 3.1 \times 10^6 \text{ kg} = 3100 \text{ t}$ 。

答：1 g 质量完全转化释放 $9 \times 10^{13} \text{ J}$ ，约相当于 3100 吨标准煤。

易错点： $1\text{ g} = 10^{-3}\text{ kg}$ 别写成 1 kg ；“3100 吨”的数量级要敏感——质能密度是任何化学能无法比的。

A7 解析

思路： $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, $v = 0.6c$ 。

规范解： $\sqrt{1 - 0.36} = 0.8$, $m = m_0 / 0.8 = 1.25m_0$ 。

答：质量变为静质量的 1.25 倍。

易错点： 质量随速度增大， $0.6c$ 时增大 25%；速度越接近 c 增得越猛——这就是“接近光速质量趋于无穷、超光速需要无穷能量”的直接来源。

A8 解析

思路： $\Delta E = \Delta m \times 931$ (Δm 以 u 为单位)。

规范解： $\Delta E = 0.030 \times 931 \approx 27.9\text{ MeV}$ 。

答：释放能量约 28 MeV。

易错点： 质量亏损单位用 u 时，能量直接用“ $\times 931\text{ MeV}$ ”；若换成焦耳要用 $1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}\text{ kg}$ 。

A9 解析

思路： 质量随速度增大 $\rightarrow$ 超光速不可能；质量亏损是转化不是消灭。

规范解： A 错：物体接近光速时质量剧增，继续加速所需能量趋于无穷，速度不可能无限增大；B 错：质能方程说明质量**转化**为能量（质能联合守恒），不是凭空消灭；C 对：这正是超光速不可能的物理原因；D 错：核反应释放的能量来自质量亏损（原子核内部），不是核外电子。

选 C。

易错点： “质量亏损 = 质量消失”是经典误解——是质量转化成了能量，总量（质能合计）守恒；核能来自原子核内部的结合能，与核外电子无关。

B 层·真题研习

B1 解析（2023·全国乙卷）

思路： 每秒释放的能量 = 总能量 $\div$ 时间； $\Delta m = \Delta E/c^2$ ，只求量级。

规范解： 每秒能量 $E = 10^{48}/60 \approx 1.7 \times 10^{46}\text{ J}$ ；

$$\Delta m = E/c^2 = 1.7 \times 10^{46} / (9 \times 10^{16}) \approx 1.9 \times 10^{29}\text{ kg}。$$

量级为 10^{29} kg 。

选 C。

易错点：1 分钟要除以 60（每秒）； c^2 用 9×10^{16} ；结果量级 10^{29} kg——天体级的“烧质量”，正是质能方程在天文尺度上的展示。

B2 解析（2025·上海卷）

思路：核反应两把尺子——质量数守恒、电荷数守恒；由 Z 定粒子种类。

规范解：质量数： $4 \times 1 = 4 + 2 \times 0 \rightarrow X$ 的质量数为 0；

电荷数： $4 \times 1 = 2 + 2Z \rightarrow Z = +1$ 。

质量数为 0、电荷数为 +1 的粒子是正电子， ${}^0_{+1}\text{e}$ 。

答： X 是正电子（ ${}^0_{+1}\text{e}$ ）。

易错点： $Z = +1$ 且质量数为 0，只能是正电子（ β^+ ）——若是电子则电荷数 $Z = -1$ ；聚变把 4 个质子合成氦核，多余的正电荷以正电子形式放出。

C 层·创新拓展

C1 解析（GPS 与相对论：每天 38 微秒的修正）

思路：时间误差 $\times$ 光速 = 距离误差；“不修正会怎样”看误差如何累积。

规范解：

(1) $\Delta x = c\Delta t = 3 \times 10^8 \times 38 \times 10^{-6} \approx 1.14 \times 10^4 \text{ m} \approx 11.4 \text{ km}$ 。

(2) 卫星钟每天快 $38 \mu\text{s}$ ，定位距离误差每天累积约 11 km——不修正的话，第一天定位就偏了十几公里，导航完全失效。这个误差不是“仪表漂移”，是相对论效应的系统误差，必须通过给卫星钟调慢（或在地面系统修正）来抵消。

答：每天误差约 11.4 km；相对论效应是导航工程的必需品，不是玄学。

易错点：两个效应方向相反（狭义慢 $7 \mu\text{s}$ 、广义快 $45 \mu\text{s}$ ），净快 $38 \mu\text{s}$ 是代数和；“ $38 \mu\text{s} \times$ 光速”是距离误差的直接来源，单位别换算错。

C2 解析（1 g 铀 vs 2.8 吨煤）

思路：总能量 $\div$ 煤热值 = 煤的质量；核能“浓缩”的原因在质能方程。

规范解：

(1) $m = 8.2 \times 10^{10} / 2.9 \times 10^7 \approx 2.8 \times 10^3 \text{ kg}$ ，即约 2.8 吨标准煤。

(2) 化学能来自原子间电子的重新排布，只涉及原子外层电子的结合能（eV 量级）；核能来自原子核内部核子间结合能的变化，一次裂变释放约 200 MeV（ $\approx 2 \times 10^8 \text{ eV}$ ），比单个化学键的能量（约几个 eV）高出上亿倍—— $\Delta E = \Delta mc^2$ 把微观核内质量亏损变成宏观可见的巨大能量，所以核燃料“浓缩”。

答：约 2.8 吨标准煤；核内结合能比化学能高约 8 个量级，质能方程是其“浓缩”的物理根源。

易错点：1 g 铀 vs 2.8 t 煤的对比是“量级感”——核裂变（200 MeV/核）与化学燃烧（eV/分子）差约 10^8 倍；计算时注意 8.2×10^{10} 与 2.9×10^7 相除得 2.8×10^3 ，别丢千位。

本章综合·S 层

S1 解析 (μ 子与时间膨胀)

思路：时间膨胀求地面寿命；飞距 = $v \times$ 寿命；对比有无相对论效应的差别。

规范解：

$$(1) \sqrt{1 - v^2/c^2} = \sqrt{1 - 0.99^2} = \sqrt{0.0199} \approx 0.141,$$

$$\Delta t = 2.2/0.141 \approx 15.6 \mu\text{s}.$$

$$(2) x = v\Delta t = 0.99 \times 3 \times 10^8 \times 15.6 \times 10^{-6} \approx 4.6 \times 10^3 \text{ m} = 4.6 \text{ km}.$$

$$(3) \text{不修正时 } x_0 = v\tau_0 = 0.99 \times 3 \times 10^8 \times 2.2 \times 10^{-6} \approx 6.5 \times 10^2 \text{ m} = 0.65 \text{ km}.$$

对比：考虑时间膨胀后 μ 子能飞 4.6 km，比经典估计的 0.65 km 长约 7 倍。大气层厚度达数十千米， μ 子产生于高空，若按固有寿命计算，几乎全部在途中衰变、无法被地面探测；时间膨胀显著延长了高速 μ 子的“可探测寿命”，这正是宇宙射线 μ 子实验对狭义相对论的经典验证。

答：地面寿命约 15.6 μs ；能飞约 4.6 km；经典估计仅约 0.65 km，时间膨胀使高速 μ 子能被地面探测。

易错点：飞距要用“地面参考系的时间”乘 v ，不能用固有寿命直接乘（那是经典估计）；对比时明确“时间膨胀放大了观测寿命，从而放大可飞行距离”。

S2 解析 (氘氚聚变 · 人造太阳的能量)

思路：质量亏损 = 反应前总质量 - 反应后总质量； $\Delta E = \Delta m \times 931 \text{ MeV}$ ；1 mol 次数 = N_A 。

规范解：

$$(1) \Delta m = (2.01410 + 3.01605) - (4.00260 + 1.00866) = 5.03015 - 5.01126 = 0.01889 \text{ u}.$$

$$(2) \Delta E = 0.01889 \times 931 \approx 17.6 \text{ MeV}.$$

$$(3) 1 \text{ mol 氘核参与反应 } N = 6.02 \times 10^{23} \text{ 次},$$

$$E = 6.02 \times 10^{23} \times 17.6 \times 1.6 \times 10^{-13} \approx 1.70 \times 10^{12} \text{ J}.$$

答：质量亏损 0.01889 u；每次释放约 17.6 MeV；1 mol 氘核释放约 $1.7 \times 10^{12} \text{ J}$ 。

易错点：质量亏损是“前减后” ($5.03015 - 5.01126$)，顺序别反；17.6 MeV 是 ITER 公布的聚变能量，可作为答案验算基准；最后一步注意 MeV 换 J ($\times 1.6 \times 10^{-13}$)。

0.16 激光：受激辐射的光放大

例题 6.1 解析

思考路径：

- 光子能量 $E = hc/\lambda$ ；
- 1 J 含光子数 = 总能量 $\div$ 单光子能量；
- 单位：694 nm = $6.94 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。

规范解：

$$(1) E = hc/\lambda = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (6.94 \times 10^{-7}) \approx 2.87 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 1.79 \text{ eV}.$$

$$(2) N = 1/(2.87 \times 10^{-19}) \approx 3.5 \times 10^{18} \text{ 个}.$$

答：单光子能量约 $2.9 \times 10^{-19} \text{ J}$ (约 1.8 eV)； 1 J 脉冲含约 3.5×10^{18} 个光子。

易错点：光子能量数量级 10^{-19} J (红光约 1.8 eV)；“ 1 J 有 10^{18} 个光子”这个数量级要敏感，算成 10^4 个就是单位错了。

C1 解析 (激光测距)

思路：光往返 2 倍地月距离， $c = 2d/t$ ；激光四特性与测距需求对应。

规范解：

(1) $c = 2d/t = 2 \times 3.84 \times 10^8 / 2.56 = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，与真空光速吻合（这恰是地月距离由光速定义测得的道理）。

(2) 激光“高亮”保证信号传到月球再返回仍能探测；“方向性好（平行）”使光束发散极小、能量不散开；“单色性”便于用窄带滤光片滤除背景光、提高信噪比；“相干性”可用于更精密的干涉测距。

答：测得光速 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；激光的亮度、方向性、单色性共同支撑长距离测距。

易错点：激光往返时间是“双程”，距离要乘 2；“方向性好”与“单色性好”是两个不同特性，分别对应“不散开”与“好滤光”。

0.17 LED 与能级：量子化的光

C2 解析 (LED 发光颜色)

思路： $h\nu = \Delta E$ ， $\lambda = hc/\Delta E$ ；蓝光反推能级差；省电原因是“直接发光不靠发热”。

规范解：

$$(1) \lambda = hc/\Delta E = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (1.8 \times 1.6 \times 10^{-19}) \approx 6.9 \times 10^{-7} \text{ m} = 690 \text{ nm}, \text{ 红光}.$$

$$(2) \text{ 蓝光 } 450 \text{ nm 对应能级差 } \Delta E = hc/\lambda = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (450 \times 10^{-9}) \approx 4.4 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 2.76 \text{ eV}.$$

(3) LED 靠能级跃迁直接发光（光子能量 = 能级差，能量“一步到位”）；白炽灯先靠电流把灯丝加热到约 3000 K 再靠热辐射发光，大部分能量以红外（热）形式浪费——“量子化直接出光” vs “热辐射绕远路”，所以 LED 更省电。

答：红光 (690 nm)；蓝光材料能级差约 2.76 eV ；LED 直接发光、白炽灯靠发热辐射，所以 LED 省电。

易错点：颜色由能级差（光子能量）决定——能级差大发蓝光、小发红光；LED 的“省电”本质是能量转化路径短（发光 → 直接），不是“发光效率高一点点”这么简单。

0.18 太阳能电池：光电效应的逆过程

C3 解析（光伏发电）

思路：功率 = 功率密度 × 面积 × 效率；电能 = 功率 × 时间。

规范解：

$$(1) P = 1000 \times 2 \times 0.20 = 400 \text{ W}。$$

$$(2) W = Pt = 0.4 \text{ kW} \times 4 \text{ h} = 1.6 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1.6 \text{ 度电}。$$

(3) 光电效应是“光打出电子”（光子能量变成电子动能）；太阳能电池是“光子造出载流子”——光子把价带电子激发到导带，形成电子-空穴对，内建电场把电子赶向电极形成电流（光能变电能）。一个出电子、一个造电流，正好互为逆过程。

答：400 W；一天 1.6 度电；太阳能电池是光电效应的逆过程。

易错点：面积和效率不能漏乘（ $1000 \times 2 = 2000 \text{ W}$ 是没乘效率的错解）；“逆过程”的准确说法是“光子造载流子形成电流”，不是“电子飞回金属”。

0.19 光纤通信：全反射的现代版

C4 解析（光纤通信波长）

思路： $c = \lambda f$ ； $v = c/n$ ；不同波长各自独立传输。

规范解：

$$(1) f = c/\lambda = 3 \times 10^8 / (1550 \times 10^{-9}) \approx 1.94 \times 10^{14} \text{ Hz}。$$

$$(2) v = c/n = 3 \times 10^8 / 1.46 \approx 2.05 \times 10^8 \text{ m/s}。$$

(3) 不同波长的光频率不同，在同一根光纤中沿各自的光路（全反射“之”字形路径）独立传播；接收端用波分复用器件把不同波长的光分开，各走各的通道，互不干扰——一根光纤可以同时承载成千上万路信号。

答：频率约 $1.94 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ；芯层光速约 $2.05 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；不同波长独立传输、波分复用互不干扰。

易错点：光进介质频率不变（仍是 $1.94 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ），波速变小；1550 nm 是红外，人眼不可见，别当成可见光。

0.20 核电站：可控链式反应

C5 解析（链式反应与控制棒）

思路：增殖因子 1.0 是临界；1 g 铀的原子数用“质量 ÷ 单个原子质量”；总能量 = 原子数 × 每次能量。

规范解：

(1) 增殖因子 = 1.0 表示每代中子数不变，链式反应稳定持续（临界状态），反应堆正常功率运行；控制棒吸收中子使增殖因子 < 1，中子数逐代减少，反应“刹车”，功率下降直至停堆。

$$(2) \text{ 单个铀 } 235 \text{ 原子质量} = 235 \times 1.66 \times 10^{-27} \approx 3.9 \times 10^{-25} \text{ kg},$$

$$N = 10^{-3} / (3.9 \times 10^{-25}) \approx 2.56 \times 10^{21} \text{ 个}。$$

$$(3) E = 2.56 \times 10^{21} \times 200 \times 1.6 \times 10^{-13} \approx 8.2 \times 10^{10} \text{ J}。$$

答：因子为 1 时临界稳定运行、小于 1 时反应减弱；1 g 铀含约 2.56×10^{21} 个原子核；完全裂变释放约 $8.2 \times 10^{10} \text{ J}$ （约相当于 2.8 吨标准煤）。

易错点：原子个数用“总质量 ÷ 单个核质量”，别把 g 和 kg 混了（1 g = 10^{-3} kg）；200 MeV × 1.6×10^{-13} 才是每次能量（焦耳），别忘换算。

0.21 医学影像：X 光、CT 与核医学

C6 解析（X 光管）

思路：电子动能 $E_k = eU$ ；轫致辐射中电子动能最多全部转为光子能量 → X 射线最大光子能量 = eU ；最短波长 $\lambda_{\min} = hc/E_{\max}$ 。

规范解：

$$(1) E_k = eU = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^5 = 1.6 \times 10^{-14} \text{ J} = 100 \text{ keV}。$$

$$(2) E_{\max} = 100 \text{ keV} = 1.6 \times 10^{-14} \text{ J}；$$

$$\lambda_{\min} = hc/E_{\max} = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (1.6 \times 10^{-14}) \approx 1.24 \times 10^{-11} \text{ m} = 0.0124 \text{ nm}。$$

答：电子最大动能 100 keV；X 射线最大光子能量 100 keV，最短波长约 0.012 nm。

易错点：X 射线光子能量 ≤ 电子动能（电子还可能把能量变成热），“最大”二字对应动能全部转光子；最短波长对应最大能量， $\lambda_{\min} = hc/E_{\max}$ 方向别反。

0.22 GPS 与相对论：每天 38 微秒的修正

C7 解析（GPS 定位误差）

思路：误差距离 = 光速 × 时间误差；两个相对论效应分别来自“速度”和“引力势”。

规范解：

$$(1) \Delta x = c\Delta t = 3 \times 10^8 \times 1 \times 10^{-6} = 300 \text{ m}。$$

(2) 狭义相对论：卫星高速运动（3.9 km/s），运动的钟变慢 → 卫星钟每天慢 7 μs；广义相对论：卫星在离地约 2 万千米的高空，地球引力势比地面高，引力弱处钟走得更快 → 卫星钟每天快 45 μs。两个效应一“慢”一“快”、方向相反。

(3) 净效应每天快 $38\ \mu\text{s}$ ，换算成距离误差约 $11\ \text{km}$ ——不修正则定位误差每天累积十几公里，导航完全失效。所以必须给卫星钟做相对论修正。

答： $1\ \mu\text{s}$ 误差对应约 $300\ \text{m}$ ；狭义（速度）慢、广义（引力势）快，方向相反；不修正每天偏约 $11\ \text{km}$ ，导航失效。

易错点： $1\ \mu\text{s} \rightarrow 300\ \text{m}$ 这个换算要会算 ($3 \times 10^8\ \text{m/s} \times 10^{-6}\ \text{s}$)；两个效应的方向（慢/快）与来源（速度/引力）对应清楚，别记反。

0.23 量子计算与量子通信：下一个时代

C8 解析（量子比特与墨子号）

思路：叠加态使 n 个量子比特同时表示 2^n 个状态；量子密钥靠“测量破坏态”防窃听。

规范解：

(1) 10 个量子比特能同时表示 $2^{10} = 1024$ 个状态。

(2) 量子密钥分发中信息编码在单个光子的量子态（如偏振方向）上。根据量子力学的不可克隆定理与测量坍缩，窃听者截获光子必然进行测量，而测量会改变量子态——合法的通信双方通过比对部分密钥就能发现“有人偷看”，从而丢弃被窃听的密钥，实现“窃听必被发现”。

(3) n 个量子比特同时处于 2^n 个状态的叠加，对某些问题（如大数因子分解，Shor 算法）可以把多个候选同时“算”，从指数级搜索变成多项式级运算——这就是“指数级加速”的来源。

答： $2^{10} = 1024$ 个状态；测量破坏量子态使窃听被发现；叠加态带来并行计算能力。

易错点：量子计算不是“比经典快固定倍数”，而是把某些问题的复杂度从指数降到多项式；量子通信保证的是“安全性”（防窃听），不是“传得快”。

0.24 热机与能源：效率的边界

例题 6.2 解析

思考路径：

- 卡诺效率 $\eta = 1 - T_2/T_1$ ，温度用开尔文（题目已给）；
- $T_1 = 1673\ \text{K}$ 、 $T_2 = 873\ \text{K}$ ，代入；
- 与常识对照：燃气轮机实际效率约 40%，卡诺上限 47.8% 略高于实际，合理。

规范解： $\eta = 1 - T_2/T_1 = 1 - 873/1673 \approx 1 - 0.522 = 47.8\%$ 。

答：卡诺效率上限约 47.8%，实际约 40% 已接近理论极限。

易错点： T_1 是高温热源（入口）、 T_2 是低温热源（出口），别代反；“提高 T_1 比降低 T_2 更有效”——提高入口温度是工程上提效的主路径。

C9 解析（电动车 vs 内燃机）

思路：卡诺上限算理论值；实际损失列“不可逆因素”；电动机不是热机、不受卡诺限制。

规范解：

(1) $\eta = 1 - T_2/T_1 = 1 - 700/2000 = 65\%$ 。

(2) 实际损失：气缸散热、排气带走热量、摩擦、部分负荷工况（怠速、加速）、泵气损失等——一切不可逆因素。

(3) 内燃机是热机，工作必须靠温差吸热、排热，效率受卡诺上限约束（65% 是理论天花板，实际约 30%）；电动机把电能直接转化为机械能，不经过“热”这个中间环节、不靠温差工作，因此不受卡诺效率限制，可以做到 90% 以上——这就是电动车的物理优势。

答：卡诺上限 65%；损失来自散热、摩擦等不可逆因素；电动机不靠温差、不受卡诺限制。

易错点：热机效率的“天花板”来自热二律（必须排热）；电动机不是热机，别套卡诺公式算电动机效率。

0.25 太空望远镜与宇宙学：看见 138 亿年

C10 解析（哈勃定律与宇宙膨胀）

思路：红移 $\rightarrow$ 退行；哈勃定律 $v = H_0 d$ 求距离；微波背景辐射是“第一缕光”。

规范解：

(1) 红移（波长变长、频率变低）说明星系在远离我们——宇宙在膨胀，这是哈勃 1929 年的发现。

(2) $v = 0.05c = 0.05 \times 3 \times 10^5 = 1.5 \times 10^4 \text{ km/s}$,

$d = v/H_0 = 1.5 \times 10^4 / 70 \approx 214 \text{ Mpc}$ 。

(3) 宇宙微波背景辐射是大爆炸后约 38 万年、宇宙冷却到可以“放光”时留下的余晖，温度约 2.7 K，充满整个宇宙。它和星系红移一起，构成“宇宙在膨胀、有起点（大爆炸）”的两大观测支柱。

答：红移说明星系退行（宇宙膨胀）；距离约 214 Mpc；微波背景辐射是大爆炸余晖，是宇宙演化的重要证据。

易错点：哈勃定律中 v 与 d 成正比——远处星系退行更快；单位换算（Mpc = 兆秒差距，1 Mpc $\approx 3.26 \times 10^6$ 光年）在计算中按 H_0 的单位配合 km/s 使用即可。

B 层·真题研习

B1 解析（2023·浙江卷）

思路：核反应守恒两把尺子 + 射线性质 + 半衰期性质 + 比结合能。

规范解：A 错：质量数守恒 $238 = A + 4$, $A = 234$, 不是 233; B 错： α 射线穿透能力最弱（比 γ 弱得多）; C 对： ^{238}Pu 发生 α 衰变释放能量，生成物 ^{234}U 更稳定，比结合能更大，故 ^{238}Pu 的比结合能比 ^{234}U 小; D 错：半衰期是原子核自身的统计规律，与温度、压强等外界条件无关，月夜的寒冷不影响半衰期。

选 C、D。

易错点 “： β/α 衰变” 放能 → 产物比结合能大 “是判断比结合能大小的钥匙；半衰期” 与外界无关 “几乎是每年必考的一句。

B2 解析（2024 · 天津卷）

思路：聚变的特点逐项核对：清洁性、条件、质量亏损、比结合能。

规范解：A 对：聚变产物是氦（无放射性核废料），比裂变（产生大量放射性废料）更安全、清洁；B 错：聚变需要高温高压条件（克服库仑斥力），不是任意两个原子核都能聚变；C 错：聚变释放能量必有质量亏损，总质量减小；D 对：聚变放能 → 生成核更稳定 → 核子比结合能增加。

选 A、D。

易错点 “：C 项” 总质量增加 “是专为迷惑你设计的——放能 = 质量亏损 = 总质量减小；比结合能” 大则稳定 “，放能的方向永远是” 从比结合能小到比结合能大 “。

本章综合 · S 层

S1 解析（核电站的能量链）

思路：逐环节写能量形式；电功率 = 热功率 × 效率；卡诺上限与效率对比。

规范解：

(1) 核能 → 内能（水蒸气的热能）→ 机械能（汽轮机转动）→ 电能（发电机）。

(2) $P = 3.0 \times 10^9 \times 0.40 = 1.2 \times 10^9 \text{ W}$ 。

(3) $\eta_c = 1 - T_2/T_1 = 1 - 320/600 \approx 46.7\%$ 。

实际发电效率 $40\% <$ 卡诺上限 46.7% ，说明 40% 没有超过热力学允许的理论极限，合理；与卡诺上限的差距来自汽轮机内部不可逆损失、发电机损耗等。

答：核能 → 内能 → 机械能 → 电能；电功率 $1.2 \times 10^9 \text{ W}$ ；卡诺上限约 47% ， 40% 合理。

易错点：发电效率不可能超过卡诺上限——若算出 “ $40\% > 47\%$ ” 才合理是错的判断；能量链的每一步都要写 “转化” 的方向（核能 → 内能 → 机械能 → 电能）。

S2 解析（太阳能电池与光电效应）

思路：截止波长 $\lambda_0 = hc/(\text{能隙})$ ； 500 nm 光子能量与能隙比较；太阳光谱说明可用性。

规范解：

(1) $\lambda_0 = hc/E_g = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (1.1 \times 1.6 \times 10^{-19}) \approx 1.13 \times 10^{-6} \text{ m} = 1130 \text{ nm}$ 。入射光波长大于 1130 nm （能量低于 1.1 eV ）时不能激发电子。

(2) 500 nm 光子能量 $E = hc/\lambda = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (500 \times 10^{-9}) \approx 3.98 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 2.49 \text{ eV} > 1.1 \text{ eV}$ ，能激发电子产生光电流。

(3) 能隙 1.1 eV 对应波长 1130 nm；太阳光中波长小于 1130 nm 的光（可见光、紫外、部分红外）光子能量都大于 1.1 eV，都能激发电子。由于可见光覆盖约 380~780 nm、远小于 1130 nm，所以太阳光的绝大部分能量都能被硅电池利用——这是硅太阳能电池能工作的原因。

答：截止波长约 1130 nm；500 nm 光（2.49 eV）能激发；太阳光中波长小于 1130 nm 的光子能量都够，故可用太阳光发电。

易错点：截止波长是“最大波长”—— $\lambda < 1130 \text{ nm}$ 的光都能用；能隙越小能利用的光越多，但能量损失也越大，实际电池材料要折中选能隙（硅 1.1 eV 正是折中的结果）。

一、单项选择题

Z1 解析

思路：分子动理论三句话与气体压强的微观解释逐项核对。

规范解：A 错：布朗运动是悬浮颗粒的无规则运动，不是液体分子本身；B 错：温度是分子平均动能的度量，不是平均速率；C 对：等温压缩温度不变 $\rightarrow$ 分子平均动能不变；体积减小 $\rightarrow$ 分子数密度增大 $\rightarrow$ 碰撞器壁更频繁 $\rightarrow$ 压强增大；D 错：分子间作用力随距离先增大后减小（引力区域先增后减），不是单调减小。

选 C。

易错点：B 项“速率”与“动能”一字之差——温度相同则平均动能相同，但不同分子平均速率不同。

Z2 解析

思路： $\Delta U = Q + W$ ，注意符号约定（吸热为正、外界对气体做功为正）。

规范解： $Q = +200 \text{ J}$ ， $W = +300 \text{ J}$ （外界对气体做功）， $\Delta U = 200 + 300 = 500 \text{ J}$ 。

选 A。

易错点：题设明确“外界对气体做功”，W 取正号；若写成“气体对外做功”则取负。

Z3 解析

思路：斯涅尔定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ，光从空气（ $n = 1$ ）射入玻璃。

规范解： $\sqrt{2} = \sin \theta_1 / \sin 30^\circ$ ， $\sin \theta_1 = \sqrt{2} \times 0.5 \approx 0.707$ ， $\theta_1 = 45^\circ$ 。

选 B。

易错点：折射率 = $\sin$ 入射角 / $\sin$ 折射角（光疏到光密，入射角在分子）；代入别把 30° 当入射角。

Z4 解析

思路： $\Delta E = E_3 - E_1$ ，能级差越大光子能量越大。

规范解： $E_3 = -13.6/9 \approx -1.51 \text{ eV}$ ， $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ ，

$$\Delta E = -1.51 - (-13.6) = 12.09 \text{ eV}。$$

选 C。

易错点： $n=3 \rightarrow 1$ 与 $n=3 \rightarrow 2$ (1.89 eV) 区分开； 12.09 eV 是激发到 $n=3$ 所需能量与 $n=3 \rightarrow 1$ 辐射能量相同（都等于 $E_3 - E_1$ ），注意不是 10.2 eV （那是 $n=2 \rightarrow 1$ ）。

Z5 解析

思路：时间膨胀——运动的钟变慢。

规范解：飞船相对地面高速运动，地面观察者测得飞船上的钟变慢（时间膨胀）。 $0.6c$ 时因子 $\sqrt{1 - 0.36} = 0.8$ ，船上时间间隔是地面的 0.8 倍。

选 B。

易错点：“运动的钟变慢”是对“相对它运动的观察者”而言——船上的人看自己的钟正常，是地面看飞船的钟慢。

二、多项选择题

Z6 解析

思路：谁揭什么、谁靠什么——光学与近代物理的“对号入座”题。

规范解：A 对：光纤通信利用全反射；B 对：偏振说明光是横波；C 错：光电效应说明光具有粒子性；D 对： $\Delta x = L\lambda/d$ ，条纹间距与波长成正比；E 对：核反应方程满足质量数守恒和电荷数守恒（两把尺子）。

选 A、B、D、E。

易错点：光电效应 $\rightarrow$ 粒子性、干涉衍射 $\rightarrow$ 波动性、偏振 $\rightarrow$ 横波，三者别混。

Z7 解析

思路：分段用定律：A $\rightarrow$ B 等温（玻意耳）、B $\rightarrow$ C 等容（查理）。

规范解：A 对：等温 $p_0 V_0 = p_B \times 2V_0$ ， $p_B = p_0/2$ ；B 对：等容 $p_B/T_0 = p_C/2T_0$ ， $p_C = p_0$ ；C 对：等温温度不变，理想气体内能不变；D 对：等容升温 $\Delta U > 0$ 、 $W = 0$ ，由 $\Delta U = Q + W$ 得 $Q > 0$ ，吸热；E 错：等容体积不变，气体不做功。

选 A、B、C、D。

易错点：等容过程 $W=0$ 是“不做功”，不是“不吸热”——E 项正是拿“吸热”和“做功”互坑。

Z8 解析

思路：核反应的守恒定律、衰变规则、半衰期性质。

规范解：A 对：聚变、裂变都释放能量 $\rightarrow$ 都有质量亏损；B 对：半衰期是原子核自身的统计规律，与外界条件无关；C 对： α 衰变质量数减 4、电荷数减 2；D 对： β 衰变质量数不变、电荷数加 1；E 错：核反应方程同时满足质量数守恒和电荷数守恒。

选 A、B、C、D。

易错点：E 项故意只说“电荷数守恒”——两把尺子缺一不可。

三、实验题

Z9 解析

思路：双缝干涉条纹间距公式及其应用。

规范解：

(1) $\Delta x = L\lambda/d$, 故 $\lambda = d\Delta x/L$ 。

(2) $\lambda = 0.3 \times 10^{-3} \times 1.4 \times 10^{-3} / 1.2 = 3.5 \times 10^{-7} \text{ m} = 350 \text{ nm}$ 。

(3) 红光的波长比绿光长，由 $\Delta x = L\lambda/d$ 知条纹间距变大（条纹变疏）。条纹间距与波长成正比。

答： $\lambda = d\Delta x/L$ ；波长 350 nm；换红光条纹间距变大。

易错点：单位统一（mm $\rightarrow$ m）；红光波长大于绿光，条纹更宽——这个结论常用于“换光判断”类设问。

四、计算题

Z10 解析（钢瓶氧气）

思路： $pV = nRT$ 求物质的量；等容查理定律求降温后压强；用掉一半质量则物质的量减半，等温下压强减半。

规范解：

(1) $T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ K}$, $V = 40 \text{ L} = 0.04 \text{ m}^3$,

$n = pV/RT = 1.2 \times 10^7 \times 0.04 / (8.31 \times 300) \approx 192.5 \text{ mol} \approx 1.9 \times 10^2 \text{ mol}$ 。

(2) $T_2 = 7 + 273 = 280 \text{ K}$, 等容： $p_2 = p_1 T_2 / T_1 = 1.2 \times 10^7 \times 280 / 300 = 1.12 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。

(3) 用掉一半质量 $\rightarrow n$ 减半，温度回到 300 K、体积不变， $p = nRT/V$ 减半：

$$p = 1.2 \times 10^7 / 2 = 6.0 \times 10^6 \text{ Pa}。$$

答：约 $1.9 \times 10^2 \text{ mol}$ ； $1.12 \times 10^7 \text{ Pa}$ ； $6.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

易错点： $40 \text{ L} = 0.04 \text{ m}^3$ （不是 40 m^3 ）；摄氏温度必须先换开尔文；“质量减半 $\rightarrow$ 物质的量减半 $\rightarrow$ 等温等容压强减半”用 n 与 p 的正比关系一步到位。

Z11 解析（水中折射）

思路：斯涅尔定律求折射角； $v = c/n$ ； $\sin C = 1/n$ 。

规范解：

$$(1) \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2: 1 \times \sin 53^\circ = (4/3) \times \sin \theta_2,$$

$$\sin \theta_2 = 0.8 \times 3/4 = 0.6, \quad \theta_2 = 37^\circ。$$

$$(2) \quad v = c/n = 3 \times 10^8 / (4/3) = 2.25 \times 10^8 \text{ m/s}。$$

$$(3) \quad \sin C = 1/n = 3/4 = 0.75, \quad C \approx 48.6^\circ。$$

答：折射角 37° ；水中光速 $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；临界角约 48.6° 。

易错点：光从空气（光疏）入水（光密），折射角小于入射角（ $37^\circ < 53^\circ$ ）；临界角是“从水中射向空气”时的角， $\sin C = 1/n = 0.75$ 。

Z12 解析（光电效应 + 质能）

思路： $E = hc/\lambda$ 算光子能量，减逸出功得动能； $Uc = E_{kmax}/e$ ； $\Delta E = \Delta m \times 931$ 。

规范解：

$$(1) \quad E = hc/\lambda = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (250 \times 10^{-9}) \approx 7.96 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 4.97 \text{ eV};$$

$$E_{kmax} = 4.97 - 3.5 = 1.47 \text{ eV};$$

$$Uc = E_{kmax}/e = 1.47 \text{ V}。$$

$$(2) \quad \Delta E = 0.023 \times 931 \approx 21.4 \text{ MeV}。$$

答：最大初动能 1.47 eV 、遏制电压 1.47 V ；核能约 21.4 MeV 。

易错点： 250 nm 换米乘 10^{-9} ； eV 与 J 换算别漏；核能计算 Δm 用 u 时乘 931 得 MeV 。

Z13 解析（长度收缩）

思路： $L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ， $0.8c$ 时因子为 0.6 。

规范解： $\sqrt{1 - v^2/c^2} = \sqrt{1 - 0.64} = \sqrt{0.36} = 0.6$ ，

$$L = L_0 \times 0.6, \quad 60 = 0.6L_0, \quad L_0 = 100 \text{ m}。$$

答：飞船固有长度 100 m 。

易错点：固有长度是相对飞船静止时测的长度，它比地面测得的长（收缩的是观测长度）； $0.8c$ 对应因子 0.6 ，长度 60 m 是“变短后”的，反推 L_0 要除 0.6 。

Z14 解析（气体 + 热一律综合）

思路：等压用 V/T 常数求温度； $W = p\Delta V$ ； $\Delta U = Q - W$ ；等容降温 ΔU 反向、 $W = 0$ 求放热。

规范解：

(1) 等压： $V_A/T_A = V_B/T_B$ ， $T_B = 300 \times 3.0/2.0 = 450\text{ K}$ 。

(2) $W = p\Delta V = 1.0 \times 10^5 \times (3.0 - 2.0) \times 10^{-3} = 100\text{ J}$ 。

(3) $\Delta U = Q - W = 250 - 100 = 150\text{ J}$ 。

(4) $B \rightarrow C$ 等容降温回 300 K ，温度变化量与 $A \rightarrow B$ 相同但反向，内能变化 $\Delta U' = -150\text{ J}$ ；等容 $W = 0$ ，由 $\Delta U' = Q' + W$ 得 $Q' = -150\text{ J}$ ，即放出 150 J 热量。

答： $T_B = 450\text{ K}$ ；对外做功 100 J ；内能增加 150 J ； $B \rightarrow C$ 放出 150 J 。

易错点 “：等压膨胀对外做功 $W = p\Delta V$ 是正的”对外做功“，代入 $\Delta U = Q - W$ 时直接相减； $B \rightarrow C$ 的放热量恰好等于 $A \rightarrow B$ 的内能增量 (150 J)，因为 C 状态温度与 A 相同、内能与 A 相同——用”温度决定内能“对称性检验答案最方便。

本卷覆盖六章核心：分子动理论与气体（第 1、10 题）、热力学定律（第 2、7、14 题）、光学（第 3、6、9、11 题）、近代物理（第 4、8、12 题）、相对论（第 5、13 题）、科技应用（第 6 题部分、第 10 题钢瓶情境）。计算题全部采用可独立验算的数据，答案量级均可由物理常识校验（如钢瓶氧气物质的量约 10^2 mol 、 350 nm 在可见光范围、临界角 48.6° 与水的 49° 吻合）。