

寻迹 • PATHWAY

物理 III • 光热量子

循迹而上 • 拾级登顶

寻迹 • 梦叶子 编著

情境版v9

2026 年 8 月 12 日

目录

第一章 分子动理论与气体	3
1.1 分子动理论：三句话看微观	3
1.2 气体压强的微观解释：分子在“敲门”	5
1.3 气体三定律的图像与 p - V 图	6
第二章 固体、液体与物态变化	11
2.1 固体：晶体与非晶体	11
2.2 液体：表面张力与毛细现象	12
2.3 物态变化：固、液、气的“变身”	13
2.4 饱和汽与湿度：为什么“闷热”的夏天这么难受	14
第三章 热力学定律	17
3.1 内能：分子动能与分子势能之和	17
3.2 热力学第一定律：能量守恒在热学	17
3.3 热力学第二定律：热量不会自动倒流	18
第四章 光学	23
4.1 光的反射与折射：斯涅尔定律	23
4.2 光的波动性：干涉、衍射、偏振	24
4.3 光速与电磁波谱：光也是电磁波	26
第五章 近代物理	31
5.1 光电效应：光是一份一份的	31
5.2 光的波粒二象性与物质波	33
5.3 原子结构：从汤姆孙到玻尔	34
5.4 原子核：组成、放射性与核能	35

第六章 相对论初步	41
6.1 狭义相对论的两个前提	41
6.2 质能方程：质量就是能量	43
第七章 从课本到科技：量子与光的拓展应用	47
7.1 激光：受激辐射的光放大	47
7.2 LED 与能级：量子化的光	48
7.3 太阳能电池：光电效应的逆过程	49
7.4 光纤通信：全反射的现代版	49
7.5 核电站：可控链式反应	50
7.6 医学影像：X 光、CT 与核医学	50
7.7 GPS 与相对论：每天 38 微秒的修正	51
7.8 量子计算与量子通信：下一个时代	51
7.9 热机效率与电动车：卡诺上限	52
7.10 太空望远镜与宇宙学：看见 138 亿年	53
附录 A 热光量子核心公式速查	55
附录 B 读题即解题：热光量子关键词速查	57
附录 C 学生必做实验指导（光热量子）	59

第一章 分子动理论与气体

这一章走向微观。先回答一个你每天都遇到但没想过的问题：**空气为什么有压强**？是空气有重量“压”下来的吗？——不完全是。答案藏在分子动理论的三句话里。从“空气为什么有压强”讲到“轮胎为什么夏天要冷态测压”，你会发现宏观的气体定律，全是微观分子运动的平均结果。而“分子真的存在吗”这个问题，人类吵了两百年，答案竟然藏在一颗花粉里。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 用分子动理论解释热现象（分子永不停息/间隙/相互作用）；(2) 掌握气体压强的微观解释与三个气体实验定律；(3) 用理想气体状态方程解决简单问题。

1.1 分子动理论：三句话看微观

微观世界怎么“看”？靠推理。分子动理论就三句话，把整个微观世界的规律全包了：

- **物质由大量分子组成**——1 mol 任何物质含有的分子数，叫**阿伏伽德罗常数**， $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ，这是微观世界的“数量基准”；
- **分子永不停息地做无规则热运动**——布朗运动是证据：花粉颗粒悬浮在水里被水分子撞来撞去，无规则地游走；
- **分子间存在引力和斥力**—— $r = r_0$ 时平衡， $r < r_0$ 斥力主导， $r > r_0$ 引力主导， $r > 10r_0$ 几乎为零。

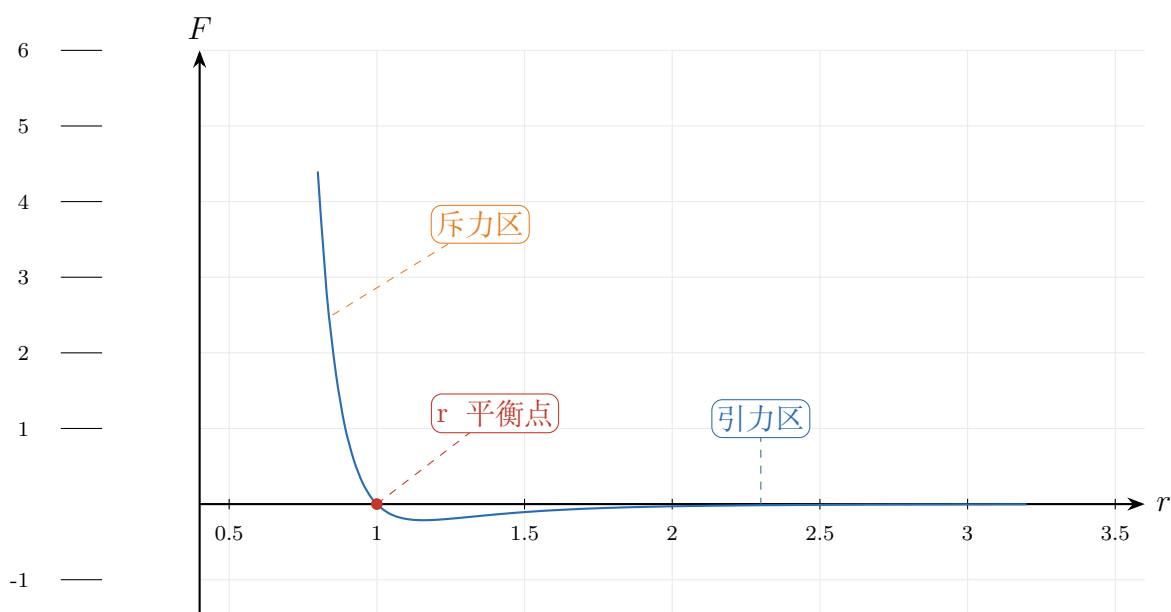


图 1.1: 分子间作用力随距离变化：近处斥力主导，远处引力主导

先说说布朗运动，因为它身上有个容易踩的坑。1827 年，植物学家布朗在显微镜下观察花粉颗粒悬浮在水里的情形，看到花粉在无规则地乱动。他起初怀疑花粉是“活的”——可后来他把煤灰、岩石粉末也放进去，一样在动。不是生物在游泳，是**水分子**在看不见的地方撞它们。我们把悬浮在液体中的微粒永不停息的无规则运动，叫作**布朗运动**。注意：**布朗运动不是分子运动**——分子太小看不见，你看到的是花粉颗粒被分子撞出的“足迹”。它只是分子无规则热运动的**间接证据**。〔注 1〕

温度到底是什么？它不是“冷热”这种感觉——**温度是分子平均动能的度量**（ $\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$ ， k 是玻尔兹曼常数）。由此推出一个反直觉结论：**温度相同，平均动能相同，与分子种类无关**——一杯水和一杯酒精温度相同，它们的分子平均动能一样大。（分子质量不同，所以平均速率不同：轻的快、重的慢。）

分子小到什么程度？1990 年，IBM 的科学家用扫描隧道显微镜，把 35 个氩原子在镍表面上摆成了“IBM”三个字母——每个字母只有几个纳米大。他们用一根针尖“拨”单个原子。你手机芯片上的电路，线宽也只有几个纳米，同样是纳米尺度的“加工”。微观世界不是书上的想象，它早就被人类动手摆弄过了。

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？

想一想：

- 问：1 mol 任何物质有多少个分子？
- 想：阿伏伽德罗常数—— $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ 个。
- 问：每个水分子的质量怎么算？

- 想：总质量除以分子数： $m = \frac{18 \times 10^{-3}}{6.02 \times 10^{23}} \approx 3.0 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。
- 问：这个质量数量级对吗？
- 想：单个分子质量是 10^{-26} kg 量级——微观世界的小，是宏观无法直观感受的。

详细答案：解： $N = N_A = 6.02 \times 10^{23}$ 个； $m = \frac{18 \times 10^{-3}}{6.02 \times 10^{23}} \approx 3.0 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。答：1 mol 水含 6.02×10^{23} 个水分子，每个约 $3.0 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。这个数字大到什么程度？全世界海水约有 10^{46} 个水分子——而 1 mol 水（18 克）就有 10^{23} 个。微观世界的「小」，是宏观想象力够不到的量级。

变式提醒：分子数量级估算套路：总质量 ÷ 单个分子质量 = 分子数（或 $n = m/M$ ， $N = nN_A$ ）；“阿伏伽德罗常数 + 摩尔质量”是微观量的“汇率”。

1.2 气体压强的微观解释：分子在“敲门”

回到开头的问题：空气为什么有压强？是气体有重量“压”下来吗？——不完全是。大量分子对器壁频繁碰撞的平均效果才是压强：分子数密度越大（越“挤”）、分子平均动能越大（越“猛”），压强越大。你可以想象成千上万个分子在器壁上“敲门”——你感觉到的压力，是无数下“敲门”的合力。

理想气体状态方程：

$$pV = nRT$$

（ n 物质的量， $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ）或 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ （一定质量气体）。三条特例：等温（玻意耳定律 $pV = \text{常数}$ ）、等容（查理定律 $p/T = \text{常数}$ ）、等压（盖-吕萨克定律 $V/T = \text{常数}$ ）。

这套账，汽车天天在算。现在的车大多装了胎压监测系统，四个轮子实时上报气压——夏天跑高速，轮胎越跑越热，胎压报警灯亮了。为什么？轮胎体积几乎不变（等容），温度升高，压强跟着涨。所以老司机都说“冷态测胎压”：清晨车凉了再量，才量得出真实胎压。你手机里的气象预报，也天天在算这套 $pV = nRT$ ——高空气压和温度对上了，天就要变。

例题 1.2

（胎压题）夜间 17°C 时汽车轮胎胎压表读数为 2.9 个标准大气压（表压——比外界大气压高出的部分；气体定律须用绝对压强，故 $p_1 = 2.9 + 1 = 3.9 \text{ atm}$ ），胎内气体体积、质量不变。次日中午 27°C ，胎压表读数变为多少？

想一想：

- 问：体积不变、质量不变，用哪个定律？
- 想：等容过程——查理定律 $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ 。

- 问：注意温度单位！ 17°C 是多少 K？
- 想：**必须用开尔文**： $T_1 = 290\text{ K}$ ， $T_2 = 300\text{ K}$ 。
- 问：代入算。
- 想： $\frac{2.9}{290} = \frac{p_2}{300} \Rightarrow p_2 = 2.9 \times \frac{300}{290} = 3.0$ 个大气压。

详细答案：解：先换算绝对压强： $p_1 = 2.9 + 1 = 3.9\text{ atm}$ （表压加外界大气压）。等容过程 $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ ： $\frac{3.9}{290} = \frac{p_2}{300}$ ， $p_2 \approx 4.03\text{ atm}$ （绝对压强）。换算回表压： $4.03 - 1 = 3.03\text{ atm}$ 。答：次日胎压表读数约 3.0 个标准大气压（绝对压强约 4.0 atm）。——注意：如果直接把表压当绝对压强代入，也会得到“3.0”，但那是概念错误碰巧数值相近；**气体定律里一律用绝对压强，这是物理教授最爱抠的细节。**

变式提醒：温度升高 10 K，胎压约升 3.4%——夏天跑高速轮胎发热、胎压涨就是这么来的，所以要求“冷态测胎压”；气体定律题第一步永远是**把摄氏温度换成开尔文**（ $T = t + 273$ ）。

1.3 气体三定律的图像与 p-V 图

等温线在 p-V 图上是**双曲线**（ $pV = \text{常数}$ ）

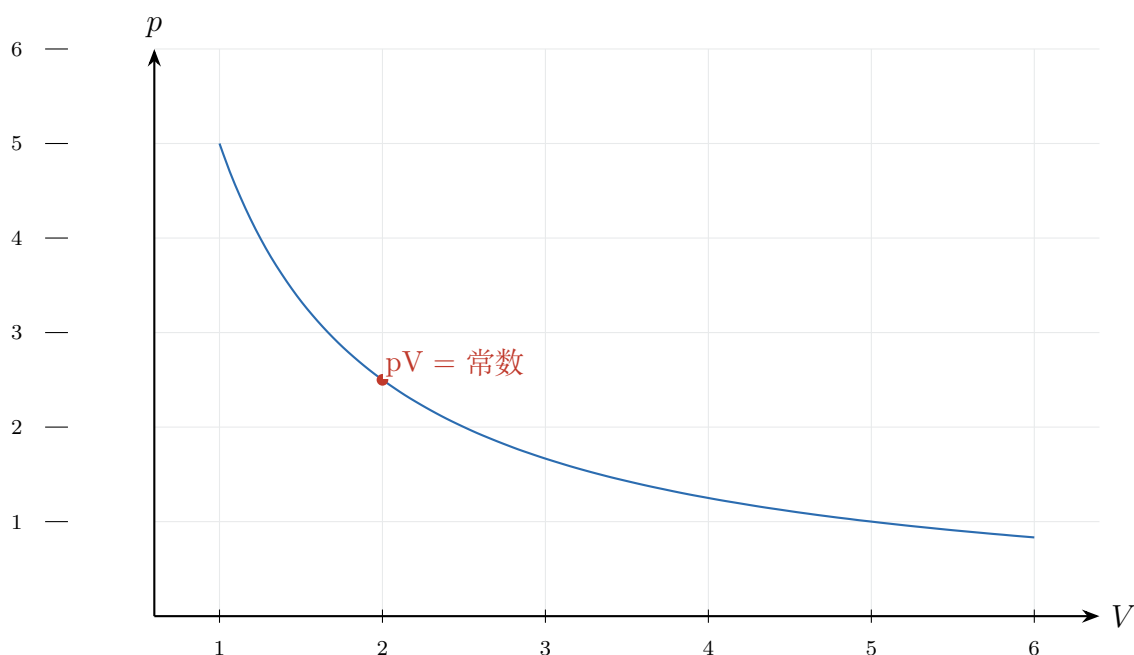


图 1.2: 等温过程 p-V 图：双曲线（ $pV = \text{常数}$ ）

，等容线在 p-T 图上是过原点的直线，等压线在 V-T 图上是过原点的直线。**读图题先判过程：曲线沿哪条线走，就套哪个定律。**

这套定律还管着新能源车上一个要紧的地方——储氢罐。氢燃料电池车把氢气加压到 700 个大气压存进罐里，体积一点点，装下的氢分子却多到能跑几百公里。加氢站给车充气，充

进去的氢气从高压储罐“等温”流进车罐，算的就是 $pV = \text{常数}$ 这笔账。气越压越“紧”，是分子间距被压小的结果——气体分子间距是分子直径的 10 倍左右，压缩空间大，这也是气体能被压缩而液体几乎不能的原因。

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 $2T_0$ 。求末状态压强。

想一想：

- 问：两个过程，先算什么？
- 想：分段算——先等温： $p_0 V_0 = p_1 \cdot 2V_0 \Rightarrow p_1 = p_0/2$ ；再等容： $\frac{p_1}{T_0} = \frac{p_2}{2T_0} \Rightarrow p_2 = 2p_1 = p_0$ 。
- 问：能一步到位吗？
- 想：能——直接用状态方程 $\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_2 \cdot 2V_0}{2T_0}$ ， $p_2 = p_0$ 。
- 问：两个过程一条线走完，说明什么？
- 想：末态压强回到 p_0 ——中间怎么变不重要，状态方程只管初末态。

详细答案：解： $\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_2 \cdot 2V_0}{2T_0} \Rightarrow p_2 = p_0$ 。答：末状态压强仍为 p_0 。

变式提醒：多过程气体题 = 状态方程一步到位（初末态），或分段套三定律；等容 vs 等压吸热差 = 对外做功 ($\Delta Q = W$)；热学题喜欢“一题串三定律”。

练一练

- 布朗运动是分子运动吗？它证明了什么？
- 为什么气体容易被压缩而液体几乎不可压缩（分子间距）？
- 一定质量气体等温压缩，压强为什么增大（微观解释）？
- 温度相同的气体 and 液体，分子平均动能相同吗？

参考答案：1. 是花粉颗粒的运动（被水分子撞击的宏观表现）——它间接证明了水分子的无规则热运动。2. 气体分子间距大（约分子直径的 10 倍），压缩空间大；液体分子几乎紧挨着（间距为 r_0 附近），斥力主导，很难压缩。3. 体积减小 $\rightarrow$ 分子数密度增大 $\rightarrow$ 单位时间碰撞器壁次数增多 $\rightarrow$ 压强增大（玻意耳定律的微观解释）。4. 相同——温度是分子平均动能的度量，与分子种类无关。

想一想（概念边界）：一杯水和一杯酒精温度相同，它们的分子平均动能一样大吗？为什么？

提示：一样大——温度是分子平均动能的度量 ($\bar{E} = 3kT/2$)，与分子种类无关。温度相同，平均动能就相同；但分子质量不同，所以平均速率不同（轻的快、重的慢）。

本章注释

〔注 1〕布朗运动是“原子存在”的终极证据，它串联起三位科学家：1827 年，植物学家布朗在显微镜下观察花粉微粒，发现它们无规则乱动——他试过酒精中的煤灰、岩石粉末，都在动，排除了“生物在游泳”；但布朗到死都没解释这个现象。1905 年，爱因斯坦用统计力学算出花粉颗粒位移的公式，证明这种运动正是看不见的水分子碰撞造成的——顺带，他还用这个理论“称”出了阿伏伽德罗常数。1908 年，法国物理学家佩兰用实验验证了爱因斯坦的公式，原子论这才被科学界普遍接受。值得一提：为原子论奋斗一生的物理学家玻尔兹曼，没能等到这一刻——1906 年他在一场争论中自杀身亡，而佩兰的证实只晚了两年。〔注 2〕

〔注 2〕玻尔兹曼的悲剧是科学史上最令人唏嘘的一页。19 世纪末，他坚持“原子真实存在”，对手却是当时物理学界的主流——以马赫、奥斯特瓦尔德为代表的“唯能论”，他们认为“原子只是方便计算的假设，不是真实存在”。玻尔兹曼的理论精深却难以理解，长期被围攻，精神崩溃，1906 年自杀。就在此后几年内，爱因斯坦和佩兰的工作证明了原子的真实性，玻尔兹曼是对的。今天的教科书里，玻尔兹曼常数 k 就印在“温度与平均动能”的公式上——他争论了一辈子的东西，成了每个学生的必考内容。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
分子数/质量	摩尔汇率	$N = nN_A$ 、 $m = M/N_A$
温度	平均动能	$\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$ ，与种类无关
气体压强	分子敲门	数密度大、动能大 $\rightarrow$ 压强大
一定质量气体	状态方程	$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$
温度不变	玻意耳	$pV = \text{常数}$
体积不变	查理	$p/T = \text{常数}$
压强不变	盖-吕萨克	$V/T = \text{常数}$
p-V 图	等温是双曲线	读图先判过程

你该记住的流程：读气体题四步走——(1) 看质量是否一定（一定才能用三定律）；(2) 判过程（等温/等容/等压）；(3) 摄氏换开尔文（ $T = t + 273$ ）；(4) 套对应定律或状态方程。核心记住一句话：**理想气体内能只由温度决定** + 热力学第一定律（第 3 章主角）。

章末检测（基础★ / 提升★★ / 探究★★★）

基础

- 分子动理论的三个基本观点是什么？
- 气体压强的微观解释是什么？
- 温度升高，气体分子平均动能如何变化？
- 玻意耳定律的内容与公式？
- 查理定律、盖-吕萨克定律各描述什么关系？

- 布朗运动是“分子的运动”还是“分子的运动的间接证据”？

提升

- 一定质量的气体，温度不变，体积变为原来一半，压强变为多少倍？
- 一定质量的气体，体积不变，温度从 300 K 升到 600 K，压强变为多少倍？
- 估算 1 mol 理想气体在标准状况下的体积（提示： $pV = nRT$ ， $R = 8.31$ ）。

探究

- 设计实验验证玻意耳定律：用注射器封闭空气，改变体积测压强，说明要控制什么量不变。

参考答案：1. (1) 物质由大量分子组成；(2) 分子永不停息做无规则运动；(3) 分子间存在引力和斥力。2. 大量分子对器壁碰撞产生（单位面积上的平均碰撞力）。3. 平均动能增大（温度是分子平均动能的标志）。4. 温度不变时压强与体积成反比 $p_1V_1 = p_2V_2$ 。5. 查理：体积不变，压强与热力学温度成正比；盖-吕萨克：压强不变，体积与热力学温度成正比。6. 布朗运动是悬浮微粒的运动，是分子无规则运动的间接证据（分子太小看不见，微粒被分子撞击而运动）。7. 压强变为 2 倍。8. 压强变为 2 倍（查理定律，热力学温度翻倍）。9. $V = nRT/p = 1 \times 8.31 \times 273 / 1.013 \times 10^5 \approx 0.0224 \text{ m}^3 = 22.4 \text{ L}$ 。10. 用注射器封闭一定质量空气，缓慢压/拉活塞，同时读体积与压强；必须保持温度不变（缓慢操作、不捂注射器）——验证 pV 乘积恒定。

第二章 固体、液体与物态变化

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 区分晶体与非晶体，理解晶体的各向异性；(2) 理解液体的表面张力、浸润与毛细现象；(3) 掌握熔化、汽化、液化等物态变化及其吸放热规律；(4) 理解饱和汽与湿度的概念，会解释“空调滴水”“夏天闷热”等现象。

冰为什么能浮在水上？水黽为什么能站在水面上？空调为什么往外滴水？夏天为什么“闷热”？冬天的雾、夏天的露、冰箱里的霜——这些你天天见的现象，上一章的气体定律一个都解释不了。因为它们的主角不是气体，而是**固体和液体**。这一章把“物态”讲明白：物质的三种状态怎么变、为什么变、变了以后吸热还是放热。

2.1 固体：晶体与非晶体

为什么食盐是方方正正的小块，而玻璃怎么敲都没有“面”？

把一块食盐放大看，它是规则的正方体；玻璃碎片的形状却完全随机。这个区别的根源在内部结构。

晶体：原子（分子、离子）按一定规律在空间周期性排列，有**规则的几何外形和固定的熔点**。食盐、金刚石、石英、冰、各种金属都是晶体。晶体又分两种：

- **单晶体：**整块由同一套“周期排列”贯穿（如食盐、单晶硅），表现出**各向异性**——不同方向的物理性质（如导热、导电、硬度）不同。石墨在一个方向导电、另一个方向绝缘，就是各向异性的活例子。
- **多晶体：**由大量杂乱取向的小单晶（晶粒）拼成（如铁块、铜块），整体看没有规则外形，各方向性质相同（各向同性），但**仍有固定熔点**。

非晶体：原子排列杂乱无章，没有规则外形、**没有固定熔点**（加热时逐渐软化，如玻璃、松香、橡胶）。民间说“玻璃是过冷液体”——因为它没有熔点，受热慢慢变软，像液体一样“流”（老窗玻璃底部比顶部厚，传说就是玻璃缓慢“流动”的证据，现代研究认为这更可能是制造工艺所致）。

判断一种材料是晶体还是非晶体，最可靠的依据不是外形（多晶体没规则外形），而是**有没有固定熔点**。

例题 2.1

如何判断一块金属是晶体还是非晶体？有人说“金属有光泽、有规则外形，所以是晶体”，对吗？想一想：

- 问：判断晶体的可靠依据是什么？
- 想：固定熔点（晶体有、非晶体没有）。
- 问：金属有规则外形吗？
- 想：通常没有——金属是多晶体，由许多杂乱取向的晶粒组成，整体没有规则几何外形。

详细答案：答：判断依据是“是否有固定熔点”——晶体熔化时温度不变（有熔点），非晶体熔化时温度持续升高。金属是多晶体，通常没有规则外形，但一定有固定熔点，所以是晶体。说法“有规则外形才是晶体”不准确：单晶体才有规则外形，多晶体没有。

变式提醒：晶体 = 固定熔点；外形、光泽、硬度都不是可靠判据。多晶体“有熔点但无规则外形”，非晶体“无熔点且无规则外形”——考场上看到“固定熔点”三个字就是晶体。

练一练

- 食盐、玻璃、铁、松香、冰、橡胶中，哪些是晶体？
- 多晶体与单晶体的相同点和不同点？

参考答案：1. 食盐、铁、冰是晶体（有固定熔点）；玻璃、松香、橡胶是非晶体。2. 相同：都有固定熔点；不同：单晶体有规则外形和各向异性，多晶体无规则外形、各向同性。

2.2 液体：表面张力与毛细现象

水黾能站在水面上，为什么它不掉下去？水为什么会“自己往高处爬”？

水黾比水重，但它稳稳站在水面——不是浮力（它没浸入水中），而是**表面张力**。

表面张力：液体表面层（最外面一层）的分子，比内部稀疏，分子间距大、引力占优势，使表面像一张绷紧的“橡皮膜”，有收缩的趋势。这个使液面收缩的力，就是**表面张力**。它带来的现象你天天见：水滴是球形（同样体积，球表面积最小）、露珠滚成球、水黾站水面、缝衣针能轻轻放在水面上不下沉、吹泡泡需要“绷紧的膜”。

浸润与不浸润：水在玻璃上铺开（水浸润玻璃），水银在玻璃上缩成珠（水银不浸润玻璃）。能否浸润取决于液体与固体分子间引力 vs 液体自身分子间引力的大小。毛细现象就是浸润的产物：把细玻璃管插进水中，水会**沿着管壁上升**（浸润，管越细升得越高）；插进水银里则下降。毛巾吸水、灯芯吸油、植物从根部把水吸到叶尖、墙根返潮——都是毛细现象。毛细管越细，液面上升越高（ $h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$ ， σ 是表面张力系数）——这一条在大学物理里才严格推导，现在记住“管越细升越高”即可。

想一想（概念边界）：把一根针轻轻放在水面上，针能浮着（表面张力）；把针用力按进水里，它会沉下去。为什么？

提示：表面张力只在液面“撑住”针——针与水面接触处形成凹形液面，表面张力提供向上的合力。按下去后针全部浸入水中，不再有表面张力支撑，浮力又小于重力，所以下沉。表面张力是“面”的力，不是“体”的力。

练一练

- 为什么水滴在荷叶上成球形，而落在玻璃上会铺开？
- 毛巾为什么能吸水？

参考答案：1. 荷叶不浸润水，水在表面张力作用下收缩成球（表面积最小）；玻璃浸润水，水铺开。2. 毛细现象——毛巾纤维间形成许多细管，水浸润纤维沿管上升。

2.3 物态变化：固、液、气的“变身”

冰变水、水变汽，每一次变身都要“买”或“卖”能量吗？

物态变化就是物质在固、液、气三态之间的转变，共六种，每种都伴随**吸热或放热**：

变化	方向	吸/放热	实例
熔化	固 → 液	吸热	冰化成水
凝固	液 → 固	放热	水结成冰
汽化	液 → 气	吸热	水烧开
液化	气 → 液	放热	玻璃上起雾
升华	固 → 气	吸热	樟脑丸变小
凝华	气 → 固	放热	窗上的冰花

一条记忆线：“**升级**”（固 → 液 → 气）**吸热**，“**降级**”（气 → 液 → 固）**放热**。为什么熔化要吸热？因为分子要从“整齐排列”挣脱成“可以滑动”，需要能量破坏晶格；汽化更要吸热，因为分子要彻底挣脱分子间引力飞到空中。

汽化有两种方式：**蒸发**（任何温度下、只在液面进行、缓慢）和**沸腾**（达到沸点、液面内部同时汽化、剧烈）。沸点与气压有关：气压高沸点高，气压低沸点低——高山上烧水不到100℃就开（饭不容易熟，要用高压锅）；高压锅就是靠增大气压提高沸点来“快煮”的。

升华凝华的生活现场：樟脑丸（萘）放久了变小是升华；冬天窗玻璃上的冰花是水蒸气凝华；舞台上“仙气”是干冰（固态 CO_2 ）升华吸热使水蒸气液化。干冰升华吸热，还让它成为冷链运输和人工降雨的主力。

例题 2.2

夏天从冰箱拿出的冰镇饮料，瓶外很快出现“水珠”。这些水珠是哪里来的？是“瓶里的水渗出来”吗？**想一想：**

- 问：瓶外的水珠从哪来？
- 想：空气中的水蒸气遇到冰冷的瓶壁，液化成了小水珠——不是瓶里的水渗出来。
- 问：为什么瓶壁温度低？
- 想：饮料和瓶被冰箱冷却到低温，空气中的水蒸气遇冷放热液化。

详细答案：答：瓶外水珠是空气中的水蒸气遇冷液化形成的——水蒸气放热变成液态水附着在瓶壁。瓶壁温度低于周围空气的“露点”（水蒸气开始液化的温度）时就会出现。

变式提醒：液化 = 气 → 液 = 放热。所有“起雾”“结露”都是水蒸气遇冷液化——眼镜起雾、浴室镜子模糊、冬天车窗内侧起雾，同一原理。夏天冰箱外壁“出汗”不是冰箱漏水，是空气中的水蒸气在外壁液化。

练一练

- 把樟脑丸放衣柜里，几个月后变小甚至消失——发生了什么变化？吸热还是放热？
- 晾衣服：为什么有风、天热时干得快？
- 冬天从室外进温暖的室内，眼镜片上为什么立即起雾？

参考答案：1. 升华（固 → 气），吸热。2. 蒸发快慢与温度、表面积、空气流速有关——天热温度高、有风加快空气流动，蒸发快。3. 室内空气中的水蒸气遇到冰凉的镜片液化。

2.4 饱和汽与湿度：为什么“闷热”的夏天这么难受

为什么同样的温度，有的天“干爽”，有的天“闷热”？

在一个密闭容器里放一些水，水不断蒸发，同时水蒸气也不断回到水面（凝结）——当单位时间蒸发的分子数等于凝结的分子数，就达到**动态平衡**，这时的水蒸气叫**饱和汽**，它的压强叫**饱和汽压**。

两个关键结论：

- **饱和汽压随温度升高而增大**——温度越高，水分子越容易挣脱液面，容器里能容纳的“水分”越多。
- **饱和汽压与体积无关**（温度一定时）——压缩容器，部分水蒸气会凝结回液体，压强不变；这就是“湿度是温度的函数”。

绝对湿度与相对湿度：空气中实际的水蒸气压强叫**绝对湿度**；它占同温度下饱和汽压的百分比叫**相对湿度**：

$$\text{相对湿度} = \frac{\text{绝对湿度}}{\text{饱和汽压}} \times 100\%$$

相对湿度越接近 100%，空气越“饱和”，蒸发越慢——人靠出汗散热，汗蒸发不出去，就觉得**闷热**。夏天 35℃ 但相对湿度 40%（干热）比 30℃ 但相对湿度 95%（湿热）体感更舒服，就是因为后者汗蒸发不掉。

生活现象全解：空调为什么滴水？室内空气被降温，相对湿度升高到 100%，多余的水蒸气在蒸发器上液化成水排出——空调“抽湿”的原理。天要下雨时为什么闷？空气接近饱和，地面水分蒸发不了。干燥箱里的硅胶、食品袋里的干燥剂，都是靠吸附水蒸气把相对湿度降下来，防止食物受潮。

想一想（概念边界）：常说“湿度 60%”，这 60% 是绝对湿度还是相对湿度？

提示：是相对湿度（ $60\% = \text{实际水汽压} \div \text{同温度饱和汽压}$ ）。同样 60% 相对湿度，夏天（饱和汽压大）空气中的水汽其实比冬天（饱和汽压小）多得多——所以同样的相对湿度，夏天“潮”、冬天“干”。

练一练

- 25℃ 时水的饱和汽压约 3.2 kPa，若空气中水汽压为 1.6 kPa，相对湿度多大？
- 为什么夏天下雨前特别闷热？
- 冬天教室开空调后，同学们觉得“干”——从湿度角度解释。

参考答案：1. 相对湿度 = $1.6/3.2 = 50\%$ 。2. 下雨前空气接近饱和、相对湿度接近 100%，汗蒸发慢，散热困难，故闷热。3. 空调/暖气使室温升高，饱和汽压增大，相对湿度显著下降，空气“干”——所以冬天要加湿。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）关于晶体与非晶体、物态变化，下列说法正确的是？

- A. 晶体一定具有各向异性
- B. 同种物质的晶体和非晶体在一定条件下可以相互转化
- C. 液体表面张力使液面有扩大趋势
- D. 蒸发只在沸腾时发生

答案 B。解析：A 错——**单晶体**各向异性，多晶体（如金属）各向同性，只有“晶体都有固定熔点”对所有晶体成立；B 对——同种物质晶体与非晶体可相互转化（如天然水晶与石英玻璃），这是物态变化的“变体”；C 错——表面张力使液面有**收缩**趋势（水珠成球就是证据）；D 错——蒸发在任何温度都能发生（晾衣服阴天也干），沸腾才需要达到沸点。物态变化题先记三组易混：**晶体有熔点/非晶体无；单晶各向异性/多晶各向同性；蒸发任意温度/沸腾定温。**

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 晶体与非晶体的最可靠判据是什么？
- 单晶体与多晶体在“外形”和“各向异性”上的区别？

- 什么是表面张力？举两个生活实例。
- 什么是毛细现象？管越细液面升得越高还是越低？
- 六种物态变化各吸热还是放热？（熔化、凝固、汽化、液化、升华、凝华）
- 什么叫饱和汽？什么叫相对湿度？

提升

- 冰 0°C 融化成水，温度不变，为什么还要吸热？热量去哪了？
- 高压锅为什么能更快煮熟食物？
- 30°C 时饱和汽压约 4.2 kPa，若相对湿度 60%，实际水汽压多大？

探究

- 用冰箱和一杯水，设计实验观察“结露与温度的关系”，并联系空调滴水原理。

参考答案：1. 有没有固定熔点。2. 单晶体有规则外形、各向异性；多晶体无规则外形、各向同性（但都有固定熔点）。3. 液体表面层分子稀疏、引力占优，使液面像绷紧的橡皮膜有收缩趋势；实例：水滴成球形、水黾站水面、缝衣针浮水面。4. 浸润液体沿细管上升的现象；管越细升得越高。5. 熔化、汽化、升华吸热；凝固、液化、凝华放热。6. 饱和汽：与液体达到动态平衡的蒸气；相对湿度 = 绝对湿度 ÷ 饱和汽压 × 100%。7. 吸热用于破坏分子间“晶格”排列（增加分子势能），温度不升——这部分热量叫熔化热；“熔化热”是物态变化的隐藏成本。8. 高压锅增大锅内气压 → 沸点升高（高于 100°C）→ 食物在更高温下煮熟更快。9. 绝对湿度 = 60% × 4.2 = 2.52 kPa。10. 从冰箱取出冰镇饮料，观察瓶壁水珠逐渐增多——温度越低、露点越低，越容易结露；空调蒸发器温度远低于室温，空气经过时水蒸气大量液化——“空调滴水”即除湿过程。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
有没有固定熔点	晶体 vs 非晶体	食盐/金属是晶体，玻璃/松香不是
水黾站水面、水滴成球	表面张力	液面像橡皮膜、表面积最小
毛巾吸水、灯芯吸油	毛细现象	管越细升得越高
冰变水、水变汽	熔化/汽化吸热	六种变化按“升级吸热、降级放热”记
瓶外水珠、眼镜起雾	液化放热	水蒸气遇冷凝结
闷热、空调滴水	相对湿度	湿度 = 实际水汽压 ÷ 饱和汽压

你该记住的流程：见到物态变化题 → (1) 判断变化方向（固/液/气）(2) 记“升级吸热、降级放热” (3) 分析热量来源或去向（吸热来自环境、放热给环境）(4) 涉及湿度用“相对湿度 = 实际 ÷ 饱和” (5) 生活现象（结露/起雾/出汗）先找“冷表面 + 水蒸气”。

第三章 热力学定律

上一章认识了微观（分子），这一章把能量语言搬进热学。**为什么打气筒打气会发热？为什么空调能把热从冷处搬到热处却不违背物理？为什么热机效率永远到不了 100%？**这三个问题分别由热力学第一、第二定律回答。学完这一章，你就能用能量守恒的眼光看一切热现象——顺便认识一位 28 岁提出“卡诺循环”、36 岁就去世的天才，他的笔记埋了 40 多年才发现。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解内能、温度与热传递；(2) 掌握热力学第一定律并会计算；(3) 理解热力学第二定律与熵的概念。

3.1 内能：分子动能与分子势能之和

物体内部的能量从哪来？我们把物体内部所有分子的动能与分子势能的总和，叫作物体的**内能**——所有分子的动能（温度决定）+ 分子势能（体积/间距决定）。注意理想气体（分子间无作用力）的特殊性：**内能只由温度决定**： $\Delta U = nC_V \Delta T$ （★拓展： C_V 是定容摩尔热容，高中只记结论“理想气体内能只由温度决定”，此公式了解即可、非考纲要求）——所以热学题里“温度变了”基本等于“内能变了”。内能与机械能不同：机械能看整体运动，内能看内部热运动。

先破一个直觉：**温度高的物体，内能一定大吗？**不一定。一盆 40°C 的水和一粒烧红的铁珠（ 800°C ），铁珠温度高得多，但水分子数多得多——内能是“所有分子”的能量总和，温度只管“每个分子平均”的能量。所以判断题里说“温度高内能大”，先问一句：分子数一样吗？

热传递与做功是改变内能的两种方式：**做功是“宏观能量的转化”**（摩擦生热、压缩气体），**热传递是“微观能量的转移”**（接触传热）——两者效果相同，但本质不同。你天天用到的电磁炉，锅底不是被“加热”的，是被锅内的涡电流“做功”变热的——这是做功改内能；微波炉则是让水分子在交变电场中快速转向、摩擦生热（**介电加热**）——两种方式，同一桌菜。

3.2 热力学第一定律：能量守恒在热学

$$\Delta U = Q + W$$

(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。)

公式只是工具,关键是怎么用。应用四步: (1) **判过程** (等温/等容/等压/绝热); (2) **定 Q** (绝热 $Q=0$, 等容 $W=0$, 等温 $\Delta U=0$); (3) **定 W** (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,代入就完了。

这条定律的本质,就是物理 I 第 8 章那句“能量不会凭空消失”在热学里的具体形式——焦耳在啤酒厂搅拌了 40 年水,证明的正是“做功和热传递是同一笔账”。

例题 3.1

一定质量理想气体绝热压缩, 体积减半, 内能如何变?

想一想:

- 问: 绝热意味着什么?
- 想: $Q=0$ ——与外界无热交换。
- 问: 体积减小, 外界对气体做功还是气体对外做功?
- 想: 体积减小 $\rightarrow$ 外界对气体做功, $W > 0$ 。
- 问: 内能怎么变?
- 想: $\Delta U = Q + W = 0 + W > 0$ ——内能增加、温度升高。
- 问: 这个结论对应什么生活现象?
- 想: 打气筒筒壁发热——压缩空气做功, 内能变热。

详细答案: 解: 绝热 $Q=0$, 外界对气体做功 $W > 0$, $\Delta U = W > 0$ 。答: 内能增加、温度升高——打气筒筒壁发热就是这个道理。

变式提醒: 四步判过程是热力学第一定律题的标准动作; “绝热压缩升温、绝热膨胀降温”是高频结论; 等温过程内能不变 (理想气体), 吸的热全变成对外做功。

3.3 热力学第二定律: 热量不会自动倒流

第二定律 (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)。

第二定律背后还有个更深刻的量——**熵**: 系统的“混乱程度”。**孤立系统的熵永不减少**, 这就是第二定律的本质“熵增”: 能量总是从“有序”流向“无序”。破镜不能重圆、热水不会自动变得更热, 都是熵在作怪。“熵”这个字甚至走出了热学: 信息科学里的**信息熵**就是借用

它衡量“不确定性”——你手机压缩照片、微信传输数据，压缩算法背后算的就是信息熵。〔注 2〕（★拓展：信息熵属交叉学科内容，了解即可，非考纲要求）

热机的效率：

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

（卡诺循环， T_2 低温热源温度）——**效率不可能达到 100%**。这道公式出自一位只活了 36 岁的法国人：卡诺。1824 年他 28 岁时自费出版了唯一一本书《论火的动力》，只印了 600 本，几乎没有反响；他 1832 年因霍乱去世，大部分手稿被当作废纸烧掉；直到 40 多年后，他的弟弟整理遗物才发现残稿，热力学界才意识到这位年轻人早在 1824 年就画出了热机的理论天花板。〔注 1〕

你家的**空气能热水器**，干的就是“逆卡诺循环”：它把室外空气里的热“搬”进水里——气温明明比水凉，热水器却把热从冷空气搬到热水里。这不违背第二定律，因为它耗电做功（压缩机），和空调一个原理。冬天外面 0°C ，它照样能从空气里“抠”出热来，能效比能达到 3 以上——一度电搬出三度电的热。第二定律不是拦路的墙，是告诉人类“怎么搬才合算”的规矩。

例题 3.2

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

想一想：

- 问：最大效率怎么算？
- 想： $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{500} = 40\%$ 。
- 问：为什么理想卡诺也到不了 100%？
- 想：必须向低温热源排热（ $T_2 \neq 0$ 时 $\eta < 1$ ）——第二定律的“留下影响”。
- 问：实际热机为什么更低？
- 想：还有摩擦、非准静态等损失——40% 是理论天花板，实际还要打折。

详细答案：解： $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{500} = 40\%$ 。答：最大效率 40%；实际热机因摩擦等损失更低。

变式提醒：提高效率的路径是提高高温热源温度（ T_1 大 $\rightarrow \eta$ 大）——这就是为什么电厂拼命提高蒸汽温度；空调/热泵是“逆卡诺”，效率用“能效比”衡量（搬走的热 $\div$ 耗电），可以大于 1。

练一练

- 做功和热传递改变内能，有什么相同与不同？

- 空调把热量从低温房间搬到高温室外，违背热力学第二定律吗？为什么？
- 为什么不能从单一热源吸热全部转化为功？这违反什么？
- 理想气体的内能由什么决定？等温过程中内能变吗？

参考答案：1. 都能改变内能（效果相同），但做功是宏观能量的转化、热传递是微观能量的转移（高温 → 低温传递），本质不同。2. 不违背——第二定律说的是“自发”，空调靠耗电（外力做功）把热从冷处搬到热处，不是自发。3. 若能从单一热源吸热全部做功，就可无代价地把热变功、循环取之不尽——违反熵增（能量有序度降低不可逆）。4. 只由温度决定（理想气体分子无势能）；等温过程内能不变（ $\Delta U = 0$ ）。

想一想（概念边界）：绝热压缩气体，内能怎么变？如果不知道“绝热”两个字，还能判断吗？

提示：绝热 $Q=0$ ，压缩 $W>0$ ，内能增加、温度升高（打气筒发热）。不知道“绝热”就无法判断——可能同时吸热或放热，内能变化不定。所以热学题第一步永远是：判过程。

本章注释

〔注 1〕卡诺（Sadi Carnot, 1796–1832）是热力学史上最令人叹息的天才：父亲是法国大革命时期的军事将领，他本人 28 岁自费出版《论火的动力》（1824 年），用“水轮类比”第一次证明热机效率存在上限；这本书当时几乎无人问津。1832 年他因霍乱去世，年仅 36 岁，遗物中的大量手稿被当作废纸烧掉——幸存的残稿显示他已经预见到热功当量和热力学第一定律。直到 1870 年代，他的弟弟整理遗物时重新发表这些内容，卡诺循环的价值才被世界认识。今天“卡诺”这个名字印在每一本热学教材里，而当年他出版那本书时，法国科学院的院士们没有一个注意到它。

〔注 2〕“熵”这个词是克劳修斯 1865 年造的，取自希腊语“转变”。它最初只是个热学概念，后来玻尔兹曼给出了它的统计解释：熵衡量的是系统微观状态的数量（ $S = k \ln W$ ），这条公式如今刻在玻尔兹曼的墓碑上——就是上一章注释里那位为原子论抗争一生的物理学家。再后来，香农 1948 年创立信息论时借用了这个词：信息熵衡量“不确定性的多少”。从热力学到信息科学，“熵”成了 20 世纪最有影响力的物理概念之一。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
内能	动能 + 势能	理想气体只由温度决定
做功/传热	两种改内能方式	转化 vs 转移
热力学第一定律	能量守恒	$\Delta U = Q + W$ （符号约定）
绝热	$Q = 0$	压缩升温、膨胀降温
等容	$W = 0$	Q 全变内能
等温	$\Delta U = 0$	吸热全做功
第二定律	不能自发倒流	熵增、单一热源不能全做功
卡诺效率	理论天花板	$\eta = 1 - T_2/T_1$

你该记住的流程：读热力学题 → (1) 判过程（等温/等容/等压/绝热）→ (2) 定 Q 、 W 、 ΔU 谁为零 → (3) 代入第一定律 → (4) 效率题套卡诺公式 → (5) 验算：方向对不对（压缩该升温）。

真题直击（改编自 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 p_1 时长度 L_1 ，水位下降后温度不变、压强变为 p_2 ，则长度 $L_2 = ?$ ，该过程中气体对外做正功还是负功？

想一想：

- 问：温度不变 = 什么过程？
- 想：等温（玻意耳定律）： $p_1 L_1 S = p_2 L_2 S$ ， $L_2 = \frac{p_1 L_1}{p_2}$ 。
- 问：水位下降，空气柱变长还是变短？对外做功正负？
- 想：水位下降 → 管内外压差变小 → 空气柱变长（ $L_2 > L_1$ ）→ 气体体积增大、**对外做正功**（ $W < 0$ ，符号约定）。
- 问：能量从哪来？
- 想：等温 $\Delta U = 0$ ，对外做功则必然吸热（ $\Delta U = Q + W = 0$ ， $W < 0$ 则 $Q > 0$ ）。

详细答案：答： $L_2 = \frac{p_1 L_1}{p_2}$ ；气体对外做正功（体积增大）；等温膨胀吸热补充能量。一题考了玻意耳 + 第一定律 + 符号约定三件事。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 改变内能的两种方式？
- 热力学第一定律的表达式？
- 热力学第二定律的两种表述（克劳修斯/开尔文）？
- 什么是熵？孤立系统中熵如何变化？
- 理想气体等温变化时内能如何变化？
- 热机的效率为什么不能达到 100%？

提升

- 气体从外界吸热 200 J，同时对外做功 80 J，内能变化多少？
- 理想气体绝热压缩，温度如何变化？为什么？
- 空调把热从冷处搬到热处，为什么不算违反热力学第二定律？

探究

- 用一杯热水和冷水，说明“热传导的方向性”并解释为什么不能自动倒流。

参考答案：1. 做功和热传递。2. $\Delta U = W + Q$ （外界对系统做功为正，吸热为正）。3. 克劳修斯：热量不能自发地从低温物体传到高温物体；开尔文：不可能从单一热源吸热全部做功而不产生其他影响。4. 熵是系统混乱程度的量度；孤立系统熵永不减少（熵增）。5. 内能不变（理想气体内能只由温度决定）。6. 必有热量排向低温热源（低温热源是必须的），效率 $\eta = 1 - T_2/T_1 < 1$ 。7. $\Delta U = Q + W = 200 + (-80) = 120 \text{ J}$ （内能增加 120 J）。8. 温度升高——绝热无热交换，外界压缩做功全部转化为内能， $\Delta U = W > 0$ 。9. 不违反——第二定律说“自发”传导有方向；空调靠外界做功（耗电）把热从冷处搬到热处，不是自发的。10. 热水会自然变冷、冷水不会自动变热（高温 → 低温自发）；混合后不再自动分层——这就是熵增：孤立系统的宏观过程有方向性。

第四章 光学

这一章研究光的本性。光到底是什么？它“直着走”（反射折射）、“绕得过去”（衍射）、“加得起来”（干涉）、“有方向”（偏振）——这些性质在 19 世纪被一个个揭开。学完这一章，你就能解释：钻石为什么闪耀、肥皂泡为什么彩色、光纤为什么能传光、偏光太阳镜为什么能滤掉水面反光。而“光到底是粒子还是波”这个问题，人类吵了整整 300 年——这可能是科学史上最漫长、最精彩的一场官司。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 掌握光的反射、折射定律与全反射条件；(2) 理解光的干涉、衍射、偏振（波动性证据）；(3) 认识电磁波谱与应用。

4.1 光的反射与折射：斯涅尔定律

光遇到界面会怎样？一部分弹回去（反射），一部分钻进去（折射）。反射定律：入射角 = 反射角（且在同一平面）。折射定律（斯涅尔定律）：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

折射率 $n = \frac{c}{v}$ （真空光速与介质中光速之比）。光从光疏介质进光密介质，向法线靠拢。

全反射：光从光密介质（如水 $n = 1.33$ 、玻璃 $n = 1.5$ ）射向光疏介质，入射角超过临界角时，光全部反射：

$$\sin C = \frac{n_{\text{疏}}}{n_{\text{密}}}$$

光纤通信、钻石的闪耀、海市蜃楼都靠它。你现在上网刷的视频，走的就是海底光缆——上百万公里的玻璃纤维躺在太平洋底下，光在里面一“撞”到管壁就全反射，一路“弹”着传过整片大洋。光纤里传输的是光，靠的却是全反射这条“不拐弯的路”。

先破一个常见直觉：**光从空气射入水中，会全反射吗？**不会。全反射必须“从光密射向光疏”——空气比水疏，光从空气进水是“从疏到密”，只会向法线靠拢，永远不会全反射。两个条件缺一不可：(1) 光从光密射向光疏；(2) 入射角 $\geq$ 临界角。这个“方向性”是判断全反射的第一道关卡。

例题 4.1

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

想一想：

- 问：临界角公式是什么？注意光从哪边射向哪边。
- 想：光从光密（水）射向光疏（空气）： $\sin C = \frac{n_{\text{疏}}}{n_{\text{密}}} = \frac{1}{1.33} \approx 0.752$ ， $C \approx 49^\circ$ 。
- 问：潜水员看天空为什么是“圆窗”？
- 想：只有入射角小于临界角的光才能从水中射入空气被看到——水面上的世界被压缩在一个临界角锥里（ 49° 的锥角），锥外全是全反射。

详细答案：解： $\sin C = \frac{1}{1.33} \approx 0.752$ ， $C \approx 49^\circ$ 。答：临界角约 49° ；潜水员看到的“圆窗”由临界角决定——超过 49° 的光全反射回水中，看不到。

变式提醒：全反射发生的两个条件：(1) 光从光密射向光疏；(2) 入射角 $\geq$ 临界角。缺一不可——光从空气射入水中永远不会全反射（光疏进光密）。

4.2 光的波动性：干涉、衍射、偏振

光会不会像水波一样“叠”出条纹？——会！这就是**光的干涉**。干涉是波叠加的结果，但它有个苛刻前提：**相干**——两列光必须频率相同、振动方向相同、相位差恒定。普通的两盏灯不会干涉（相位随机变化，叠加结果瞬时平均，看不出条纹）；同一束光分成两路再汇合（如双缝），两路光的相位关系稳定，才能看到稳定的明暗条纹。

双缝干涉（杨氏实验）：一束光先通过一条窄缝 S_0 （保证“同一个光源”），再经过两条平行缝 S_1 、 S_2 ，屏上出现等间距的明暗条纹。为什么会有明暗？因为屏上每一点到两条缝的距离不同——**光程差** δ 决定了该点是加强还是减弱：

- 光程差为波长整数倍（ $\delta = k\lambda$ ， $k = 0, 1, 2 \dots$ ）：两列光同相到达，振动加强，**明纹**；
- 光程差为半波长奇数倍（ $\delta = (2k + 1)\lambda/2$ ）：两列光反相到达，振动抵消，**暗纹**。

由几何关系（缝间距 d 远小于屏距 L ）可推导出相邻明纹（或暗纹）间距：

$$\Delta x = \frac{L\lambda}{d}$$

——条纹间距与波长成正比、与缝距成反比、与屏距成正比。**测出 Δx 就能反推波长**，这是双缝测波长实验的原理。用白光做实验时，不同波长的条纹错开，中央是白色亮纹、两侧是彩色条纹——这是“白光干涉”的识别特征。

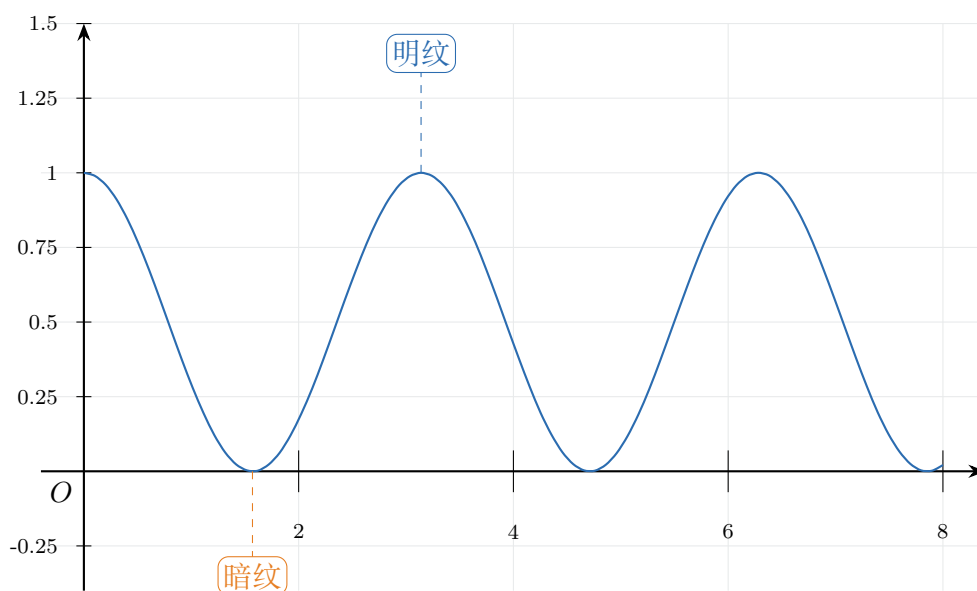


图 4.1: 双缝干涉光强分布：明暗相间条纹

薄膜干涉：一束光照到透明薄膜（肥皂膜、油膜、增透膜）上，在膜的上表面和下表面各反射一次，两束反射光来自同一入射光、是相干光，叠加产生干涉。膜厚不同，两束光的光程差不同：光程差为波长整数倍的位置反射光加强（亮），半波长奇数倍的位置减弱（暗）。肥皂泡为什么彩色？白光里各种波长的光在不同厚度处各自加强/减弱——不同位置显出不同颜色。眼镜片的“增透膜”（氟化镁，约 $\lambda/4$ 厚）利用的是“反射减弱”：膜两面反射光光程差为半波长，反射光抵消，透过光更多——所以镜片更亮、反光更少。

光的衍射：光绕过障碍物边缘继续传播的现象。**单缝衍射：**光通过狭缝后不“走直线”，屏上出现中央亮纹最宽最亮、两侧明暗相间但越来越暗的图样。衍射的显著程度取决于缝宽 a 与波长的对比： $a \approx \lambda$ 时衍射最明显； $a \gg \lambda$ 时几乎看不出衍射（光“走直线”）。人眼瞳孔直径约 2–3 mm，远大于可见光波长（约 500 nm），所以看普通物体不觉得有衍射；但当物体小到与波长同量级（如细丝、小孔），衍射就明显了。**衍射证明光“绕得过去”，干涉证明光“加得起来”**——两者都是波动性的铁证。

衍射还有个重要应用——**分辨本领**：望远镜/显微镜能看到多细的细节，受衍射限制。两个点光源靠得太近，它们的衍射光斑重叠，就看不清“是两个点”——这叫“衍射极限”。天文望远镜口径越大、显微镜物镜口径越大，分辨本领越高，就是这个原因。

光的偏振：横波的特有性质——振动方向被限制在某个平面内。普通光（阳光、灯光）的振动方向在垂直于传播方向的平面内各方向都有，是**非偏振光**；偏振片只让某一方向振动的光通过，透过的光是**偏振光**（振动方向单一）。怎么判断光是横波还是纵波？——让光通过两个偏振片：转动第二个偏振片，若透过的光强发生变化（转到互相垂直时完全消光），说明光是横波（只有横波能偏振）；声波是纵波，怎么转偏振片都没反应。**只有横波能偏振**——这是判断波类型的实验依据。

偏振的应用：偏光太阳镜（滤掉水面/路面反射的偏振光，减眩光）、3D 电影眼镜（左眼、右眼各戴一块方向不同的偏振片，放映机投出两路偏振方向不同的画面，左右眼看到不同影

像，大脑合成立体感)、液晶显示(液晶分子控制偏振光的偏转，实现亮暗)。

这一节背后，是一场打了 300 年的官司：牛顿说光是微粒(他威望太高，微粒说统治了 100 多年)；惠更斯早就提出光是波，却被压得默默无闻；1801 年杨氏双缝实验让波动说复活；1818 年法国科学院悬赏征文，评委泊松(微粒说支持者)用波动说的公式算出一个“荒谬”结果——圆盘阴影中心应该有个亮斑，他以为这能推翻波动说，结果实验一做，**亮斑真的出现了**，泊松亲手帮对手赢得了这场官司。〔注 1〕

例题 4.2

用波长 $\lambda = 600 \text{ nm}$ 的激光做双缝干涉实验，双缝间距 $d = 0.4 \text{ mm}$ ，屏到双缝的距离 $L = 1.5 \text{ m}$ 。求相邻明条纹的间距。**想一想：**

- 问：双缝干涉条纹间距公式？
- 想： $\Delta x = \frac{L\lambda}{d}$ ——间距与波长成正比、与缝距成反比。
- 问：单位怎么统一？
- 想： $\lambda = 600 \text{ nm} = 6 \times 10^{-7} \text{ m}$ ， $d = 0.4 \text{ mm} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。
- 问：代入算？
- 想： $\Delta x = \frac{1.5 \times 6 \times 10^{-7}}{4 \times 10^{-4}} = 2.25 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.25 \text{ mm}$ 。

详细答案：解： $\Delta x = \frac{L\lambda}{d} = \frac{1.5 \times 6 \times 10^{-7}}{4 \times 10^{-4}} \approx 2.25 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。答：相邻明条纹间距约 2.25 mm——波长只有 600 纳米的“细活”，被双缝放大成了一万多倍的明暗条纹。

变式提醒：换用更短的波长(蓝光 vs 红光)，条纹更密；双缝间距 d 加大，条纹也变密——**波长越短、缝越宽、屏越近，条纹越密**。测波长就是量 Δx 反推 λ (双缝测波长实验的原理)。

4.3 光速与电磁波谱：光也是电磁波

光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，真空中的光速恒定(相对论基础，第 6 章)。电磁波谱从长波到短波：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**(约 380 至 780 nm)。

这一段“窄缝”之外，全是你的日常生活：WiFi 和 5G 信号是微波频段，微波炉用它加热食物；红外线看不见，但红外热成像能“看见”体温——疫情时地铁口的测温枪，测的就是你额头辐射的红外线；医院拍片的 X 光、机场安检的 X 光机、深空里的射电望远镜(中国天眼 FAST 听的就是宇宙的无线电波)……整个电磁波谱，就是一张“看得见和看不见的光”全家福。

例题 4.3

可见光中心波长 500 nm 对应的频率多大？

想一想：

- 问：波长、频率、波速关系？
- 想： $c = \lambda f$, $f = \frac{c}{\lambda}$ 。
- 问：代入算。
- 想： $f = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^{-7}} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ——每秒振荡 600 万亿次。

详细答案：解： $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^{-7}} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。答：频率约 $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。

变式提醒：光进入介质：频率不变（光源决定）、波速变小（ $v = c/n$ ）、波长变短（ $\lambda = v/f$ ）——“变的是波长和波速，不变的是频率”。

动手试试（材料：一杯水、一根筷子（或铅笔））

先猜：把筷子斜插进水里，从侧面看，筷子是直的还是“折断”的？

动手：筷子斜着插入装满水的杯子，从侧面和上方各看一眼。

观察：水面处筷子像“折断”了一样，弯折的方向还挺奇怪。

思考：光从水进入空气时“拐了弯”——这就是折射（斯涅尔定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ）。你看到的“折断”不是筷子弯了，是光路拐了。顺带一句：光从水射向空气时角度够大还会全反射——这就是下一节光纤和钻石闪耀的原理，同一件事的两面。

练一练

- 全反射的两个条件是什么？光从空气射入水中会发生全反射吗？
- 为什么油膜、肥皂泡是彩色的？（干涉还是衍射？）
- 为什么只有横波能发生偏振？声波为什么不行？
- 光从真空进入水中，频率、波速、波长哪个变、哪个不变？

参考答案：1. 光从光密射向光疏 + 入射角 $\geq$ 临界角；不会（光疏进光密只折射）。2. 薄膜干涉——膜两面的反射光干涉，不同厚度显不同颜色。3. 偏振是振动方向被限制在特定平面，纵波振动方向固定沿传播方向，不存在“横”的振动可滤。4. 频率不变（光源决定）、波速变小、波长变短——变的是波速和波长，不变的是频率。

想一想（概念边界）：光的干涉和衍射都能证明波动性，它们的区别是什么？一个光源能自己和自己干涉吗？

提示：干涉是两列相干光叠加，衍射是一列光绕过障碍物“自我叠加”；一个普通光源不能和自己干涉——它发出的光是“非相干光”（相位随机），需要双缝把同一束光分成两路再合，才“相干”。这就是为什么杨氏实验要用双缝。

本章注释

〔注 1〕光的本性之争是科学史上最漫长的一场官司：牛顿在《光学》（1704 年）里主张光是微粒，凭他的威望，微粒说统治了近百年；惠更斯 1690 年就提出波动说，但既没有牛顿的名气、又缺实验证据，被埋没。转折点是 1801 年，英国医生杨用双缝实验做出了光的干涉条纹——波动说复活。1818 年，法国科学院悬赏征文研究衍射，评委泊松（微粒说支持者）用波动理论算出一个他以为“荒谬”的推论：圆盘阴影正中心应该有一个亮斑。他以为这能一击致命——结果实验者菲涅耳真的做出了那个亮斑，“泊松亮斑”反而成了波动说的铁证。官司并没有结束：1905 年爱因斯坦用“光子”解释光电效应（第 5 章），微粒说以“粒子性”的名义回归；最终量子力学承认：光是波粒二象性——这场打了 300 年的官司，两边都对。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
折射 / 折射率	斯涅尔定律	$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, n = c/v$
光密 $\rightarrow$ 光疏 + 大角度	全反射	$\sin C = n_{\text{疏}}/n_{\text{密}}$, 光纤/钻石
双缝 / 干涉	波动性	$\Delta x = L\lambda/d$, 测波长
薄膜 / 油膜	薄膜干涉	增透膜、肥皂泡彩色
单缝 / 小孔	衍射	绕过去, 中央亮纹
偏振片 / 3D 眼镜	横波才能偏振	滤振动方向
电磁波谱	频率排序	无线电 $\rightarrow$ 微波 $\rightarrow$ 红外 $\rightarrow$ 可见 $\rightarrow$ 紫外 $\rightarrow$ X $\rightarrow$ γ

你该记住的流程：读光学题 $\rightarrow$ (1) 判现象（反射/折射/全反射/干涉/衍射/偏振） $\rightarrow$ (2) 全反射先查两个条件（方向 + 临界角） $\rightarrow$ (3) 波动性题先想“干涉还是衍射”（双缝 vs 单缝） $\rightarrow$ (4) 光过介质：频率不变、波速波长变 $\rightarrow$ (5) 偏振只在横波。

真题直击（改编自高考真题，单选） 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

读题：逐项对号入座——A 错（光电效应揭示的是粒子性，第 5 章会讲）；B 错（进入介质波长变短）；C 对（光纤靠全反射）；D 错（油膜彩色是薄膜干涉）。答案 C。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 光的反射定律内容？
- 折射定律（斯涅尔定律）公式？折射率 n 的定义？
- 发生全反射的两个条件？
- 双缝干涉条纹间距公式？
- 光产生干涉的条件是什么？

- 什么是光的偏振？说明光是横波还是纵波？

提升

- 光从空气射入水中 ($n = 1.33$)，入射角 45° ，折射角约多大 ($\sin 45^\circ = 0.707$)？
- 水的临界角约多大 ($n = 1.33$)？
- 用波长 600 nm 光做双缝实验，缝距 0.3 mm 、屏距 1 m ，条纹间距多大？

探究

- 如何用肥皂膜观察薄膜干涉？薄膜为什么会出现彩色条纹？

参考答案：1. 反射角等于入射角，反射光线、入射光线、法线在同一平面内。2. $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ； $n = c/v$ 。3. (1) 光从光密射向光疏；(2) 入射角 $\geq$ 临界角。4. $\Delta x = L\lambda/d$ 。5. 频率相同（相干光）、振动方向相同、相位差恒定。6. 振动方向被限制在某一平面——只有横波能偏振，所以光是横波。7. $\sin \theta_2 = \sin 45^\circ / 1.33 = 0.707 / 1.33 \approx 0.53$ ， $\theta_2 \approx 32^\circ$ 。8. $\sin C = 1 / 1.33 \approx 0.75$ ， $C \approx 49^\circ$ 。9. $\Delta x = 1 \times 6 \times 10^{-7} / 3 \times 10^{-4} = 2 \times 10^{-3}\text{ m} = 2\text{ mm}$ 。10. 肥皂膜竖放，膜因重力上薄下厚，两表面反射光干涉，不同厚度处加强不同波长——出现彩色条纹；白光各波长分别干涉，故呈彩色。

第五章 近代物理

太阳为什么会发光？如果按经典物理算，太阳烧化学燃料几千年就该烧完——但它已经烧了 46 亿年。答案藏在“质量变成能量”里。这一章走进 20 世纪的物理革命。光到底是什么？原子内部长什么样？原子核为什么能释放巨大能量？三个问题的答案分别是：**光是一份一份的（量子）、原子是分层的（能级）、质量就是能量 ($E = mc^2$)**。近代物理的考点很固定：公式就那几个，关键是“对号入座”。而这场革命的主角，是一个 26 岁的专利局小职员——1905 年，他一年内写出了四篇改变世界的论文。〔注 1〕

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解光电效应规律与光量子解释；(2) 掌握玻尔原子模型与能级跃迁；(3) 理解原子核组成、放射性、核反应与核能。

5.1 光电效应：光是一份一份的

光电效应：光照射金属表面，电子被“打”出来。四个实验规律：(1) **存在截止频率**（频率低于它，再强的光也没电子）；(2) **瞬时性**（光照射后立刻产生光电子，迟滞时间极短，约 10^{-9} s）；(3) **光电子最大初动能只与频率有关**（与光强无关）；(4) **光强只决定光电子数目**（饱和电流），不决定能量。这个现象为什么“打脸”经典波动说？光强再大（能量再多），频率不够就是打不出电子——能量“给不进去”。波动说以为光强决定能量，可光电效应偏偏看频率。爱因斯坦用光量子（光子）解释：光是一份一份的，每份能量 $E = h\nu$ ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)。**光电效应方程**（近代物理第一方程）：

$$h\nu = W_0 + E_{k\max}$$

（光子能量 = 逸出功 + 最大初动能）。遏制电压 U_c ： $eU_c = E_{k\max}$ 。

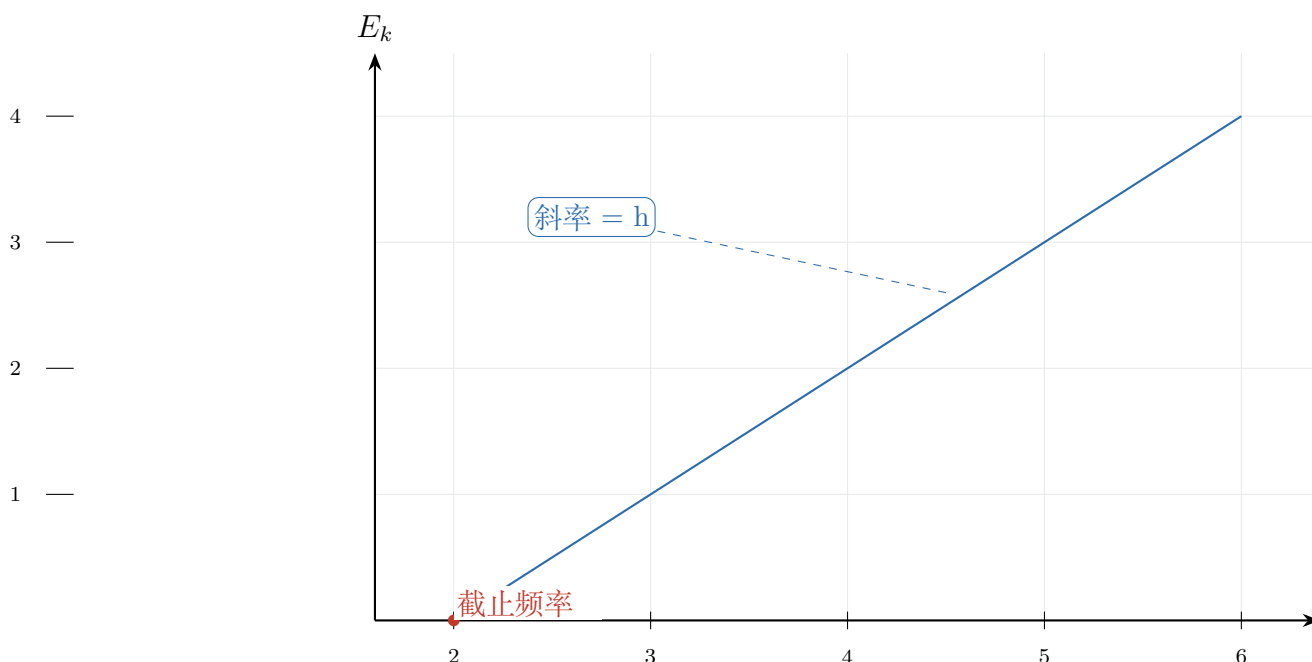


图 5.1: 光电效应方程: E_k 随频率线性增大, 斜率 = 普朗克常量 h

“光是一份一份的”这个想法, 最早来自普朗克——1900 年他为了解释黑体辐射, 被迫假设能量是一份一份的, 但他自己都不信, 花了 15 年想把它从理论里删掉, 直到光电效应被实验证实。一个物理学家发明了自己最不喜欢的理论, 这在科学史上并不多见。

光电效应不是书上的古董——**你手机背后的摄像头、太阳能屋顶上的光伏板, 干的就是这件事**。相机感光元件上几千万个像素, 每个都是一个微型光电探测器: 光子打进来, 电子被打出去, 光越强电子越多——你按下快门的那一秒, 手机在几千万个像素上同时做光电效应实验。太阳能电池板更是直接: 光子把电子“打”到高能级形成电压, 太阳光进去、电流出来。

例题 5.1

某金属逸出功 $W_0 = 2.5 \text{ eV}$, 求截止频率; 用频率 $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的光照射, 求光电子最大初动能。**想一想:**

- 问: 截止频率怎么算? 注意单位。
- 想: $h\nu_0 = W_0$, $\nu_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{2.5 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} \approx 6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ——eV 要换成焦耳 ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)。
- 问: 入射光子能量多大?
- 想: $h\nu = 6.63 \times 10^{-34} \times 7.5 \times 10^{14} \approx 4.97 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 3.1 \text{ eV}$ 。
- 问: 最大初动能呢?

- 想： $E_{k\max} = h\nu - W_0 = 3.1 - 2.5 = 0.6 \text{ eV}$ 。

详细答案：解： $\nu_0 = \frac{W_0}{h} \approx 6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ； $h\nu \approx 3.1 \text{ eV}$ ； $E_{k\max} = h\nu - W_0 = 0.6 \text{ eV}$ 。答：截止频率 $6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ，最大初动能 0.6 eV 。注意决策链：题里给了逸出功 W_0 ，立刻反应要用 $h\nu = W_0 + E_{k\max}$ ；给了频率，先算光子能量 $h\nu$ ，再减去 W_0 得初动能。光电效应题永远走「光子能量 $\rightarrow$ 减逸出功 $\rightarrow$ 得动能」这一条链，顺序不能乱。

变式提醒：看到“截止频率/逸出功/最大初动能”，立刻反应 $h\nu = W_0 + E_{k\max}$ ；遏制电压 $U_c = E_{k\max}/e$ ——“频率决定能量、光强决定数量”是光电效应的两条命。

5.2 光的波粒二象性与物质波

波粒二象性：光既干涉衍射（波），又光电效应（粒子）。**康普顿效应**（X 射线散射波长变长）证明光子有动量：

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

德布罗意物质波：一切实物粒子也有波长：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

——电子衍射实验证实（电子束穿过晶体出现干涉环）。1929 年德布罗意靠一篇只有几页的博士论文拿了诺贝尔奖——他论文里“物质也有波”的想法当时被认为太疯狂，评委们犹豫了很久。

电子波长短到极致，成就了今天的芯片工业：**光刻机**。造芯片要用“光”把电路图刻到硅片上，光波长越短，刻出的线条越细——最先进的 EUV 光刻机用 13.5 nm 的极紫外光，能刻出几纳米宽的晶体管。而下一代更激进的路子，直接用电子束来“刻”。你手机里那颗指甲盖大的芯片，藏着上千亿个晶体管——它们全都是被“越短越细”这条物理铁律逼出来的。

例题 5.2

电子经 100 V 加速后的德布罗意波长多大（与 X 射线同量级，所以电子显微镜分辨率高）？**想一想：**

- 问：电子加速后速度多大？
- 想：动能定理： $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 100}{9.1 \times 10^{-31}}} \approx 5.9 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。
- 问：波长呢？
- 想： $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 5.9 \times 10^6} \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.12 \text{ nm}$ 。
- 问：为什么电子显微镜看得更细？

- 想：0.12 nm 比可见光波长（约 500 nm）短 4000 多倍——“光”越短分辨率越高。

详细答案：解： $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} \approx 5.9 \times 10^6 \text{ m/s}$ ； $\lambda = \frac{h}{mv} \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。答：德布罗意波长约 0.12 nm，比可见光短数千倍。

变式提醒：德布罗意波长与速度成反比——速度越快波长越短；宏观物体（人、车）波长小到不可观察，波动性只在微观显现。

5.3 原子结构：从汤姆孙到玻尔

原子内部到底长什么样？**卢瑟福 α 粒子散射实验**给出了答案：绝大多数 α 粒子直穿，少数大角度偏转——**原子有核**（原子核集中了几乎全部质量和正电荷，半径约 10^{-15} m ）。用高速粒子“轰”原子，看它怎么偏转，原子结构就现形了。

玻尔模型：电子只能在特定轨道（能级）上运动，能级量子化：

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$$

能级跃迁：电子从高能级跳到低能级，辐射光子：

$$h\nu = E_{\text{高}} - E_{\text{低}}$$

——**原子发光 = 能级差变光子**。你书桌上的 LED 台灯、家里的激光笔、超市扫码的激光、光纤通信里的激光器，全是这个原理：让电子在特定能级间“跳”，跳一次发一个固定波长的光子。LED 之所以横扫照明界，就是因为它把电能几乎全变成“能级差的光”，而不是像白炽灯那样大部分浪费成热。

例题 5.3

氢原子从 $n = 3$ 跃迁到 $n = 2$ ，辐射光子波长多大（可见光吗）？**想一想：**

- 问：两个能级的能量？
- 想： $E_3 = -\frac{13.6}{9} \approx -1.51 \text{ eV}$ ， $E_2 = -\frac{13.6}{4} = -3.4 \text{ eV}$ 。
- 问：能级差多大？
- 想： $\Delta E = E_3 - E_2 = 1.89 \text{ eV} = 3.02 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。
- 问：波长呢？
- 想： $h\nu = \Delta E$ ， $\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{3.02 \times 10^{-19}} \approx 6.6 \times 10^{-7} \text{ m} = 660 \text{ nm}$ ——红光，可见。

详细答案：解： $\Delta E = 1.89 \text{ eV}$ ， $\lambda \approx 660 \text{ nm}$ 。答：辐射红光（可见光）——巴尔末系的一条谱线。

变式提醒：能级跃迁题永远“先算能级差，再换波长”； $E_n = -13.6/n^2$ 直接代；注意 n 越大能级越高（负值越小越高）。

5.4 原子核：组成、放射性与核能

原子核内部又有什么？

核的组成：原子核由**质子**（带正电）和**中子**（不带电）组成，合称**核子**。质子数决定元素种类（就是元素周期表的序号 Z ），质量数 $A = \text{质子数} + \text{中子数}$ 。写核符号 ${}_Z^AX$ ：左上角质量数、左下角电荷数。

问题来了：质子都带正电，彼此库仑斥力巨大，凭什么不炸开？因为还有**核力**——核子之间存在的强力，作用距离极短（约 10^{-15} m ），在这个“拳头范围”内远强于库仑斥力，把核子牢牢“粘”在一起。核力是短程力：出了原子核的边界，它立刻消失——这就是为什么核子必须挤在一起才稳定，也是“重核越大越容易裂开”的伏笔。

天然放射性：原子核自发地放出射线的现象。三种射线，本质完全不同：

- **α 射线：**氦原子核流（ ${}_2^4\text{He}$ ，2 质子 2 中子），带正电，**电离能力强、贯穿本领弱**——一张纸就挡住；
- **β 射线：**高速电子流，带负电，电离能力中等、**贯穿本领较强**——几毫米铝板才能挡住；
- **γ 射线：**高频电磁波（光子流），不带电，电离能力最弱、**贯穿本领最强**——需要厚铅块或混凝土才能挡住。

三种射线“跑”出来的方式也不同： **α 衰变**是核放出氦核（质量数减 4、电荷数减 2）； **β 衰变**是中子转变成质子并放出电子（电荷数加 1、质量数不变）； **γ 衰变**是核从高能态跳回低能态放出光子（常伴随前两种衰变发生）。医院的 γ 刀放疗、考古的碳-14 测年、核电站的辐射监测，全是天然放射性的应用。

半衰期：大量放射性核衰变掉一半所需的时间， $N = N_0(1/2)^{t/\tau}$ ——它是**统计规律**：单个原子什么时候衰变是随机的，半衰期只对大量原子有意义。

结合能：把原子核拆成单个核子需要能量；反过来，核子结合成原子核会放出能量——这个能量叫**结合能**。核子“结合得紧不紧”用**比结合能**（平均每个核子的结合能）衡量：中等质量的核（铁附近）比结合能最大、最稳定；轻核（氢）和重核（铀）比结合能都较小。所以释放核能有两条路，都朝“铁”的方向走：**轻核聚合成重核（聚变）、重核分裂成中等核（裂变）**——太阳烧的是聚变，核电站裂的是铀。

核反应：原子核发生变化。两把尺子：**质量数守恒 + 电荷数守恒**。核能来自**质量亏损**——核反应前后质量减少，减少的质量变成能量（**质能方程** $E = mc^2$ ）：

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

轻核聚变（太阳）、重核裂变（核电站）都靠它。太阳烧了 46 亿年，靠的就是聚变；人类想把太阳“搬”到地球上——中国的 **EAST 装置（东方超环）** 已经能把氢等离子体加热到 1.2 亿摄氏度并稳定运行数百秒，被称为“人造太阳”。聚变用的是海里的氘，1 升海水里的氘聚变放出的能量相当于 300 升汽油；它不产生长寿命核废料、不会链式失控——所以全世界都在赌它。如果哪天真点着了，这一节学的 $\Delta E = \Delta mc^2$ ，就是那场能源革命的第一行公式。〔注 2〕

例题 5.4

核反应 ${}_{96}^{248}\text{Cm} + {}_8^{18}\text{O} \rightarrow Y + 4{}_0^1\text{n}$ 。求 Y 的质量数 A 和电荷数 Z。想一想：

- 问：核反应题的两把尺子是什么？
- 想：质量数守恒 + 电荷数守恒。
- 问：质量数怎么算？
- 想： $248 + 18 = A + 4 \times 1 \Rightarrow A = 262$ 。
- 问：电荷数呢？
- 想： $96 + 8 = Z + 0 \Rightarrow Z = 104$ 。查元素周期表，104 号元素是（Rf, Rutherfordium）——所以 $Y = {}_{104}^{262}\text{Rf}$ 。核反应方程的两把尺子，必须同时满足，缺一不可。
- 问：解题要点？
- 想：核反应题就两把尺子：质量数守恒、电荷数守恒——代入算，别怕大数字；算完查周期表确认元素真实存在。

详细答案：解：质量数守恒： $248 + 18 = A + 4 \times 1 \Rightarrow A = 262$ ；电荷数守恒： $96 + 8 = Z + 0 \Rightarrow Z = 104$ 。答：Y 的质量数 $A = 262$ 、电荷数 $Z = 104$ ，即 ${}_{104}^{262}\text{Rf}$ （ ）。

变式提醒：核反应题永远“质量数 + 电荷数”两把尺子，**两条守恒必须同时成立**——如果算出的结果与题设矛盾，说明题设错了，永远以守恒为准。 α 衰变质量数减 4 电荷数减 2、 β 衰变电荷数加 1 质量数不变——“ α 减 4 减 2、 β 只加 1”。

动手试试（材料：一枚硬币、计算器）

先猜：1 克物质完全转化为能量，够一个三口之家用多久？

动手：算出 1 克质量对应的能量 $E = mc^2 = 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13} \text{ J}$ ；再算 1 度电 $= 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ ，看看 $9 \times 10^{13} \text{ J}$ 相当于多少度电。

观察：约 2500 万度电——一个家庭（月用 300 度）可以用约 7 万年。

思考：质能方程不是纸面公式——太阳每秒钟就把 420 万吨质量变成这个量级的能量。这就是“质量就是能量”的量级感受。

练一练

- 光电效应三个规律里哪个最“打脸”波动说？
- 电子显微镜为什么比光学显微镜分辨率高？
- 氢原子从 $n = 2$ 跃迁到 $n = 1$ 辐射什么光？
- 半衰期是“单个原子”的时间还是“大量原子”的统计？
- 核反应方程的两条守恒是什么？

参考答案：1. 截止频率——波动说认为光强越大能量越多，但频率不够再强的光也打不出电子。2. 电子的德布罗意波长（约 0.12 nm）比可见光短数千倍，分辨率更高。3. $\Delta E = -3.4 - (-13.6) = 10.2 \text{ eV}$, $\lambda = \frac{hc}{\Delta E} \approx 122 \text{ nm}$ ——紫外线。4. 大量原子的统计规律——单个原子衰变是随机的，半衰期只对大量原子有意义。5. 质量数守恒 + 电荷数守恒。

想一想（概念边界）：某金属的截止频率由什么决定？如果换一种金属，截止频率会变吗？

提示：截止频率由金属的逸出功决定（ $h\nu_0 = W_0$ ），换金属逸出功变、截止频率就变——所以“能不能发生光电效应”看的是光频率够不够打穿这种材料的“门槛”。

本章注释

〔注 1〕1905 年，26 岁的爱因斯坦在瑞士伯尔尼专利局当三级技术员（他求职大学教职失败，只好“混”进专利局）。这一年他发表了四篇论文：光电效应（提出光量子，后来拿到 1921 年诺贝尔奖）、布朗运动（给出分子存在的统计解释，就是物理三第 1 章那个布朗运动）、狭义相对论、质能方程 $E = mc^2$ ——任何一篇都够一个物理学家吃一辈子，他一年全发完了，史称“奇迹年”。有意思的是，他拿诺贝尔奖靠的是四篇里“最不起眼”的光电效应——诺贝尔委员会特意说明颁奖理由是光电效应，不是相对论（相对论在当时争议太大）。

〔注 2〕核裂变的发现背后是一位被历史亏待的女科学家：1938 年，德国化学家哈恩在实验中发现铀被中子轰击后产生了钡，但他无法解释；被他排挤流亡瑞典的犹太女物理学家**迈特纳**（曾与他合作 30 年）用“液滴模型”解释了——铀核像一滴水被劈成两半，并释放巨大能量，她给这个现象起名“fission”（裂变）。1944 年诺贝尔化学奖只颁给了哈恩，迈特纳被遗漏——尽管裂变的理论解释是她的工作。今天，元素周期表第 109 号元素以她命名（Meitnerium, Mt ），算是对这位“物理学界的居里夫人”的迟到致敬。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
光电效应/截止频率/逸出功	光子能量方程	$h\nu = W_0 + E_{k\max}$
遏制电压	最大初动能	$eU_c = E_{k\max}$
康普顿效应	光子有动量	$p = h/\lambda$, 散射波长变长
德布罗意	物质波	$\lambda = h/mv$
能级跃迁/发光	能级差变光子	$h\nu = E_{\text{高}} - E_{\text{低}}$
氢原子/第 n 能级	能级公式	$E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$
核反应方程	两把尺子	质量数 + 电荷数守恒
半衰期	统计规律	$N = N_0(1/2)^{t/\tau}$
核能/质量亏损	质能方程	$\Delta E = \Delta mc^2$

你该记住的流程：读近代物理题 → (1) 判类型：光电效应/波粒二象/能级/核反应 → (2) 光电效应套方程，能级先算差，核反应用两把尺子 → (3) 单位：eV 与 J 换算 ($\times 1.6 \times 10^{-19}$) → (4) 验算：波长量级 (nm)、能量量级 (eV) 合理。

真题直击 (改编自 2024 湖南卷) (单选) 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，改紫光一定可以
 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. 德布罗意认为质子有波动性而电子没有

想一想：

- 问：逐项对号入座——“谁提出什么、谁发现什么”。
- 想：普朗克正是**量子化**的提出者（能量不连续，A 错）；紫光频率高于红光，能发生光电效应（B 对， $h\nu > W_0$ ）；康普顿发现散射后波长**变长**（动量转移，C 错）；德布罗意认为**一切实物粒子**都有波动性（D 错）。

详细答案：答：选 B。近代物理选择题最爱考“谁提出什么、谁发现什么”——读题即对号入座：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。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 光电效应的四个规律？
- 光电效应方程？截止频率由什么决定？
- 光的波粒二象性如何理解？
- 玻尔原子模型的三个假设要点？
- 氢原子能级跃迁：从高能级跳回低能级，放出什么？
- 核反应方程的两条守恒定律？

提升

- 某金属逸出功 2.5 eV，用 4 eV 的光子照射，逸出光电子的最大初动能多大？
- α 衰变后，新核的质量数和电荷数各变化多少？
- 半衰期为 8 天的放射性元素，经过 24 天还剩原来的几分之几？

探究

- 用验钞灯照荧光笔字迹会发光——用能级跃迁解释“荧光”。

参考答案：1. (1) 存在截止频率；(2) 光电效应瞬时发生；(3) 饱和电流与光强成正比；(4) 最大初动能随频率增大、与光强无关。2. $E_k = h\nu - W_0$ ；截止频率由逸出功决定 $\nu_0 = W_0/h$ 。3. 光既表现波动性（干涉衍射）又表现粒子性（光电效应），不同场合显现不同侧面。4. (1) 轨道量子化（电子只能在一定轨道上运动）；(2) 定态（特定轨道能量一定）；(3) 跃迁（电子跃迁辐射/吸收光子）。5. 放出光子，光子能量等于能级差 $h\nu = E$ 。6. 质量数守恒 + 电荷数守恒。7. $E_k = 4 - 2.5 = 1.5$ eV。8. 质量数减 4、电荷数减 2。9. 24 天 = 3 个半衰期，剩 $1/2^3 = 1/8$ 。10. 紫外光子能量大，把荧光粉分子中的电子激发到高能级；电子跳回低能级时发出可见光（能量较小的光子）——“高能光子换低能光子”，量子化能级的直接体现。

第六章 相对论初步

你手机里的导航，每天都要“修正”卫星上的钟——因为高速会让钟变慢、高空会让钟变快。相对论不是课本里的玄学，它就在你口袋里。

这一章走向高速。为什么说“光速是宇宙速度上限”？为什么高速运动的钟会变慢？为什么质量就是能量？这三个问题由爱因斯坦在 1905 年用狭义相对论回答。学完这一章，你会发现相对论不是“玄学”——它是 GPS 卫星每天必须修正的东西，是核电站的能量来源。而它诞生之前，全世界最顶尖的物理学家在“以太”上白忙了二十年。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解狭义相对论的两个基本假设；(2) 了解钟慢尺缩与质能方程；(3) 认识相对论的工程应用（GPS）。

6.1 狭义相对论的两个前提

- **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）；
- **相对性原理：**物理定律在所有惯性系中形式相同。

这两个前提，会推出什么？——两个推论都反直觉，但都被实验证实：

- **时间膨胀**——运动的钟变慢： $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ （ Δt_0 固有时间）。你可能会想：火车上的表真的比地面的慢？——真的，只是日常速度下慢到测不出来， $v \ll c$ 时 $\sqrt{1-v^2/c^2} \approx 1$ ；

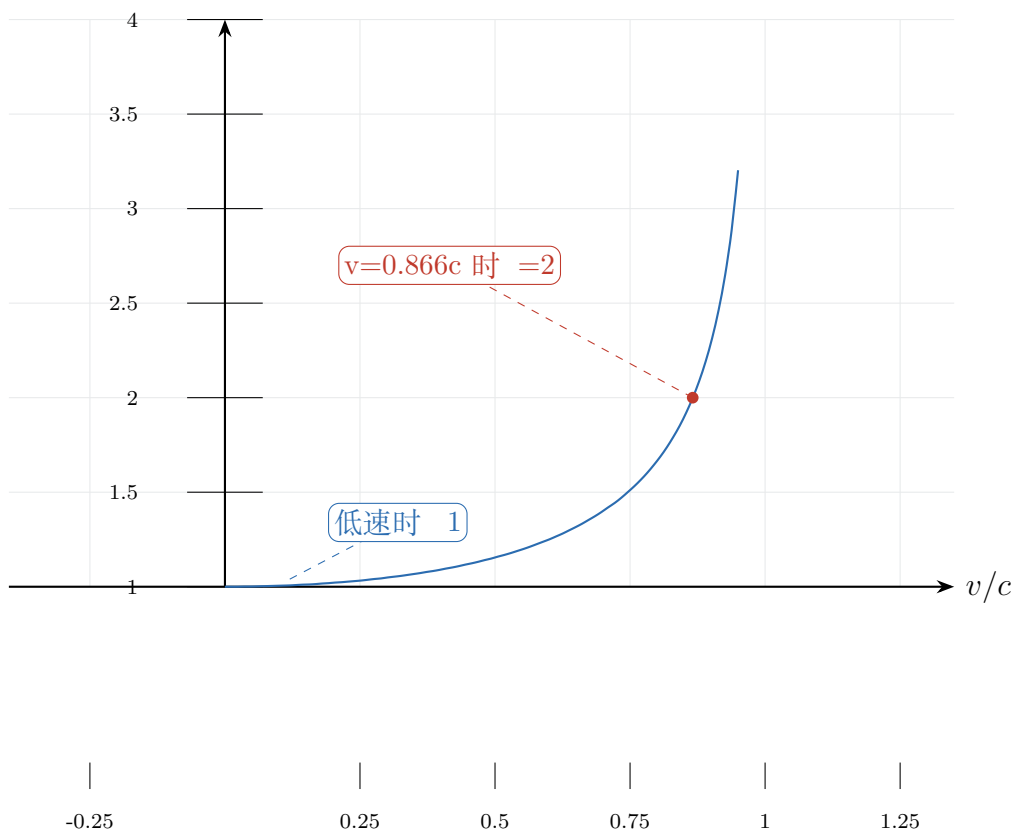


图 6.1: 时间膨胀因子随速度增大：接近光速时急剧变大

- **长度收缩**——运动方向的长度变短： $L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。

相对论不是纸面推演，它天天在工程里被“算账”：GPS 卫星以约 3.9 km/s 绕地球转，狭义相对论让它的钟每天慢约 7 微秒；卫星离地 2 万公里，广义相对论（高空引力弱）又让它的钟每天快约 45 微秒——一慢一快，每天净差约 38 微秒。可别小看这 38 微秒：光 38 微秒能跑 11 公里，导航不修正，你的定位每天漂移出 10 公里以上。所以卫星里的原子钟，出厂前就按相对论“调好快慢”了——你每天用的导航，是相对论最日常的现场。〔注 1〕

例题 6.1

μ 子以 $0.99c$ 运动，寿命（固有 $2.2 \mu\text{s}$ ）在地面参考系看延长到多少？

想一想：

- 问：时间膨胀公式是什么？谁是固有时间？
- 想： $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ —— $\Delta t_0 = 2.2 \mu\text{s}$ 是 μ 子自身参考系的时间（固有时间）。
- 问：代入算。
- 想： $\Delta t = \frac{2.2}{\sqrt{1 - 0.99^2}} = \frac{2.2}{\sqrt{0.0199}} \approx 15.6 \mu\text{s}$ ——约 7 倍！
- 问：这个延长的意义？

- 想：没有相对论效应， μ 子飞不出大气层就被探测不到；时间膨胀让它能到达地面——这就是宇宙射线 μ 子实验对相对论的验证。

详细答案：解： $\Delta t = \frac{2.2}{\sqrt{1-0.99^2}} \approx 15.6 \mu\text{s}$ 。答：地面参考系看 μ 子寿命延长到约 $15.6 \mu\text{s}$ （约 7 倍）。

变式提醒：速度越接近 c ，膨胀越显著； $v = 0.6c$ 时 $\sqrt{1-0.36} = 0.8$ ，时间变 1.25 倍——“高速慢钟、低速几乎无感”。

动手试试（材料：一部手机、一台吊扇或电风扇）

先猜：用手机慢动作（高帧率）拍摄转动的风扇叶片，能看到什么？

动手：打开手机“慢动作”模式（120fps 以上），对准运转中的吊扇/电扇叶片拍摄几秒，回放观察。

观察：叶片有时看起来“停住”或“倒转”——叶片转速与采样帧率接近时，就会出现“视觉静止/倒转”。

思考：你看到的“静止”是错觉——是观测方式（采样）与物体运动“合拍”造成的。相对论里的“同时性”也有类似味道：不同参考系观测同一事件，看到的不一样。慢动作视频是理解“观测改变结果”的最直观入口。

6.2 质能方程：质量就是能量

$$E = mc^2$$

质量与能量等价。静止能量 $E_0 = m_0c^2$ ；（★拓展，了解即可）速度接近光速时质量效应明显： $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ （质量随速度增大，所以不能超过光速——加速到 c 需要无穷能量）。核能的来源就是质量亏损： $\Delta E = \Delta mc^2$ （1 kg 物质完全转化释放 $9 \times 10^{16} \text{ J}$ ——够一个大城市用很久）。〔注 2〕

“质量随速度增大”也不是空话——欧洲核子研究中心的 **LHC 大型强子对撞机**，把质子加速到 99.9999991% 光速，质子的质量变成静止时的 7000 多倍。对撞机里那 27 公里的环形管道，每天都有接近光速的粒子在飞——它们的时间比我们的慢得多，质量也比静止时大得多。相对论在那里不是理论，是开机就要算的工程参数。

例题 6.2

太阳每秒钟损失质量 $4.2 \times 10^9 \text{ kg}$ （聚变质量亏损），释放功率多大？

想一想：

- 问：能量怎么算？
- 想： $\Delta E = \Delta mc^2 = 4.2 \times 10^9 \times (3 \times 10^8)^2 \approx 3.8 \times 10^{26} \text{ J}$ 。

- 问：功率呢？
- 想： $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{3.8 \times 10^{26}}{1} = 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ 。
- 问：这意味着什么？
- 想：太阳每秒烧掉 420 万吨“质量”，换来照亮整个太阳系的能量——质能方程的现场演示。

详细答案：解： $\Delta E = \Delta mc^2 = 4.2 \times 10^9 \times 9 \times 10^{16} \approx 3.8 \times 10^{26} \text{ J}$ ； $P = 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ 。答：太阳释放功率约 $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ 。这个功率大得没有直观感受，换个说法：太阳每秒钟把 420 万吨「质量」变成能量——而 1 克质量转化的能量 ($9 \times 10^{13} \text{ J}$) 就够一户家庭用几十年。质能方程不是理论装饰，是太阳 46 亿年燃烧的能源账单。

变式提醒：质能方程 $\Delta E = \Delta mc^2$ 中 Δm 是质量亏损（不是质量消灭）——质量转化为能量，能量守恒 + 质量守恒（联合守恒）；“1 g 质量完全转化 = $9 \times 10^{13} \text{ J} \approx 2.7 \text{ 吨标准煤}$ ”是量级感受。

动手试试（思想实验，不需要器材）

先猜：你开着一束光速的“飞船”去追一束光——你会看到光相对你多快？

动手：闭上眼睛想：你在一个以 $0.9c$ 飞行的飞船上，向前射出一束光。站在地上的人测这束光，速度是多少？你在飞船上测它，又是多少？

观察（推理）：两个人都测出光速是 c ——不是 $1.9c$ ，也不是 $0.1c$ ！

思考：这就是光速不变原理——光速对谁都一样，与你（光源）的运动无关。它违背日常直觉（追火车会觉得火车变慢），但被实验反复证实。相对论的整座大厦，都建在这条“反直觉”的假设上。

练一练

- 光速不变原理和经典速度叠加 ($u = v + c$) 矛盾吗？
- 为什么说“不可能超光速”（质量随速度增大）？
- 质能方程说明“质量可以消灭”吗？
- 时间膨胀意味着什么？生活中有证据吗？

参考答案：1. 矛盾——经典速度叠加是低速近似；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。2. 速度越接近 c ，质量越大，继续加速需要的能量趋于无穷——超光速需要无穷能量，不可能。3. 不是消灭——是质量转化为能量（质能联合守恒），质量“亏损”变成其他形式的能量。4. 运动的钟变慢（相对论效应）；GPS 卫星每天修正相对论效应（狭义慢 $7 \mu\text{s}$ + 广义快 $45 \mu\text{s}$ ），就是生活中的证据。

想一想（概念边界）：为什么说“不可能超光速”？如果不知道质能方程，能解释吗？

提示：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——这是质能方程 $E = mc^2$ 的直接推论。不是“没人发明更快的机器”，是物理规律本身不允许。

本章注释

〔注 1〕相对论的故事里，最出名的不是爱因斯坦，而是一场“最著名的失败实验”：1887 年，迈克尔逊和莫雷想测出地球在“以太”（当时认为光传播的介质）中运动的“以太风”，结果什么也没测到——光速在各个方向都一样。这个“失败”让物理学家们苦恼了十几年。有意思的是，爱因斯坦后来说，这个实验对他影响不大，他靠的是对“时间同时性”的思考：如果光速恒定，那么“同时”这件事，在不同参考系里就说不清了。而洛伦兹和庞加莱当时已经写出了洛伦兹变换公式（几乎拿到相对论），但他们都把公式当作“数学技巧”而不是物理现实——只有爱因斯坦敢说：时间本身就是相对的。一步之遥，就是牛顿世界与爱因斯坦世界的分界线。

〔注 2〕**科普口径说明**：“质量随速度增大”（ $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ）这一表述，**现行高中课标已不作要求**——考试不会考它，教材在此列出仅为帮助理解“为什么不能超过光速”。如果将来你在大学物理课上再见到它，会遇到更严格的表述：相对论中一般不用“运动质量”，而是说能量和动量随速度增大，静质量保持不变。本教材按科普口径呈现，你“了解即可”。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
光速不变/惯性系	狭义相对论前提	光速恒 c 、定律形式相同
高速运动	时间膨胀	$\Delta t = \Delta t_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$
运动方向长度	长度收缩	$L = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$
质量随速度★	不能超光速（科普口径，课标不作要求）	$m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$
质量亏损/核能	质能方程	$\Delta E = \Delta mc^2$
μ 子/高速粒子	时间膨胀验证	寿命延长到达地面

你该记住的流程：读相对论题 → (1) 判考点：时间膨胀/长度收缩/质能 → (2) 找固有时间/固有长度（相对物体静止的参考系）→ (3) 套公式（注意 $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ）→ (4) 质能题： $\Delta E = \Delta mc^2$ → (5) 验算： v 越接近 c 效应越强。

真题直击（改编自 2025 上海卷）（填空） 太阳内部核聚变 P-P 循环，核反应方程为 $4\text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2\text{X}$ ，则 X 是？

想一想：

- 问：X 的质量数？电荷数？
- 想：质量数： $4 \times 1 = 4 + 2 \times 0 \Rightarrow$ X 质量数 0；电荷数： $4 \times 1 = 2 + 2Z \Rightarrow Z = +1$ 。
- 问：质量数 0、电荷数 +1 的粒子是什么？
- 想：正电子（ β^+ ）—— $^0_{+1}e$ 。

详细答案：答：X 是正电子（ $^0_{+1}e$ ）。核反应题永远是“质量数 + 电荷数”两把尺子；这题的考点是：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。

章末检测 (基础★/提升★★/探究★★★)

基础

- 狭义相对论的两个基本假设?
- 光速在真空中是多少? 是否与光源运动有关?
- “同时”的相对性是什么意思?
- 相对论中, 物体速度能否超过光速? 为什么?
- 质能方程 $E = mc^2$ 说明质量与什么等价?
- GPS 卫星上的钟为什么需要修正?

提升

- 1 kg 物质完全转化为能量, 释放多少焦耳?
- 某元素核反应质量亏损 3.2×10^{-28} kg, 释放能量多少 ($c = 3 \times 10^8$)?
- 高速飞船里观察地球上的钟, 会看到钟变快还是变慢 (相对论效应)?

探究

- 为什么说“光速恒定”是相对论的基础? 用“追光思想实验”说明。

参考答案: 1. (1) 相对性原理 (物理规律在所有惯性参考系中相同); (2) 光速不变原理 (真空光速与参考系无关)。2. 3×10^8 m/s; 与光源运动无关 (恒定)。3. 在一个参考系中同时发生的两件事, 在另一运动参考系中可能不同时——同时性是相对的。4. 不能——越接近光速质量效应越明显, 加速到 c 需要无穷能量。5. 质量与能量等价 (质量亏损释放能量)。6. 卫星高速 (钟慢) + 高空 (钟快), 净效应快 $38 \mu\text{s}/\text{天}$, 不修正定位误差累积到 10 km。7. $E = mc^2 = 1 \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16}$ J。8. $E = \Delta mc^2 = 3.2 \times 10^{-28} \times 9 \times 10^{16} = 2.88 \times 10^{-11}$ J。9. 变慢 (动钟变慢——从飞船系看地球在运动)。10. 如果你以 $0.99c$ 追一束光, 光相对于你的速度仍是 c (不是 $0.01c$) ——这与经典速度叠加矛盾, 只有承认“光速恒定、时间空间跟着变”才能自洽, 由此推出钟慢尺缩。

第七章 从课本到科技：量子与光的拓展应用

激光为什么能刻字？LED 灯为什么那么省电？核电站的“控制棒”凭什么控制反应？——把前 5 章的知识接到真实世界，答案全在这。

这一章是“彩蛋章”——把前 5 章的定律接上现代科技。十个拓展主题都是新高考“情境题”的素材库。不要求背，要求**眼熟**：看到激光想到受激辐射，看到核电站想到裂变链式反应，看到 GPS 想到相对论修正——你就把课本和世界连起来了。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 建立“课本定律 → 现代科技”的对应；(2) 了解激光、LED、太阳能、光纤、核能等应用原理；(3) 认识量子计算、相对论应用等前沿。

7.1 激光：受激辐射的光放大

激光凭什么“指哪打哪”？原子受激辐射出与入射光子同频同相的光子，雪崩式放大就得到激光：**单色、相干、平行、高亮**——四个词就是它的“身份证”。应用：光纤通信载波、激光手术、激光打标、激光测距。

先破一个直觉：**激光的厉害不是“亮”，是“纯”**。手电筒也亮，但它的光是七拼八凑的杂光；激光是几十亿个“同频同相”的光子排着队走——所以它能聚焦到针尖大小、能传几公里不散。受激辐射这个想法，爱因斯坦 1917 年就写在纸上了，可直到 1960 年梅曼才做出第一台红宝石激光器——理论到器件，等了 43 年；而第一台激光器问世仅 3 年，1963 年人类就把它用于视网膜手术。〔注 1〕

例题 7.1

红宝石激光器发出 694 nm 红光，单个光子能量多大？一次脉冲 1 J 有多少个光子？

想一想：

- 问：光子能量公式？
- 想： $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{6.94 \times 10^{-7}} \approx 2.9 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 1.8 \text{ eV}$ 。
- 问：1 J 有多少个光子？

- 想： $N = \frac{1}{2.9 \times 10^{-19}} \approx 3.4 \times 10^{18}$ 个。

详细答案：解： $E \approx 2.9 \times 10^{-19} \text{ J}$ ； $N \approx 3.4 \times 10^{18}$ 个。答：单光子约 1.8 eV，1 J 脉冲含约 3.4×10^{18} 个光子。

变式提醒：激光能精密手术靠“单色 + 可聚焦”（波长单一、能量集中）；受激辐射与自发辐射的区别：受激是“同频同相放大”，自发是“杂乱随机发光”。

7.2 LED 与能级：量子化的光

LED 的发光颜色怎么“选”？LED 发光 = 电子从高能级跃迁到低能级辐射光子，**发光颜色由能级差决定**（ $h\nu = \Delta E$ ）——能级差大的发蓝光、小的发红光，材料一换颜色就换。量子点材料“尺寸调颜色”（2023 诺奖）也是能级量子化的表现。

例题 7.2

氮化镓基 LED 能级差约 2.9 eV，发光频率约多少？

想一想：

- 问：频率怎么算？
- 想： $\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{2.9 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} \approx 7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。
- 问：什么颜色？
- 想：蓝绿光（LED 蓝光芯片的基础）——能级差决定发光颜色。

详细答案：解： $\nu = \frac{\Delta E}{h} \approx 7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。答：发光频率约 $7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ （蓝绿光）。

变式提醒：LED 比白炽灯省电的原因：直接发光（能级跃迁），不靠发热——“量子化直接出光 vs 热辐射绕远路”。

动手试试（材料：一部手机、一盏 LED 灯、一盏白炽灯/台灯）

先猜：用手机摄像头分别拍 LED 灯和白炽灯，画面里有什么不同？

动手：手机相机对准 LED 灯（注意别直视强光），再对准白炽灯，观察屏幕上的条纹。

观察：LED 灯在屏幕上有明显的明暗条纹（频闪），白炽灯几乎看不到。

思考：LED 靠能级跃迁“直接发光”、对电流变化响应快，50 Hz 交流电的波动直接“画”在光上；白炽灯靠热辐射发光、有余热惯性，波动被“抹平”了。一条条纹，就是“量子化发光 vs 热辐射”的现场证据。

7.3 太阳能电池：光电效应的逆过程

太阳能电池和光电效应是什么关系？——正好反过来：太阳能电池 = 光电效应的逆过程：光子把电子从价带“打”到导带（形成空穴-电子对），内建电场把电子赶向电极形成电流。一个是“光打出电子”，一个是“光子造电流”。硅电池的开路电压约 0.5 V，与硅的能隙（约 1.1 eV）对应。

例题 7.3

太阳光功率密度约 1000 W/m^2 ，效率 20% 的电池板， 10 m^2 发多少电功率？

想一想：

- 问：功率怎么算？
- 想： $P = 1000 \times 10 \times 0.2 = 2000 \text{ W} = 2 \text{ kW}$ 。
- 问：一天能发多少电？
- 想：一天 5 小时等效满晒，约 10 度电 ($2 \text{ kW} \times 5 \text{ h}$)。

详细答案：解： $P = 1000 \times 10 \times 0.2 = 2000 \text{ W}$ 。答： 10 m^2 电池板发电功率 2 kW，一天约 10 度电。

变式提醒：光伏与光电效应是正逆过程——光电效应“光打出电子”（动能变电能）、光伏“光子造出载流子”（光能变电能）；电池板要选能隙匹配的材料（能隙太小能量浪费、太大打不出电子）。

7.4 光纤通信：全反射的现代版

光纤芯层折射率大于包层，光在芯-包界面**全反射**，沿光纤“之”字前进，损耗极小——一根光纤同时承载成千上万路电话（不同波长各走各的）。

例题 7.4

芯层折射率 1.5、包层 1.48，临界角多大？

想一想：

- 问：临界角公式？
- 想： $\sin C = \frac{n_{\text{包}}}{n_{\text{芯}}} = \frac{1.48}{1.5} \approx 0.987$ ， $C \approx 81^\circ$ 。
- 问：这意味着什么？
- 想：入射角超过 81° 就全反射——光纤传光几乎无泄漏。

详细答案：解： $\sin C = \frac{1.48}{1.5} \approx 0.987$ ， $C \approx 81^\circ$ 。答：临界角约 81° ，光纤传光几乎无泄漏。

变式提醒：光纤用全反射而不是镜面反射——镜面每次反射损耗大，全反射零损耗；光纤能拐弯是因为全反射“自动转向”。

7.5 核电站：可控链式反应

裂变 ($^{235}\text{U} + n \rightarrow \text{碎片} + 2 \text{ 至 } 3n + \Delta E$) 中，中子再击中其他铀核，链式反应放出巨大能量。核电站用**控制棒**（吸收中子）控制链式反应速率、冷却剂带走热量烧开水推动汽轮机。反应堆安全三件事：控制棒、冷却、防辐射屏蔽。

例题 7.5

一次 ^{235}U 裂变释放约 200 MeV，1 g 铀 235 完全裂变释放多少能量？对比烧煤。

想一想：

- 问：1 g 铀有多少个原子？
- 想： $N = \frac{10^{-3}}{235 \times 1.66 \times 10^{-27}} \approx 2.56 \times 10^{21}$ 个。
- 问：总能量？
- 想： $E = 2.56 \times 10^{21} \times 200 \times 1.6 \times 10^{-13} \approx 8.2 \times 10^{10} \text{ J}$ 。
- 问：对比烧煤？
- 想：约相当于 2.7 吨标准煤——1 克 vs 2.7 吨，质能方程的威力。

详细答案：解： $E = N\Delta E \approx 8.2 \times 10^{10} \text{ J}$ 。答：1 g 铀完全裂变释放约 $8.2 \times 10^{10} \text{ J}$ ，相当于约 2.7 吨标准煤。

变式提醒：核能计算两法： $N \times \Delta E$ （数原子）或 Δmc^2 （质量亏损）；控制棒吸收中子 → 链式反应减速 → 反应可控。

7.6 医学影像：X 光、CT 与核医学

X 射线透视（穿透后按组织密度成像）、CT（多角度扫描重建断层）、PET（正电子湮灭探测）、 γ 刀（聚焦射线切除肿瘤）、核磁共振（MRI，超导磁体应用）。

例题 7.6

X 光管中电子经 100 kV 加速撞击靶，辐射 X 光最大光子能量多大？

想一想：

- 问：电子动能多大？
- 想： $E_k = eU = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^5 = 1.6 \times 10^{-14} \text{ J} = 100 \text{ keV}$ 。
- 问：光子最大能量？
- 想：电子动能全部转为光子能量（轫致辐射）： $E_{max} = 100 \text{ keV}$ 。

详细答案：解： $E_{max} = eU = 100 \text{ keV}$ 。答：X 光最大光子能量 100 keV。

变式提醒：CT 比普通 X 光片信息量大——多角度扫描重建断层；PET 靠正负电子湮灭（ $2mc^2$ 放出两个 γ 光子）。

7.7 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（运动钟变慢，每天慢 7 μs ）+ 广义相对论（高处引力弱、钟快，每天快 45 μs ），**净效应每天快 38 μs** ——不修正，定位误差每天积累约 10 km。你的手机导航，每天都在用相对论。

例题 7.7

若不修正，38 μs 的光速误差对应定位误差多少？

想一想：

- 问：时间误差怎么变成距离误差？
- 想： $\Delta x = c\Delta t = 3 \times 10^8 \times 38 \times 10^{-6} \approx 11.4 \text{ km}$ 。
- 问：这意味着什么？
- 想：一天的误差就让导航完全失效——相对论不是“玄学”，是工程必需品。

详细答案：解： $\Delta x = c\Delta t \approx 11.4 \text{ km}$ 。答：每天误差约 11.4 km，导航完全失效。

变式提醒：高速的钟慢（狭义）、高空的钟快（广义）——两个效应方向相反、净效应快 38 μs ；GPS 情境题是“相对论不是玄学”的最佳证据。

7.8 量子计算与量子通信：下一个时代

量子比特（qubit）可以同时处于 0 和 1 的叠加态， n 个量子比特同时表示 2^n 个状态——某些问题指数级加速（Shor 算法破解 RSA）。量子密钥分发更妙：**窃听会破坏量子态**——任何偷看都会留下痕迹，所以量子密钥分发理论上“绝对安全”。我国“墨子号”量子科学实验卫星（2016 年）已经在太空和地面之间传过量子密钥——你课本里“观测改变状态”这条看似玄学的原理，正在变成加密技术。

例题 7.8

一台 50 个量子比特的量子计算机，理论上能同时表示多少个状态？对比经典计算机意味着什么？想一想：

- 问：n 个量子比特同时表示多少状态？
- 想： 2^n 个——50 个量子比特就是 2^{50} 个状态同时存在。
- 问： 2^{50} 有多大？
- 想： $2^{10} \approx 10^3$ ，所以 $2^{50} \approx 10^{15}$ ——千万亿量级（ $10^{15} =$ 一千万亿），比全球约 80 亿人口多约 12.5 万倍。
- 问：这意味着什么？
- 想：经典计算机一次算一个状态，量子计算机一次“同时算”这么多——这就是“指数级加速”的来源；但读出时塌缩成一个结果，所以只适合“算完再读”的问题。

详细答案：解： $2^{50} \approx 1.1 \times 10^{15}$ 。答：50 个量子比特可同时表示约千万亿个状态，某些问题（如大数分解）能指数级加速；读出时塌缩回单个结果，所以量子计算适合“算完再读”的问题，不是把一切计算都变快。

变式提醒：量子比特的威力来自“叠加 + 纠缠”；经典比特非 0 即 1，量子比特是 0 和 1 的叠加——**指数增长**（ 2^n ）是量子计算的核心卖点，也是量子通信“窃听必留痕”的物理基础。

想一想：量子比特的“叠加态”和经典比特有什么本质不同？

提示：经典比特非 0 即 1；量子比特可以同时是 0 和 1 的叠加，n 个量子比特可同时表示 2^n 种状态——指数级并行。但读出时会“塌缩”成 0 或 1，所以量子计算擅长的是“算完再读”的问题。

7.9 热机效率与电动车：卡诺上限

热机（内燃机、蒸汽机）效率受卡诺上限限制： $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 。提高 T_1 比降低 T_2 更有效（工程常识）。电动车高效，是因为它**不经过热机**——电能直接变机械能，没有“高温差”这道坎，所以电机效率能到 90% 以上，而最好的内燃机也难过 40%。“热机有天花板、电动机没有”——这就是电动化浪潮的物理根源。

例题 7.9

某燃气轮机 $T_1 = 1673 \text{ K}$ 、 $T_2 = 873 \text{ K}$ ，卡诺效率上限多少？

想一想：

- 问：卡诺公式？

- 想： $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 。
- 问：代入算。
- 想： $\eta = 1 - \frac{873}{1673} \approx 47.8\%$ 。

详细答案：解： $\eta = 1 - \frac{873}{1673} \approx 47.8\%$ 。答：卡诺效率上限约 47.8%。

变式提醒：提高 T_1 比降低 T_2 更有效（工程常识）；电动车高效是因为不经过热机（不靠温差，直接电能 → 机械能）。

7.10 太空望远镜与宇宙学：看见 138 亿年

哈勃、韦伯望远镜：观测来自遥远天体的光（波长被**红移**——宇宙膨胀），测量星系退行速度与距离的关系（哈勃定律 $v = H_0 d$ ）——**宇宙在膨胀**的证据。宇宙微波背景辐射（大爆炸的余晖）是“宇宙的第一缕光”。〔注 2〕

想一想（概念边界）：GPS 卫星如果不做相对论修正，每天误差多少？这说明了什么？

提示：约 11 km ($38\mu\text{s} \times \text{光速}$)——一天的误差就让导航完全失效。这说明相对论不是课本玄学，而是工程必需品：高速的钟慢（狭义）、高空的钟快（广义），两个效应都要修正。

动手试试（材料：一张光盘（或 CD）、一盏白炽灯/手电筒）

先猜：光盘的表面，在灯光下会看到什么颜色？

动手：把光盘对着灯光（或窗外阳光），转动角度观察它的表面。

观察：光盘表面出现彩虹一样的彩色条纹，随角度变化！

思考：光盘表面刻着细密的纹路，像“微型光栅”——白光被它“拆”开，不同波长偏折不同角度，就分出了彩虹。这就是光的波动性（衍射/干涉）的现场演示。激光、光纤、光谱仪，全是这套“把光拆开看成分”的本事。

本章注释

〔注 1〕激光的故事是“理论等了 43 年”的典型：1917 年爱因斯坦提出受激辐射理论；此后几十年，科学家们只把它当理论推演。1958 年汤斯和肖洛发表论文提出激光器设想，1960 年梅曼造出第一台红宝石激光器（他供职的休斯实验室后来靠它赚了大钱）。仅仅 3 年后，激光就被用于视网膜焊接手术——从实验室玩具到手术刀，人类只用了 3 年。“激光”（LASER，受激辐射光放大）这个名字的由来也颇有戏剧性：发明者们为叫“光激射器”还是“激光”争论了很久，最后美国物理学会投票定了 LASER 这个名字。

〔注 2〕哈勃本人是个“半路出家”的天文学家：他原本是牛津大学的罗德学者（学法律），回到美国后当过高中教师和篮球教练，直到 31 岁才到威尔逊山天文台专心搞天文。1929 年他发表“星系距离越远、退行越快”的规律（哈勃定律），人类第一次有了“宇宙在膨胀”的观测证据——有趣的是，比利时神父兼物理学家勒梅特在 1927 年就提出了膨胀宇宙模型，比

哈勃还早两年，但当时几乎没人注意到。科学史就是这样：正确的理论常常要等一个能把它“验证”出来的人。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
激光	受激辐射	单色相干平行高亮
LED/发光颜色	能级差	$h\nu = \Delta E$
太阳能电池	光电效应逆过程	光子造载流子
光纤	全反射	芯层折射率大， $\sin C = n_{\text{包}}/n_{\text{芯}}$
核电站	可控链式反应	控制棒吸收中子
X 光/CT	轫致辐射	$E_{\text{max}} = eU$
GPS	相对论修正	每天快 $38\ \mu\text{s}$ ，误差 11 km
量子通信	窃听破坏态	“绝对安全”
热机效率	卡诺上限	$\eta = 1 - T_2/T_1$
红移/宇宙膨胀	哈勃定律	$v = H_0 d$

你该记住的流程：读情境题 → (1) 找装置背后的“课本定律”（激光 → 受激辐射、光纤 → 全反射、GPS → 相对论）→ (2) 转成熟悉模型（LED → 能级差、核能 → 质能方程）→ (3) 套公式算量级 → (4) 回挂课本章节 → (5) 眼熟即可，不要求背。

附录 A 热光量子核心公式速查

板块	公式	适用
分子动理论	$\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$	温度 = 平均动能
阿伏伽德罗	$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	摩尔换算
理想气体	$pV = nRT$	一般过程
气体定律	$p_1V_1/T_1 = p_2V_2/T_2$	一定质量
等温/等容/等压	$pV = C$ 、 $p/T = C$ 、 $V/T = C$	三个特例
热力学第一	$\Delta U = Q + W$	内能变化
卡诺效率	$\eta = 1 - T_2/T_1$	热机上限
折射率	$n = c/v$	介质
折射定律	$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$	折射
临界角	$\sin C = n_2/n_1$	全反射
双缝干涉	$\Delta x = L\lambda/d$	条纹间距
光速波长	$c = \lambda f$	电磁波
光子能量	$E = h\nu = hc/\lambda$	量子
光电效应	$h\nu = W_0 + E_{k \max}$	光电
遏制电压	$eU_c = E_{k \max}$	实验
德布罗意	$\lambda = h/p = h/mv$	物质波
氢能级	$E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$	氢原子
能级跃迁	$h\nu = E_{\text{高}} - E_{\text{低}}$	原子发光
质能方程	$E = mc^2$	核能
核反应	质量数守恒 + 电荷数守恒	衰变/反应
半衰期	$N = N_0(1/2)^{t/\tau}$	放射性
时间膨胀	$\Delta t = \Delta t_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$	高速

附录 B 读题即解题：热光量子关键词速查

做题卡壳时先翻这张表。读到关键词 → 立刻反应模型 → 选方法。每一条都是全书正文反复讲过的“底牌”：

读到	立刻反应	首选方法
光电效应/截止频率/逸出功	光子能量与逸出功	$h\nu = W_0 + E_{k\max}$
遏制电压	最大初动能	$eU_c = E_{k\max}$
能级跃迁/发光频率	光子能量 = 能级差	$h\nu = E_{\text{高}} - E_{\text{低}}$
氢原子/第 n 能级	能级公式	$E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$
核反应方程	两把尺子	质量数守恒 + 电荷数守恒
半衰期	指数衰减	$N = N_0(1/2)^{t/\tau}$
核能/质量亏损	质能方程	$\Delta E = \Delta mc^2$
温度不变/等温	玻意耳定律	$p_1 V_1 = p_2 V_2$
体积不变/等容	查理定律	$p_1/T_1 = p_2/T_2$
压强不变/等压	盖-吕萨克	$V_1/T_1 = V_2/T_2$
绝热/快速	与外界无热交换	$\Delta U = W$
内能/温度变化	理想气体内能	ΔU 只由温度决定
热机效率	卡诺上限	$\eta = 1 - T_2/T_1$
全反射/光纤/临界角	光疏光密判断	$\sin C = n_2/n_1$
双缝/条纹间距	干涉	$\Delta x = L\lambda/d$
偏振/3D 眼镜	横波特性	只有横波能偏振
红移/退行	宇宙膨胀	波长变长、频率变低
相对论/时间膨胀	运动的钟慢	$\Delta t = \Delta t_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$
质量亏损/聚变裂变	质量 = 能量	$\Delta E = \Delta mc^2$

附录 C 学生必做实验指导（光热量子）

实验一用油膜法估测油酸分子的大小

目的：估测油酸分子的直径（数量级约 10^{-10} m）。

原理：油酸在水面形成单分子油膜，分子直径 $d = \frac{V}{S}$ （ V 为油酸体积， S 为油膜面积）。

器材：油酸酒精溶液（如 1:2000）、浅盘（内盛清水）、痱子粉（或细石膏粉）、量筒、注射器（滴管）、玻璃板、坐标纸、彩笔。

步骤：1. 用注射器滴 100 滴油酸酒精溶液入量筒，算出一滴溶液的体积 V_0 ；2. 水面撒一层薄痱子粉；3. 滴一滴溶液于水面中央，待油膜扩散稳定；4. 玻璃板盖在盘上描出油膜轮廓，坐标纸数格求面积 S （不足半格舍去、超过半格算一格）。

数据处理：一滴溶液中油酸的体积 $V = V_0 \times \text{浓度}$ ； $d = V/S$ ；结果约为 10^{-10} m 量级即合理。

误差与注意：油膜必须充分展开且厚度均匀（痱子粉不能太厚）；数格要按规则；浓度配制要准确（浓度误差会直接进入结果）；量筒读数注意视线水平。

实验二探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系

目的：验证一定质量气体等温变化时满足玻意耳定律 $pV = \text{常数}$ 。

原理： $p_1V_1 = p_2V_2$ （温度不变、质量不变）。

器材：带刻度的注射器（密封性好）、压强计（或压强传感器）、铁架台、水槽（或室温环境）。

步骤：1. 注射器封闭一定质量的空气，接口接压强计；2. 缓慢推（或拉）活塞改变体积，每改变一次体积记录一组 p 、 V ；3. 取 6~8 组数据；操作要慢，让气体与外界充分热交换保持等温。

数据处理：作 p - V 图（双曲线）；作 p - $1/V$ 图（若为过原点直线，则 pV 恒定，定律得证）；也可直接计算各组 pV 乘积是否近似相等。

误差与注意：活塞与针筒间漏气会使质量改变（ pV 乘积系统性偏小）；操作太快会使气体温度升高（压缩时升温， pV 偏大）；读数时视线与刻度垂直；活塞涂润滑油减小摩擦与漏气。

实验三测量玻璃的折射率

目的：用插针法测定玻璃砖的折射率。

原理：折射定律 $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ (i 为入射角, r 为折射角)。

器材：玻璃砖、白纸、大头针 4 枚、图钉、直尺、量角器 (或三角板)。

步骤：1. 白纸上画出玻璃砖两界面 aa' 、 bb' 与法线, 玻璃砖放在两界面之间; 2. 在入射侧插大头针 P_1 、 P_2 确定入射光线; 3. 透过玻璃砖观察 P_1 、 P_2 的像, 在出射侧插 P_3 、 P_4 , 使 P_3 挡住 P_1 、 P_2 的像, P_4 挡住 P_3 和 P_1 、 P_2 的像; 4. 移走玻璃砖, 连接 P_1P_2 、 P_3P_4 画出射光线, 量出入射角 i 与折射角 r 。

数据处理：多组入射角 (30° 、 45° 、 60° 等) 求 n 取平均; 或作 $\sin i$ - $\sin r$ 图, 斜率即 n 。

误差与注意：入射角不宜过小 (误差大) 也不宜过大 ($>75^\circ$ 时出射光弱); 大头针应竖直插且间距尽量大; 玻璃砖与白纸相对位置不能移动; 视线沿针脚方向看齐。

实验四用双缝干涉实验测量光的波长

目的：用双缝干涉测量单色光的波长。

原理：相邻亮纹间距 $\Delta x = \frac{L\lambda}{d}$, 得 $\lambda = \frac{d\Delta x}{L}$ (d 为双缝间距, L 为双缝到屏距离)。

器材：双缝干涉仪 (光源、滤光片、单缝、双缝、遮光筒、毛玻璃屏)、测量头 (目镜与游标尺)、刻度尺。

步骤：1. 按顺序安装光源 $\rightarrow$ 滤光片 $\rightarrow$ 单缝 $\rightarrow$ 双缝 $\rightarrow$ 遮光筒 $\rightarrow$ 屏, 调节共轴, 使屏上出现清晰、等间距的干涉条纹; 2. 用测量头测出第 1 条到第 n 条亮纹中心的位置 x_1 、 x_n , 条纹间距 $\Delta x = \frac{x_n - x_1}{n - 1}$; 3. 记录双缝间距 d 与双缝到屏距离 L ; 4. 换不同滤光片 (不同波长) 重复。

数据处理：代入 $\lambda = d\Delta x/L$ 计算; 多次测量取平均; 可与滤光片标称波长比较。

误差与注意：各光学元件必须共轴且单缝、双缝相互平行; 测条纹间距要多测几条亮纹取平均 (减小读数误差); L 指双缝到屏 (测量头分划板) 的距离; 换滤光片后条纹变稀或变密可定性检验 λ 与 Δx 的关系。

真题直击 (改编自近年高考考查方式) (单选) 关于现代科技中的物理原理, 下列说法正确的是?

- A. 激光手术刀的原理是激光的波长长、穿透力强
- B. LED 灯发光靠的是热辐射, 所以比白炽灯热
- C. 光纤通信利用光的全反射, 光在光纤中损耗极小
- D. 太阳能电池直接把电能转化为光能

答案 C。解析: A 错——激光手术刀靠**单色性好、能量集中** (可聚焦到极小光斑), 不是“波长长” (可见光激光波长并不长); B 错——LED 靠能级跃迁**直接发光** (不靠发热), 所以效率高、发热少, 白炽灯才是热辐射; C 对——光纤芯层折射率大于包层, 光以大于临界角入射发生全反射, 零损耗传输; D 错——太阳能电池把**光能转化为电能** (光电效应的逆过程), 说反

了。科技应用题的万能解：**把装置翻译回课本定律**——激光 = 受激辐射、LED = 能级跃迁、光纤 = 全反射、光伏 = 光电效应逆过程。