经全国中小学教材审定委员会 2005 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

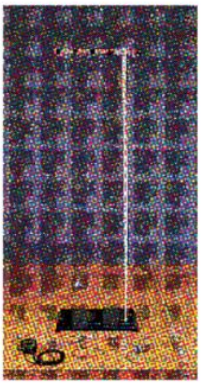
物理 选修3-4

PHYSICS

主编 束炳如 何润伟



目 录



第 1 章 机械振动 6

1.1 研究简谐运动 7

1.2 探究摆钟的物理原理 12

1.3 探究单摆振动的周期 15

1.4 受迫振动与共振 19



第 2 章 机械波 24

2.1 机械振动的传播 25

2.2 有关机械波的案例分析 29

2.3 惠更斯原理　波的反射与折射 32

2.4 波的干涉与衍射 35

2.5 多普勒效应 40



第 3 章 电磁场与电磁波 46

3.1 麦克斯韦的电磁场理论 47

3.2 电磁波的发现 50

3.3 无线电通信 56

3.4 电磁波家族 61

第4章 光的波动性 66

4.1 光的干涉 66

4.2 光的衍射 72

4.3 光的偏振与立体电影 74

4.4 光的折射 78

4.5 全反射与光导纤维 82

4.6 激光 86

第5章 新时空观的确立 90

5.1 电磁场理论引发的怪异问题 91

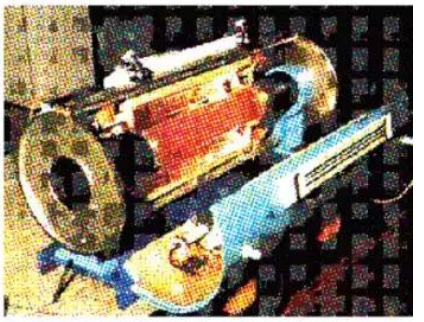
5.2 狭义相对论的基本原理 93

5.3 奇特的相对论效应 97

5.4 走近广义相对论 101

5.5 无穷的宇宙 104

总结与评价 课题研究成果报告会 106



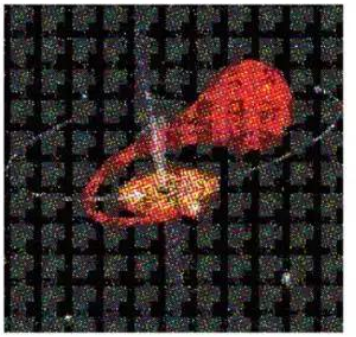




图 1-1　交响乐团演出

第 1 章
机械振动

大弦嘈嘈如急雨
小弦切切如私语
嘈嘈切切错杂弹
大珠小珠落玉盘
——白居易《琵琶行》

大型交响乐团的演奏总会给我们留下深刻的印象，各种乐器（如鼓、鼓、琴弦等）都在和谐地振动，不禁使人产生奇妙的遐想。其实，在我们的周围，“振动”无处不在。例如，钟摆的运动、微风中树枝的摆动、水面上漂浮物的浮动、车辆行进时车身的振动、大地的抖动等。可以说，在这个世界上，几乎所有物体都在振动。

振动是什么样的运动？

乐器怎么会发出动听的声音？

摆钟为什么能正确计时？

怎样利用振动的规律来为人类服务？

如何避免振动可能带来的危害？

……

你想知道这些问题的答案吗？让我们从探究简谐运动的规律开始。



图 1-2　艺术家在演奏古琴

周雨物理段石峰

1.1 研究简谐运动

机械振动(vibration)是物体以某一位置为中心的周期性往复运动。这种运动比以前研究过的直线运动、圆周运动等复杂。

本节先来研究最简单、最基本的简谐运动。

什么是简谐运动

实验探究 研究位移跟时间的关系

研究一个物体的运动，常用的方法之一是探究它的位移跟时间的关系。

实验装置如图 1-3 所示。系着弹簧的物块(弹簧振子)被气垫导轨托起，物块上固定一个色小球，拨动物块，小球便随物块以某一位置为中心做简谐运动。图 1-4 是小球运动的频闪照片。根据照片所提供的信息，可以研究它的位移跟时间的关系。

振动有一个中心位置。在研究振动时，为了确定振动物体某一时刻的位置，可将坐标的原点取在中心位置。

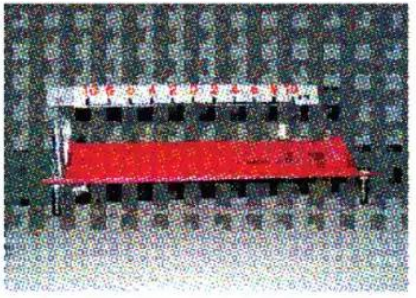


图 1-3 弹簧振子在气垫导轨上振动

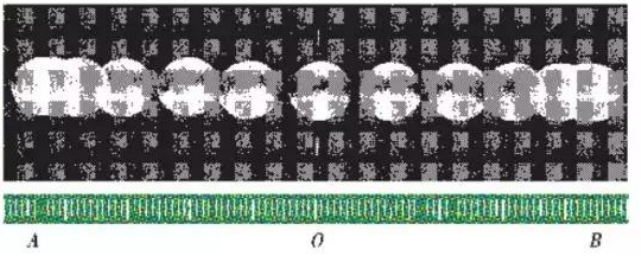
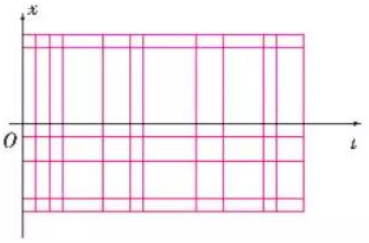


图 1-4 弹簧振子运动的频闪照片

在图 1-4 所示的频闪照片中，取小球在中心位置 O(平衡位置)时为 $t=0$，水平向右的位移为正，水平向左的位移为负，每次曝光的时间间隔为 Δt。请你用刻度尺测量小球在不同时刻的位移，并记录在你设计的表格中。

在坐标纸上以纵轴表示位移 x，横轴表示时间 t，每格表示一个 Δt。根据表中的数据在坐标平面上标出相应的点，用平滑的曲线将各点连接起来。

小球从 O 到 B，再从 B 到 A，最后回到 O 的过程，叫做一次全振动。请在坐标平面上画出一次全振动的图像。



互相交流一下，看看得到了怎样的图像？

理论和实验表明，弹簧振子做简谐运动时，其位移–时间图像是一条正弦曲线（或余弦曲线）。

我们用音叉、话筒、示波器再来做一个实验：用像皮锤敲打音叉，音叉的振动通过空气传递给话筒，话筒再把这种振动转化为音频电压输入示波器（图 1–5），示波器上就显示出这个振动的位移–时间图像。它说明音叉的振动是什么运动？

对着话筒说话，再观察示波器上的图像，你又看到什么情况？声带的振动是简谐运动吗？

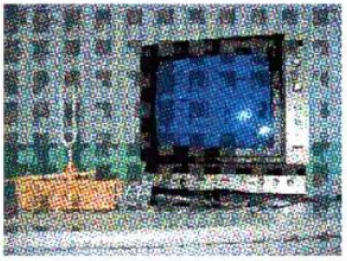


图 1–5　用示波器研究声振动

用图像描述简谐运动

振动的位移–时间图像通常叫做振动图像，它是对振动的一种形象描述。

我们知道，研究不同形式的运动，常需要用不同的物理量来描述。由于简谐运动是周期性的往复运动，可用周期、频率等物理量来描述。下面通过一个案例来进行分析。

案例分析 1

案例　图 1–6 是物体做简谐运动的振动图像。请根据图像回答

下列问题：(1)在图中 t_1 时刻和 t_2 时刻，物体的位移各是多少？(2)这个物体的振幅是多大？(3)这个振动的周期是多少？频率是多大？

分析　(1) 从图中直接读出 t_1 时刻的位移为 −3cm；t_2 时刻的位移为 2cm。

(2) 振幅指振动物体偏离平衡位置的最大位移。从图中读出位移最大值为 5cm，因此振幅为 5cm。

(3) 振动是一个周期性往复运动，图中 a 到 b 表示物体完成了一次全振动又回到原来的状态，经历的时间即周期。可见，这个振动的周期为 2s，频率为 0.5Hz。

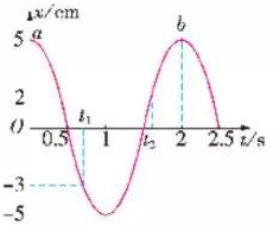
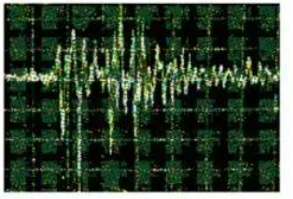
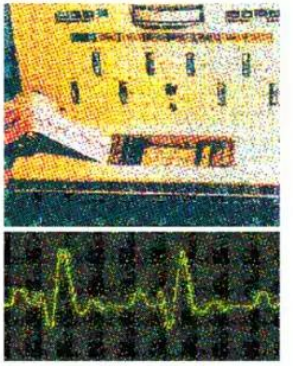


图 1-6　用图像分析简谐运动

假如在弹簧振子上固定一枝笔，沿着垂直于振子振动方向匀速拉动一条纸带，笔就会在纸带上描出一幅振动图像，如地震仪和心电图仪等描绘的都是振动图像(图 1-7)。振动图像在生产、科研等方面具有实际意义。



a. 地震仪描绘的地震图像



b. 心电图仪及其描绘的心脏振动图像

图 1-7

探究产生简谐运动的原因

分析论证

图 1-3 所示的实验中，振子为什么做往复运动？显然，这是由于它受到弹簧弹力作用的缘故。在振子运动的全过程中，弹簧弹力的方向始终指向平衡位置。物理学中，把振动物体受到的总是指向平衡位置的力，叫做回复力。

在这个实验中，根据胡克定律，振子受到的弹力在任一时刻都为

$$F = -kx$$

式中的比例系数 k 是弹簧的劲度系数。因此，振子所受到的回复力的大小跟振子的位移 x 成正比，方向始终指向平衡位置。

物理学中，把物体在跟位移的大小成正比，方向总是指向平衡位置的力作用下的振动，叫做**简谐运动**(simple harmonic motion)。

案例分析2

案例　对于图 1-6 所描述的简谐运动，试问：(1)在 t_1 时刻，振

动物体所受到的回复力和加速度的方向如何？(2)在 t_2 时刻，振动物体的速度方向如何？

分析 (1) 回复力与位移的方向总是相反，因此，此时回复力的方向为正，指向平衡位置；加速度方向与回复力一致，也指向平衡位置。

(2) t_2 时刻处在正方向位移增大的阶段，此时速度为正方向，物体正远离平衡位置。

信息浏览

复杂振动可以看成是由简谐运动合成的

在图 1-5 所示的实验中，如果使两个频率不同的音叉同时振动发声，观察示波器上的位移-时间图像，可以发现图像不再是正弦或余弦曲线，而显得比较复杂。这是由两个简谐运动共同引起的振动。假如一个物体同时参与两个简谐运动 A 和 B，A 的位移-时间图像如图 1-8a 所示；B 的位移-时间图像如图 1-8b 所示。我们就得到物体合振动的位移-时间图像(图 1-8c)。这就是说，一个比较复杂的振动的图像，可以由几个简谐运动的图像合成得到。所以，简谐运动虽然最简单，但却是最基本的、最重要的振动，是学习其他振动的基础。

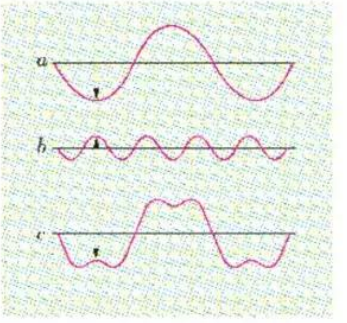


图 1-8 振动合成示意图

多学一点 推导简谐运动的位移公式

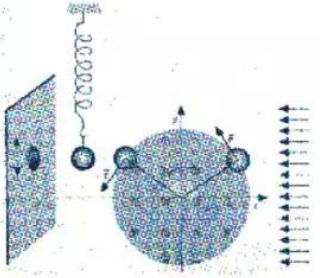


图 1-9 匀速圆周运动的小球在墙壁上的影子的运动是简谐运动

先来做如图 1-9 所示的实验。在可调转速的电动机的转动轴上固定一根细杆，杆的一端装一小塑料球。电动机通电后，从侧面用灯光照射，在墙壁上观察小球影子的运动。然后，在小球和墙壁之间放一个竖直方向的弹簧振子，调节电动机的转速，可以使小球与振子的影子的运动始终重合。

这个实验表明：做匀速圆周运动的质点在直径上的投影的运动是简谐运动。

由于简谐运动与匀速圆周运动存在上述关系，我们可以借用匀速圆周运动来推导简谐运动的位移公式。如图 1-10 所示，设质点 P 以原点为圆心，以简谐运动的振幅 A 为半径，在圆周上以角速度 ω 做匀速圆周运动。当 $t=0$ 时，它的投影在 O 点，在任一时刻 t，质点到了 P' 点，它的投影 a 的位移为

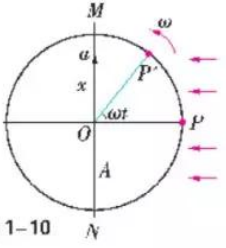


图 1-10

$$x = A\sin\omega t$$

上式中的 ω 叫做简谐运动的圆频率。质点做匀速圆周运动的

周期，就是弹簧振子做简谐运动的周期，因此，$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$。则简谐运动的位移随时间的关系便为

$$x = A\sin\frac{2\pi}{T}t = A\sin 2\pi ft$$

可见，简谐运动的位移随时间的关系是正弦函数，它的图像是正弦曲线。

如果将匀速圆周运动的向心力投影到直径上，就可以得到简谐运动回复力大小的表达式。如图 1-11 所示，由相似三角形的关系，有 $\frac{F}{F_{向心}} = \frac{x}{A}$，则 $F = \frac{F_{向心}}{A}x$。因为 $F_{向心}$、A 都是常量，$\frac{F_{向心}}{A}$ 可用常数 k 表示，考虑到力和位移的方向关系，于是有

$$F = -kx$$

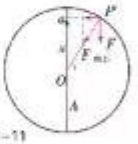


图 1-11

有兴趣的同学可以用上面介绍的“参考圆”的思想方法推导简谐运动的速度、加速度随时间的关系，以加深对简谐运动的理解。

家庭作业与活动

1. 请根据已经学过的知识，说明图 1-3 所示的水平弹簧振子在振动过程中机械能是否守恒？并分析弹簧振子的动能和弹性势能的变化情况，将结果填入下表。

振子从O点动的范围 A	A到O	O	O到B	B	B到O	O	O到A
动能的变化情况							
动能最大的位置 动能为零的位置							
势能的变化情况							
势能最大的位置 势能为零的位置							

2. 有一个物体在做简谐运动，它的振幅是 4cm，频率是 3Hz，这个物体在 2s 内一共通过了多少路程？

3. 水平弹簧振子的质量是 0.1kg，运动到平衡位置左侧 2cm 处时，受到的回复力是 4N，那么，当它运动到平衡位置右侧 1cm 处时，它的加速度大小为多少？方向如何？

4. 一根弹簧的上端固定，下端拴一小球，将小球向下拉开一点距离后放手，小球在上下振动起来，试证明小球做简谐运动。（提示：做小球振动的回复力是小球所受到的重力和弹簧弹力的合力）

5. 学习了简谐运动的振幅之后，请你谈一谈为什么最好用气垫导轨来做图 1-3 所示的实验。

周雨物理段石峰

1.2 探究摆钟的物理原理



图 1-12　最早的摆钟模型

惠更斯的这个思想，不论在理论上，还是在实验方法上，都是一个独到的创见。

你仔细观察过摆钟吗？它为什么能够准确地计时？怎样调节它走时的快慢？伽利略(G. Galileo)最早发现了教堂里吊灯摆动的等时性。1641 年，惠更斯(C. Huygens)按照伽利略的构想，发明制作了一个摆钟(图 1-12)。

惠更斯的科学抽象——单摆

惠更斯分析了钟摆摆动过程及其特性后指出，任意形状的物体在重力作用下摆动时，其质量可视为集中在悬挂点到物体重心的连线的某一点，这一点叫做摆动中心。于是，一个有复杂形体的摆，就可以简化为一个简单模型——一根很轻的细线系着一个有质量的质点，这个模型叫做**单摆**(simple pendulum)，如图 1-14 所示。质点的质量即单摆的质量，摆线的长度叫做单摆的摆长。

在实验室里，如果悬挂小球的细线的伸缩和质量可以忽略，细线的长度比小球直径大得多，这样的装置就可看成单摆。



图 1-13　摆钟

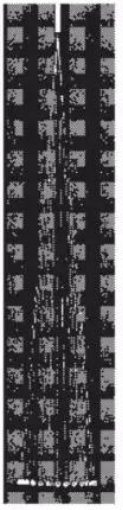


图 1-14　钟摆被抽象为单摆

探究单摆做简谐运动的条件

分析论证

单摆静止时摆球所处的位置 O 是单摆的平衡位置(图 1-15)。将摆球从平衡位置拉开一定距离后再释放，摆球就以平衡位置为中心沿着一段圆弧来回往复运动。

当摆球运动到图 1-15 中的任意位置 P 时，摆球受到的回复力是其重力 G 沿着圆弧切线方向的分力 G_1。

$$F = G_1 = mg\sin\theta$$

若摆角 θ 很小(图 1-16),则有 $\sin\theta \approx \theta = \frac{\overset{\frown}{OP}}{l}$,并且位移 $x \approx \overset{\frown}{OP}$,考虑了位移和回复力的方向后,有

$$F = -mg\frac{x}{l}$$

请思考:上式中"-"号表示的物理意义是什么?

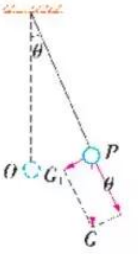


图 1-15　单摆的受力分析

上式中,m 是摆球的质量,l 是摆长,g 是重力加速度,都有确定的数值,$\frac{mg}{l}$ 可以用一个常数 k 来表示,则上式又可以写成

$$F = -kx$$

这就是说,在摆角很小时,单摆所受到的回复力跟位移成正比而方向相反,所以单摆做简谐运动。

你能设计一个实验,描绘出单摆的振动图像吗?



图 1-16　单摆做简谐运动的条件

研究振动的步调问题

利用单摆模型,我们来探究描述振动的另一个重要的物理量。

实验探究　比较两个振动的"步调"

1. 在铁架台上悬挂两个相同的单摆,若将两个摆球拉离平衡位置,使两摆线跟竖直方向有相同的角度,然后同时放开,这两个单摆的运动应该是完全一样的。那么,当先、后放开它们,这两个单摆的运动情况一样吗?

请仔细观察,两者的运动究竟有什么不同?

2. 再将两个单摆的摆球拉开到相同位置,先放开一个,等它摆动到另一边最大位移处时,再放开第二个。

请仔细观察,这两个单摆的运动又有什么不同?

分析论证

从上面的实验可知,先后放开的两个单摆的振幅、频率是一

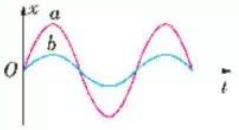


图 1–17　两个同相振动的图像

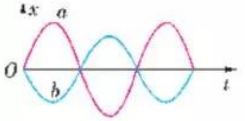


图 1–18　两个反相振动的图像

样的，但它们振动的“步调”是不一样的。为了描述这种区别，物理学中引入“相”（或相位、位相、周相）这个概念来描述振动的步调。在上述第一个实验中，两个单摆振动步调一致，就说它们的“相”是相同的，简称同相；当两个振动的“步调”不一致时，就说它们振动的“相”不同，或者说它们存在着相差。在第二个实验中，它们的振动“步调”正好相反，叫做反相。

用振动图像可以直观地表示不同振动的相。图 1–17 是在同一个坐标系里画出的两个同相振动的图像；图 1–18 是在同一个坐标系里画出的两个反相振动的图像。

相和相差在波的研究中是很重要的，在那里你将体会到它们的作用。

完成作业与活动

1. 关于单摆，下列认识中正确的是
   A. 一根线系着一个球悬挂起来，这样的装置就是单摆
   B. 可以看成单摆的装置中，细线的伸缩和质量忽略不计，线长比小球直径大得多
   C. 单摆的振动总是简谐运动
   D. 两个单摆只要结构相同，它们的振动步调便相同
2. 对单摆的运动过程中所受到的力（不计阻力），有以下几个认识，正确的是
   A. 受一个力，重力、线的拉力、回复力
   B. 受四个力，重力、拉力、回复力、向心力
   C. 只受两个力，重力和线的拉力
   D. 视具体情况而定
3. 对于单摆做振动的回复力，下列各项认识中正确的是
   A. 它是重力和线的拉力的合力
   B. 它是重力沿着运动圆弧切线方向的分力
   C. 在平衡位置处，摆球受的回复力为零，而合力不为零
   D. 在平衡位置处，摆球受力平衡而回复力仍然存在
4. 一个单摆摆长为 L，摆球的质量为 m，单摆做简谐运动。当摆角为 θ 时，摆球振动的加速度为多少？当它摆动到平衡位置时，若速度为 v，那么，它振动的加速度又为多少？此时的实际加速度是多少？

1.3

探究单摆振动的周期

单摆的周期跟哪些因素有关

提出问题

如果摆钟走时不准，修理钟表的师傅会拧一拧钟摆摆锤下方的螺母，调整其走时的快慢。他这样做的依据是什么呢？

猜想与假说

根据单摆的结构和单摆做简谐运动的条件，猜想一下，单摆做简谐运动的周期可能跟哪些因素有关？

制定计划与设计实验

根据图 1-19 给出的器材，再给一把游标卡尺，请制定一个实验方案来验证你的猜想是否正确。

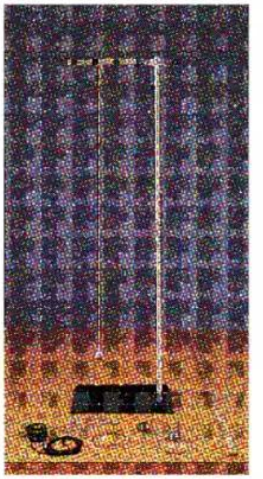


图 1-19 探究单摆周期的装置

交流与合作

请与同学讨论以下问题：

1. 怎样用米尺和游标卡尺测单摆的摆长？

2. 单摆在什么情况下才做简谐运动？在实验中对单摆的摆角有什么限制？

3. 测定单摆的周期，可以取平衡位置为计时的起点，也可以取摆球到达最大位移处时为计时的起点，你觉得哪个办法较好？

4. 单摆的周期比较短，要用怎样的方法才测得更准确？

在这里，测量周期的方法常用微小量累积法

进行实验与收集证据

根据以上研究，逐一改变影响单摆振动周期的因素，完成实验测量工作，将实验数据填入你设计的表格中。

分析与论证

请根据你的实验数据，尝试在坐标纸上画出 T–l 图像或 T^2–l 图像。

这是什么样的曲线？从图像中能看出单摆周期跟摆长的关系吗？

交流与合作

你能从数据中，看出单摆的周期跟质量有关吗？单摆振动周期跟摆长的定量关系怎样？图像法有什么优点？

评估

请比较两种图像，哪一种能直观简便地看出周期跟摆长之间的关系？总结一下，你在实验过程中是怎样减小误差的？

单摆的周期公式

惠更斯推导出在摆角很小时，单摆的周期公式为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

此公式表明：单摆振动的周期跟摆长的平方根成正比，跟当地的重力加速度的平方根成反比。

在同一地点，g 的数值一定，摆长一定的单摆就有恒定的振动周期，惠更斯正是利用了摆的这个性质，发明了摆钟。

案例分析

案例 已知月球表面的重力加速度为地球表面重力加速度的 1/6，将在地球表面走时准确的摆钟放到月球表面，则时针在钟面上从“1”走到“2”时，在地球上已经过了几小时？

分析 由摆钟内部机械结构知道，时针在钟面上从“1”走到“2”，钟摆摆动的次数是恒定的，从地球到月球变化的只是摆动的周期。

设钟摆在地球和月球上的周期分别为 T_1 和 T_2，时针从“1”到“2”钟摆摆动的次数为 n，则

在地球上，$t = nT_1 = 1\text{h}$

在月球上，$t' = nT_2 = x\text{h}$

于是有 $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{x}$，又因为 $\frac{T_1}{T_2} = \frac{\sqrt{g_{月}}}{\sqrt{g_{地}}}$

所以，$\sqrt{\frac{1}{6}} = \frac{1}{x}$，$x = 2.45$

可见，在月球上时针从“1”走到“2”时，在地球上已经过了 2.45h。

追寻惠更斯的足迹

实验探究 测定当地的重力加速度

惠更斯得出了单摆的周期公式后，在巴黎用一个周期为 2s 的单摆，精确测量出它的摆长为 3.0565 英尺，从而计算出重力加速度为 30.1666 英尺/秒^2，换算成国际单位制约为 9.8m/s^2。现在，我们仿照他的思路，来测定我们居住地区的重力加速度值。

由单摆周期公式推知，为了测定重力加速度，你需要测量哪些物理量？

为了减小误差，要变更摆长，重复几次实验，计算出每次实验的重力加速度值，最后得到重力加速度的平均值。

多学一点 单摆周期公式的推导

在推导简谐运动位移公式时，已经知道简谐运动的周期就是对应的匀速圆周运动的周期。

设匀速圆周运动的周期为 T，角速度为 ω，向心加速度为 a，半径为 R。由 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 和 $a = \omega^2 R$，可得 $T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{a}}$。

若简谐运动的振幅为 A，则 $R = A$。另外，匀速圆周运动的向心加速度等于对应的简谐运动的最大加速度，因此又有 $a = a_{max}$。

于是，简谐运动的周期就可以表达为 $T=2\pi\sqrt{\frac{A}{a_{max}}}$。

如果做简谐运动的物体是单摆，单摆振动的最大加速度为 $a_{max}=g\frac{A}{l}$。代入上式，我们就得到单摆做简谐运动的周期

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

课堂作业与活动

1. 如图 1-20 所示，一个单摆在 B、C 之间摆动，O 为最低位置，$\alpha<5°$，周期是 T，则
   A. 摆球质量增加时 T 增大
   B. 摆动角度变小时 T 减小
   C. 摆球从 B 到 O 和从 O 到 C 的时间都是 $\frac{T}{4}$
   D. 摆球从 B 到 O 过程中速度增大，加速度减小
2. 右甲、乙两个单摆，甲的摆长是乙的 4 倍，那么，在甲摆动 5 次的时间里，乙摆动了几次？
3. 一个单摆的摆长是 98.1cm，当地的重力加速度是 9.81m/s²，单摆振动的周期是多少？将它放到月球上时，周期变为多少？（已知月球上的重力加速度是地球上的 0.16 倍）
4. 在用装满细沙的漏斗观察沙摆的振动图像的实验中，随着细沙慢慢地流出，沙摆振动的周期会不会变化？
5. 在探究单摆振动周期的过程中，你是怎样测量单摆周期的？为什么要这样测量？



图 1-20

课题研究

周期等于 2s 的单摆叫做秒摆。查一查当地的重力加速度的数值，做一个秒摆，测量一下它的周期，看看是不是 2s？

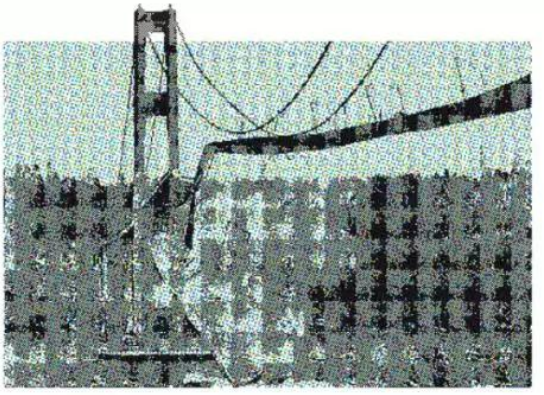


图 1-21　倒塌的大桥

1.4

受迫振动与共振

一个物体在振动过程中，总会或多或少地受到空气的阻力等的作用，使其振幅逐渐减小，最后静止。那么，为什么有些物体（如摆钟）能够长时间维持其振动而不衰减呢？有些物体的振动不仅不衰减，反而振幅越来越大，甚至造成事故呢？图 1-21 的照片是 1940 年美国 Tacoma 大桥在大风中倒塌的情景。坚固的桥梁怎么会在风的吹动下就倒塌呢？

振动中的能量损失

实验探究　**探究振动中的能量损失**

1. 如图 1-22 所示，置于空气中的弹簧振子振动时，它的振幅有没有变化？它会一直振动下去吗？

2. 将振子浸没在装有水的量杯中，重复上面的实验，它的振动情况有什么显著变化？

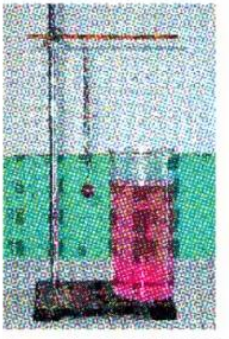


图 1-22　研究弹簧振子能量的损失

振动系统的能量与振幅有关，振幅越大，能量越大。

在短时间内，空气阻力的影响很小，弹簧振子的能量损失很少，我们看到的现象是弹簧振子的振幅几乎不变。由此推理：完全不存在介质阻力时，弹簧振子的简谐运动可以一直保持下去，它的振幅不发生衰减。

当介质阻力较大时，振动很快就会停止。振幅逐渐减小的振动叫做**阻尼振动**（damped vibration）。阻尼振动的图像如图 1-23 所示。

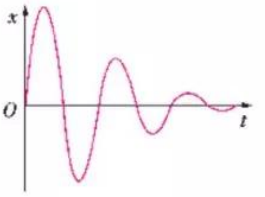


图 1-23　阻尼振动图像



图 1-24　摆钟的擒纵齿轮和擒纵叉

如果想使振动不衰减，就需要补充因阻力影响而损失的能量。儿童荡秋千时母亲总是不断地用力推动秋千，就是不断给系统补充能量；在工程技术中则通过自动装置来控制能量的补充。摆钟能保持其振幅不变，其补充的能量源于重物的下降，并依靠擒纵齿轮和擒纵叉一份一份地供给钟摆(图 1-24)。

受迫振动

给振动系统补充能量的最简单方法，是把周期性变化的外力作用于振动系统。物体在周期性变化的**驱动力**(driving force)作用下的振动，叫做**受迫振动**(forced vibration)。下面我们来研究这种振动。

实验探究　探究受迫振动

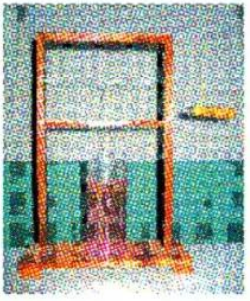


图 1-25　研究受迫振动

1. 弹簧振子挂在曲轴的弯曲部位(图 1-25)，放在空气中，使其振动。小球做自由振动时的频率，叫做振动系统的**固有频率**(natural frequency)。请通过观察，估计一下小球固有频率的大小。

2. 让小球浸没在盛水的容器里。均匀地转动曲轴，对振动系统施加驱动力。等到振动情况稳定后，小球的振动就是受迫振动。通过观察，比较驱动力的频率、小球做受迫振动的频率、小球的固有频率三者之间的关系。

使轴的转速依次改变(但每次保持转速恒定)，每次都注意观察和比较上述三种频率。

在上面的实验中，因为有驱动力做功，周期性地补充能量，我们可以看到小球的振幅不会减小。通过实验现象，我们还发现了一个重要事实：物体做受迫振动时，振动稳定后的频率等于驱动力的频率，跟物体自身的固有频率无关。

共振及其产生的条件

在生活和生产中，物体做受迫振动的事例是很多的，像缝纫机缝针的运动、汽缸里活塞的运动等都是受迫振动。不同物体受同样大小的周期性驱动力作用时，它们的振幅一样吗？我们通过实验来进行研究。

实验探究　研究摆的共振

1. 图 1-26 所示的装置中，几个不同的单摆悬挂在同一根绳子上，使 A 摆摆动起来后，A 摆的振动带动薄片做同样频率的晃动，这个薄片就给了其他几个摆周期性变化的驱动力，使它们都振动起来。

B、C、D、E 摆各做什么振动？它们振动的频率是否相等？等于什么？

2. 仔细比较 B、C、D、E 摆振动的振幅。

哪个摆的振幅最大？从摆长的角度去思考，讨论一下，振幅最大的那个摆满足什么条件？

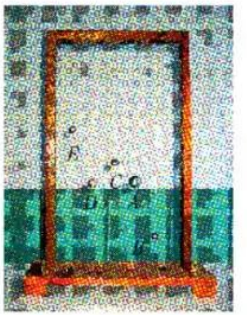


图 1-26　研究摆的共振

受迫振动的振幅 A 跟驱动力频率 f 之间的关系图像如图 1-27 所示（常称为共振曲线）。从图中可以看到，当 $f = f_{固}$ 时，受迫振动的振幅最大，如果 f 跟 $f_{固}$ 相差越大，受迫振动的振幅越小。

当驱动力的频率跟物体的固有频率正好相等时，物体做受迫振动的振幅最大，这种现象叫做**共振**(resonance)。

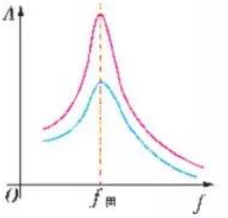


图 1-27　共振曲线

我们用图 1-28 所示的装置来模拟厂房因机器运转而做受迫振动的情况。当有偏心结构的电动机转动时，连着弹簧的平板便跟电动机一起振动起来，改变电动机转速至某个值时，可以看到振动系统的振幅特别大。这个实验表明，如果机器转动施加给厂房的驱动力的频率很接近厂房的固有频率，厂房便会处于共振状态，这样很可能要出现危险情况。

图 1-21 所示的这座悬索桥倒塌，是出事那一天的一场大风所致。风施加的驱动力的频率跟桥的固有频率恰好很接近，桥梁就处于共振状态，使振幅变得很大，酿成了这场事故。



图 1-28　模拟机器共振

当然，共振也有可以利用之处。像建造高楼浇灌混凝土时，用共振泵使水泥沙石剧烈振动而互相挤紧。工厂里的共振筛也是利用共振，提高筛除杂物的效率。

微波炉已经是比较普及的家用炊具（图 1-29），它的基本原理也是“共振”。微波炉的微波频率与水分子振动的固有频率 2500MHz 非常接近，因此，当微波照射到食物时，微波施加的驱动力使食物中的水分子做受迫振动，并且处于共振状态而剧烈振动，使食物的温度迅速升高。由于这种“加热”方式是从里到外同时发生的，所以比其他煮熟食物的方式更快捷。



图 1-29　微波炉

乐器发出的声音也作为驱动力使乐器腔内的空气做受迫振动。当满足共振条件时，腔内空气处于共振状态而有较大的振幅，这种声音的共振现象通常叫做共鸣。参加大型音乐会时，不妨去看一看各种各样的乐器，小提琴、大提琴、二胡、琵琶……它们都有形状不同，构造各异的共鸣箱，靠箱内空气的共鸣，才发出洪亮、美妙、动听的声音。

在第 3 章中还可以看到，无线电接收技术中用到“电谐振”原理，它是“共振”的另外一种表现形式。此外，医院里常用的一种先进检测手段——核磁共振，同样是利用共振原理。

总之，在需要利用共振时，应设法使驱动力的频率等于或者接近物体的固有频率；在需要防止共振产生危害时，应设法使驱动力的频率偏离物体的固有频率，偏离得越多越好。

课后作业与思动

1. 在图 1-25 所示的探究受迫振动的实验中，先让弹簧振子上下自由振动，测得它的振动周期为 0.4s，然后匀速转动把手使弹簧振子做受迫振动，问：把手的转速多大时，振子的振幅最大？
2. 图 1-30 是探究单摆共振条件时得到的图像，它表示了振幅随驱动力频率之间的关系，请回答：
   (1) 这个单摆的摆长是多少？
   (2) 如果摆长变长一些，画出来的图像的峰将向哪个方向移动？
3. 火车的车厢装在弹簧上，它们的共有周期是 1.5s，假如铁轨每经过 12.5m 就留有一个小的空隙，车轮通过空隙就受到一次冲击而使车厢振动。那么，火车匀速运动的速度多大时，车厢振动得最厉害？
4. 在列队通过桥梁时，为什么不能齐步走？

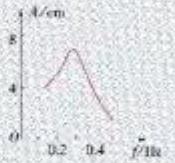


图 1-30

课题研究

研究声音的共鸣

如图 1-31 所示，取一只盛有水的量筒，将一根内径小一些的玻璃管插入，使管内水面上方有一段空气柱。敲打一下音叉后，将它放在空气柱的上方，可以听到管中的声音。上下移动玻璃管，你发现什么情况？

换用不同频率的音叉，情况又有什么变化？

请查找资料并完成实验，探究共鸣时空气柱的长度变化的规律。



图 1-31　探究声音的共鸣

周南物理段石峰

1.x

第 1 章家庭作业与活动

1. 一质点做简谐运动，其振动图像如图 1-32。由图可知

A. 质点振动的振幅随时间变化

B. 质点振动的频率为 4Hz

C. 在 t=2.5s 时，质点偏离平衡位置运动

D. 在 t=4s 时刻，质点受到的回复力为最大值

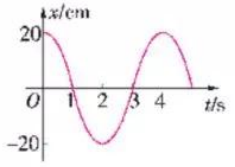


图 1-32

2. 有一个振动系统，它做自由振动时的频率为 $4f$，现在用频率分别为 f、$2f$、$4f$、$5f$ 的驱动力依次对它施加作用，比较每次振动稳定后的情况，下列判断中正确的是

A. 振动的振幅越来越大

B. 振动的频率越来越大

C. 振动的振幅先变大再变小

D. 振动的频率保持不变

3. 用两条长度都为 L 的细线，在天花板上悬挂一个小球，使两个悬挂点之间的距离等于 $2L\cos\alpha$（如图 1-33），组成了一个双线摆。让摆球在整个装置的中垂面内摆动。若摆动的摆角很小，则这个双线摆摆动的周期是多少？

4. 用洗衣机洗衣服，在甩干衣服的一道工序中，当几水桶的转速慢慢减小到一定程度时，洗衣机会抖动得特别厉害，请你在家中实地试验一下，仔细观察是不是发生这个现象，然后给出解释。

5. 一弹簧振子做简谐运动，周期为 T。下列判断中正确的是

A. 若 t 时刻和 $(t+\Delta t)$ 时刻振子位移的大小相等、方向相同，则 Δt 一定等于 T 的整数倍

B. 若 t 时刻和 $(t+\Delta t)$ 时刻振子速度的大小相等、方向相反，则 Δt 一定等于 $T/2$ 的整数倍

C. 若 $\Delta t=T$，则在 t 时刻和 $(t+\Delta t)$ 时刻振子的加速度一定相等

D. 若 $\Delta t=\dfrac{T}{2}$，则在 t 时刻和 $(t+\Delta t)$ 时刻弹簧长度一定相等

6. 若单摆的摆长不变，摆球的质量增加为原来的 4 倍，摆球经过平衡位置的速度减为原来的 1/2，则单摆振动的物理量变化的情况是

A. 频率不变，振幅不变

B. 频率不变，振幅改变

C. 频率改变，振幅改变

D. 频率改变，振幅不变

7. 有一个单摆摆长为 L，摆球的质量是 m，做简谐运动的最大摆角为 α，问：

（1）它从摆角为 α 摆到摆角为 β 时，速度有多大？

（2）在上述过程中摆球所受到的合外力做了多少功？

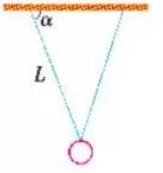


图 1-33

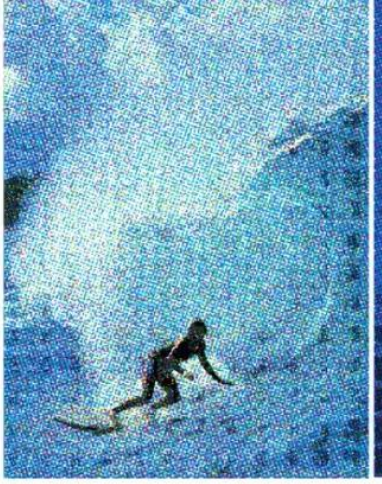


图 2-1　激动人心的冲浪

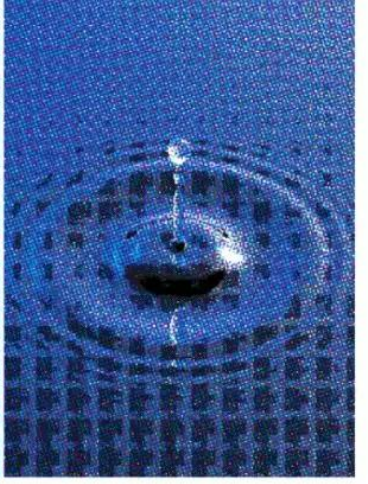


图 2-2　水面激起的水波

第 2 章
机械波

你知道冲浪运动吗？那汹涌的波涛时而把人推向高耸的巅峰，时而又将人卷入无底的深渊，让人们尽情享受冲浪的乐趣。

小孩嬉水时，常将小石子扔进平静的水中，形成阵阵涟漪。如果将两颗小石子扔进平静的水面，你还会看到怎样的现象？

平静的水面为什么会形成起伏的水波，向四周扩散？

为什么两列水波看起来会相安无事地独立扩散？

为什么有时候会出现“闻其声而不见其人”的现象？

为什么我们可以根据高空飞机的轰鸣声调变化，判断它是飞来还是飞去？

你想知道这些现象的物理原理吗？

……

我们将与水波、绳波相伴，用观察比较的方法，撩开机械波的层层面纱。

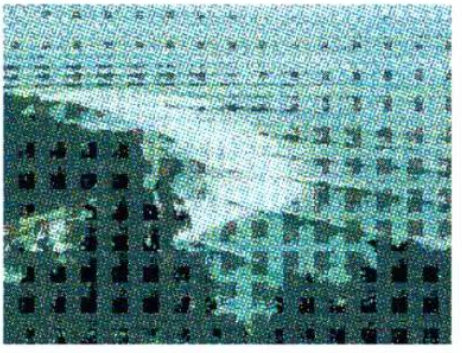


图 2-3　水波在一定条件下改变了传播方向

2.1

机械振动的传播

"波"这个词源于水波。考古出土的仰韶文化时期的陶器上就有水波纹饰。生活中经常可以看到水波。

我们在初中已经知道，声音是通过声波将声源的振动传到耳朵的。水波、声波、地震波等都是机械波。那么，什么是机械波呢？机械波是怎样产生和传播的呢？机械波有什么特点？



图 2-4 出土陶器上的水波纹饰

机械波是怎样产生的

实验探究 观察机械波

1. 实验器材如图 2-5 所示。用滴管把一滴水滴入盛水容器中，仔细观察水面的变化。

2. 如果在平静的水面上放一小纸片，再重复做上面的实验，仔细观察小纸片的运动情况。

3. 如图 2-6 所示，将一根长 2~3m 的细绳固定在钢锯条上，用手拨动钢锯条，仔细观察细绳的形状变化。



图 2-5 观察水波的实验

讨论与思考：

1. 水波和细绳上的波是怎样产生和传播的呢？

2. 水中小纸片的运动情况怎样？它会"随波逐流"吗？

物理学中，把机械振动在物质中的传播叫做**机械波**(mechanical wave)。传播机械波的物质，如水、空气、绳子、地壳等称为介质。

机械波传播时，物质并不"随波逐流"。那么，波传播的是什么呢？波传播的是振动的状态及其能量。

下面以绳子上的波为例，研究机械波形成的过程。

设想绳子由很多小段组成，每一小段可以看成是一个质元，质元间存在着相互作用，当绳子的一端做左右方向的简谐运动时，绳端质元就带动其相邻的质元运动。



图 2-6 观察绳波的实验

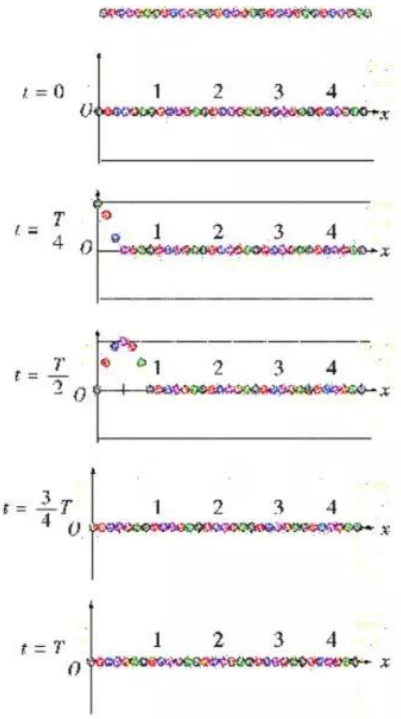


图 2-7　探究机械波的形成

讨论与思考：

1. 在图 2-7 中，已画出 $t = 0$、$t = \frac{1}{4}T$、$t = \frac{1}{2}T$ 时绳中质元的位置，你能画出 $t = \frac{3}{4}T$、$t = T$ 时各质元的位置吗？请在图中标出。

2. 在图 2-7 中，各质元的振动情况是否一样？

3. 绳中各质元的振动方向跟波的传播方向有什么关系？

横波与纵波

在图 2-8 所示的绳波中，绳上各质元做上下振动，波向右传播，两者的方向是相互垂直的。物理学中，把介质质元的振动方向跟波的传播方向垂直的波，叫做**横波**(transverse wave)。在横波中，凸起部分的最高处叫做**波峰**，凹下部分的最低处叫做**波谷**。

实验探究　观察弹簧上的纵波

如图 2-9 所示，用手轻轻推一下弹簧的下端。仔细观察弹簧的疏密分布及较密部分的运动情况。

讨论与思考：

1. 弹簧中的波是怎样传播的？

2. 弹簧各段的振动方向跟波的传播方向有什么关系？

物理学中，把介质质元的振动方向跟波的传播方向在同一直线上的波，叫做**纵波**(longitudinal wave)。

在纵波中，质元分布较密集的部分叫做**密部**，质元分布较稀

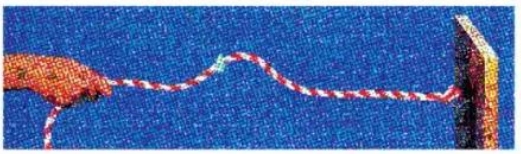


图 2-8　绳中的横波

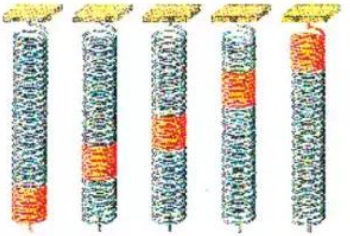


图 2-9　弹簧中的纵波

疏的部分叫做疏部。打鼓时，鼓膜振动推动周围的空气，空气中就产生疏密相间的纵波向远处传播。

波可以传递信息，我们通过语言进行交流，是利用声波传递信息。广播、电视是利用无线电波传递信息。

怎样描述机械波

用图像描述波

某一时刻介质各质元的空间分布，直观地描述了该时刻的机械波。如果用横坐标 x 表示在波的传播方向上各个质元的平衡位置，用纵坐标 y 表示某一时刻各个质元偏离平衡位置的位移，就能描绘出这一时刻波的图像。

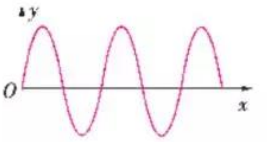


图 2-10 波的图像

如果波源做简谐振动，且不考虑阻力，则波在同一种均匀介质中传播时，各个质元的振幅相同，波的图像就是一条正弦（或余弦）曲线（图 2-10），这种波又叫做简谐波。

请在图 2-10 中，标明波峰和波谷。

用频率、周期、波长描述波

波的基本特征是周期性。振源的频率 f（或周期 T）就是波的频率（或周期）。波的图像中，两个相邻波峰（或两个相邻波谷）之间的距离，叫做**波长**（wavelength）。

请在图 2-10 中标出波长。

波传播的速度叫做**波速**（wave speed）。波在均匀介质中是匀速传播的。因此，

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

波速还可写成

$$v = \lambda f$$

即波速等于波长跟频率的乘积。

这两个公式对于光波、电磁波同样适用。

实验和理论表明，波在不同介质中传播时，其频率（周期）保持不变。由于波在不同介质中传播的速度不同，因此，波长也不同。

案例分析

案例 假设某一种声波的频率为250 Hz，在空气中传播时的波长为1.36 m，那么它的波速为多大？

分析 已知这种声波的频率f = 250Hz，波长λ = 1.36 m，由公式$v = \lambda f$得

$$v = 1.36 \times 250\,\text{m/s} = 340\,\text{m/s}$$

如果这列声波在纯净水中传播，波速是1531 m/s，它的波长是多大？

家庭作业与活动

1. 皮球掉入水塘中，请尝试往水塘中投石头，看看水波能否把皮球冲到岸边，为什么？
2. 2004年12月26日，印度洋发生的地震海啸，造成十几万人死亡和数以万计的房屋倒塌。从这一事件中，你能进一步理解（地震）波本质上传播的是什么吗？
3. 关于振动和波的关系，下列说法中不确的是
   A. 有振动就一定有波
   B. 波是质元由近及远的移动过程
   C. 波是传递波源振动能量的一种方式
   D. 波源停止振动则波也立即停止传播
4. 区分横波与纵波的依据是
   A. 质元沿水平方向还是沿竖直方向振动
   B. 质元的振动方向跟波的传播方向互相垂直还是在一条直线上
   C. 波沿水平方向还是沿竖直方向传播
   D. 波传播的距离近还是远
5. 简谐波在给定的介质中传播时，下列说法中正确的是
   A. 振幅越大，则波传播的速度越大
   B. 振幅越大，则波传播的速度越小
   C. 在一个周期内，振动质元走过的路程等于一个波长
   D. 质元振动的频率越大，则波传播一个波长所用的时间越短

课题研究

请到有关部门了解我国地震带的分布情况，查阅相关资料，分析一下我国沿海如果发生地震，是否会引起海啸？

你对建立我国地震或海啸的预警机制，有哪些想法和建议？

2.2

有关机械波的案例分析

我们已经知道机械波的形成过程、特性及其描述，本节通过案例分析，应用这些知识和有关方法解决一些具体问题。

机械波在同一均匀介质中是匀速传播的，可用 $s=vt$ 来处理有关问题。

案例分析 1

案例 地震是一种破坏性极大的自然灾害，它源于地壳内岩层的突然破裂。岩石发生破裂(震源)一般在地表下几千米到几百千米的地方，震源正上方地表处叫做震中。

设地震波纵波(P 波)和横波(S 波)的速度分别为 $v_P = 9.9\,\mathrm{km/s}$、$v_S = 4.5\,\mathrm{km/s}$，表面波(L 波)的速度 $v_L < v_S$。

P 波和 S 波传到地球表面会发生反射，产生沿地表传播的表面波(L 波)。

(1) 如图 2-11 所示，位于震中某实验室内有摆 A 与摆 B，地震发生时，最先摆动的是哪一个？

(2) 该实验室的地震观测仪记录到的地震图像如图 2-12 所示，由图推断 a、b、c 三种波形各对应于哪种地震波？

(3) 若通过图像测得 P 波与 S 波的时间差为 7.5 s，则该地震观测仪距震源多远？

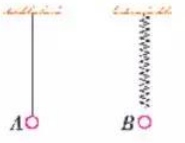


图 2-11

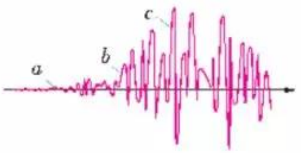


图 2-12 地震波示意图

分析 (1) 由于 $v_P > v_S > v_L$，可知纵波先传到震源正上方地面，物体受纵波影响，先在竖直方向振动，即最先振动的是摆 B。

(2) 因为三种波传播的距离相等，波速大的先到达地表，在地震图像上首先出现，所以 a 为纵波(P 波)，b 为横波(S 波)，c 为表面波(L 波)。

(3) 假设地震观测仪距离震源的距离为 s，由 $\frac{s}{v_S} - \frac{s}{v_P} = \Delta t$ 得

$$s = \frac{\Delta t}{\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P}} = \frac{7.5}{\frac{1}{4.5} - \frac{1}{9.9}}\,\mathrm{km} = 61.875\,\mathrm{km}$$

讨论与思考：

利用波长、频率、波速三者之间的关系，还能解决哪些问题？请举例说明。

波的图像与振动图像十分相似，这两者有何联系与区别呢？

案例分析 2

案例 波是振动状态的传播。对某一列波来说，图 2-13a、b 两个图像中，哪一个是波的图像，哪一个是波源的振动图像？你能根据两个图像提供的信息，计算出波长、周期和波速吗？

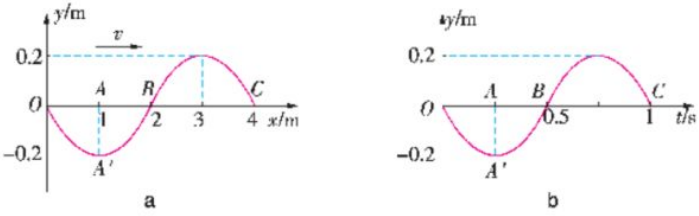


图 2-13 波的图像与振动图像

分析 根据图像中的横坐标单位可以判断，图 a 是波的图像，图 b 是振动图像。

图 a 中 AA' 是某质元某时刻的位移（正好在最大位移处），因此，这列波各质元的振幅为 0.2 m。OC 表示这列波的波长，$\lambda = 4\,\mathrm{m}$。

图 b 中 AA' 是波源质元振动的振幅，为 0.2m；OC 表示该质元的振动周期，$T = 1.0\,\mathrm{s}$。

由于两图像描述的是同一列波的有关情况，所以波速为

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{4}{1}\,\mathrm{m/s} = 4\,\mathrm{m/s}$$

你怎样区分振动图像和波的图像？

案例分析 3

案例 某时刻一列横波的图像如图 2-14 红线所示，若已知该时刻质元 a 的运动方向向下，试判断这列波的传播方向。

分析 对这个问题，一般可用两种方法进行分析。

1. 在质元 a 的两侧不超过 $\frac{\lambda}{4}$ 的范围内，各取两点 a_1 和 a_2，根据该时刻质元 a 的运动方向，就可知道质元 a_1 带动 a 向下运动，而质元 a_2 被 a 带着向下运动。这表明，这列波是沿 x 轴正方向传播的。

2. 可假设波沿某方向传播，将图像沿着波的传播方向移动一段距离 $\Delta x = v\Delta t\left(\Delta t < \frac{T}{4}\right)$，然后观察图中质元 a 位置变化是否符

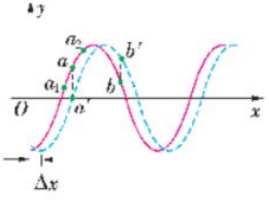


图 2-14 波的传播示意图

合实际情况，从而确定波的传播方向。

思考与讨论：

1. 假如已知波的传播方向，根据波的图像，你能确定某一质元的振动方向吗？

2. 图 2-13a 中，OA、AB 间各质元的运动方向怎样？

3. 图 2-13b 中，质元在 0~0.25 s 内是远离还是向着平衡位置运动？在 0.25~0.5 s 内的情况又怎样呢？

课堂作业与活动

1. 下列关于波长的说法中正确的是

A. 一个周期内介质质元走过的路程

B. 横波中相邻的两个波峰间的距离

C. 一个周期内振动状态所传播的距离

D. 两个振动速度相同的介质质元间的距离

2. 列波在第一种均匀介质中的波长为 λ_1，在第二种均匀介质中的波长为 λ_2，且 $\lambda_1 = 3\lambda_2$，那么波在这两种介质中的频率之比和波速之比分别为

A. 3∶1，1∶1　　B. 1∶3，1∶1

C. 1∶1，3∶1　　D. 1∶1，1∶3

3. 如图 2-15 所示，绳子右端固定，一列波刚传到 B 点，由图可判断出质元 A 开始振动的方向是

A. 向上　　B. 向下

C. 向左　　D. 向右



图 2-15

4. 你知道波的图像和振动图像的区别吗？请在下面表格中填写你所理解的内容。

比　较	振动图像	波的图像
图　像		
研究对象		
物理意义		
横坐标		
相邻最大值间的距离		
纵坐标上直接得到的信息		
图像的变化趋势		

周南物理段石鑫

2.3 惠更斯原理　波的反射与折射

你游览过北京天坛(建于永乐 18 年,即 1420 年)吗?那里有著名的"回音壁"和"三音石"。当你紧贴回音壁小声讲话时,在回音壁的另一处,你的朋友可以听得很清楚;当你站在三音石上击掌一次,就能听到几声回音。在做上述"游戏"时,你是否想过其中的道理?原来,这些都跟波的传播规律有关。惠更斯原理是研究波的传播规律的理论基础,下面利用它来研究波的反射与折射规律。

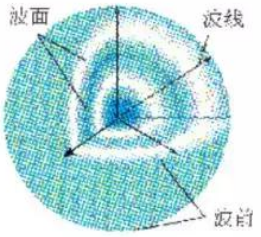


图 2-16　球面波

惠更斯原理

在均匀介质中,质元的振动会向各个方向匀速传播,形成球面波(图 2-16)。波在介质中传播时,任一时刻介质振动步调相同的点的包络面,叫做**波面**(wave surface);最前面的波面又叫波前;垂直于波面并指向波传播方向的直线,叫做**波线**(ray)。波面是平面的波,叫做平面波。

惠更斯对波的传播进行了深入研究后,于 1690 年提出:介质中波前上的各点,都可以看作是一个新的波源(子波源),并发出子波;其后,这些子波的包络面就是新的波面。这就是惠更斯原理。

请对照图 2-16 思考:波面、波前和波线的物理意义是什么?你能用惠更斯原理解释水波是怎样传播的吗?

如图 2-17 所示,已知 S_1 是球面波和平面波在 t 时刻的波前,请根据惠更斯原理,在图中画出 $t+\Delta t$ 时刻的各个子波及波面(波前)。

根据惠更斯原理,只要知道某一时刻的波面,就可以用作图的方法确定下一时刻的波面。下面我们就用这个方法来研究波入射到两种介质的分界面上时传播方向改变的规律,即波的**反射**(reflection)和**折射**(refraction)规律。



惠更斯(C. Huygens, 1629–1695),荷兰物理学家和数学家,研究出制作显微镜或望远镜的技术。他第一个提出光的波动说。

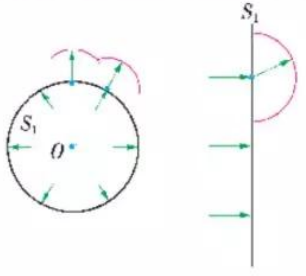


图 2-17　球面波与平面波的传播

研究机械波的反射规律

如图 2-18 所示，通过振动装置在矩形水槽中激发水波。水波碰到槽壁发生反射后，会出现如图 2-18 所示的对称图样。请根据图 2-19 分析，入射到槽壁上的水波的方向跟反射的水波的方向有什么关系？

通过振动装置在矩形水槽中激发的水波可以看成是平面波。

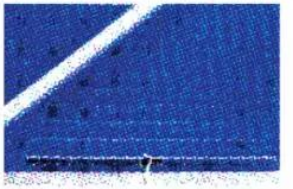


图 2-18 水波的反射实验

分析论证

如图 2-20 所示，设入射的平面波的波面和两种介质的分界面均垂直于纸面。在时刻 t，波面 AB 的 A 点和界面相遇。经过三个相等的时间间隔，此波面依次到达分界面上等间距的 E_1、E_2 和 C 点。

因为波在同一均匀介质中的传播速度不变，所以，可以分别以 A、E_1、E_2 为圆心，以 BC、$B'C$、$B''C$ 为半径，画出三个反射子波，进而确定反射波的波面和波线。

请完成右图，画出反射波的传播方向。

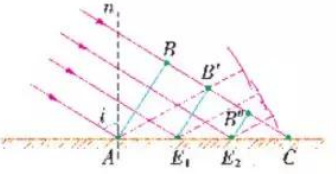


图 2-20 波的反射

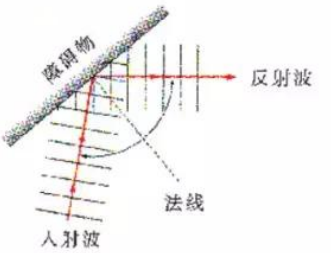


图 2-19 水波的反射规律

过 A 点作界面的法线 An，标出入射角和反射角。容易证明，反射角等于入射角。这就是波的反射定律。

研究机械波的折射规律

如图 2-21 所示，在矩形水槽底部一半区域内垫一块玻璃板，形成深水区和浅水区。利用振动装置激起水波，当水波从深水区传播到浅水区时，可以观察到如图 2-22 所示的折射图样。

水波的传播速度与水深有关，水越深，波速越大。实验中因深水区和浅水区的波速不同，故可将深水、浅水区域视为两种介质。

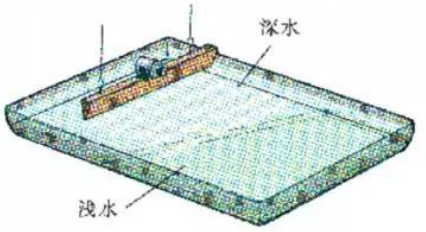


图 2-21 水波的折射实验装置

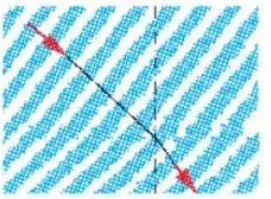


图 2-22 水波折射图样

分析论证

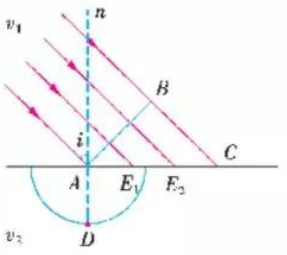


图 2-23　波的折射

研究表明，波的传播速度跟介质的性质有关。当波由第一种介质进入第二种介质时，由于其传播速度不同，在分界面上就会发生折射现象。下面我们用惠更斯原理来分析波的折射规律。

如图 2-23 所示，设 v_1、v_2 分别表示波在第一种和第二种介质中的波速，且 $v_1>v_2$。时刻 t 入射波波面 AB 到达图示位置，其后经过三个相等的时间间隔，此波面依次到达等间距的 E_1、E_2 和 C 点。

请思考，从 A、E_1、E_2 向第二种介质发出的子波的半径按照什么规律变化？为什么？

仿照波的反射的作图方法，在图 2-23 中，分别以 A、E_1、E_2 为圆心，以 $AD(<BC)$、$\frac{2}{3}AD$、$\frac{1}{3}AD$ 为半径，画出进入第二种介质的子波和折射波的波面，进而确定折射波的方向。

由图可以看出，入射波的波线跟折射波的波线不在一条直线上。

研究表明，波从第一种介质进入第二种介质分界面处会发生折射现象。入射角的正弦跟折射角的正弦之比，等于波在第一种介质中的波速跟在第二种介质中的波速之比。这就是波的折射定律。

根据图 2-23，作法线后确定入射角 i 和折射角 r，可以证明：

$$\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{v_1}{v_2}$$

我们把 $\frac{v_1}{v_2}$ 叫做第二种介质对于第一种介质的相对折射率。

课后作业与活动

1. 影剧院的内墙壁是不是很光滑？请实地观察后谈谈影剧院为什么这样处理墙壁。
2. 旅游者走过一个山谷，他拍手以后经过 0.5s 听到右边山坡反射回来的声音，经过 1.5s 听到左边山坡反射回来的声音，则这个山谷的宽度大约是_____m。
3. 为了测一根长铁管的长度，甲同学把耳朵贴在长铁管一端，乙同学在另一端敲一下这根铁管，测得甲同学听到的两次响声的时间间隔为 0.5s，已知声音在铁和空气里传播的速度分别为 3910m/s 和 340m/s，问这根铁管有多长？
4. 如图 2-24 是一列机械波从一种介质进入另一种介质中发生的折射现象，已知在介质Ⅰ中的波速为 v_1，在介质Ⅱ中的波速为 v_2，则 v_1：v_2 为

A. $1:\sqrt{2}$　　B. $\sqrt{2}:1$

C. $\sqrt{3}:\sqrt{2}$　　D. $\sqrt{2}:\sqrt{3}$

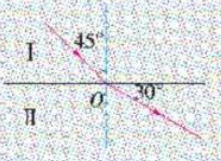


图 2-24

2.4

波的干涉与衍射

湖面上，几艘飞驰的游艇劈波斩浪，其后留着彼此独立的波形（图 2-25）。

这些波相遇时以及相遇后的情况会怎样呢？



图 2-25 几列水波独立传播

波的叠加原理

实验探究 研究绳波的叠加

两位同学在一根长绳（8~10m）的两端，将绳水平稍稍拉紧，然后分别上下摆动一下，各使绳产生一个凸（或凹）的波。仔细观察绳子中两列波的传播情况，你有什么发现？

由于绳子中波的传播速度较快，人眼很难看清楚波的传播和叠加情况。用摄像机将其拍摄下来，截取不同时刻的几个画面，就可以清楚地看到图 2-26 所示的叠加过程。

在水面上，有两个圆形水波，波前逐渐扩展，到一定时候两波相遇，然后又分开（图 2-27）。两列波在相遇后，各自的传播状况是否发生变化？

大量事实证明，几列波相遇时能保持各自的特性（频率、波

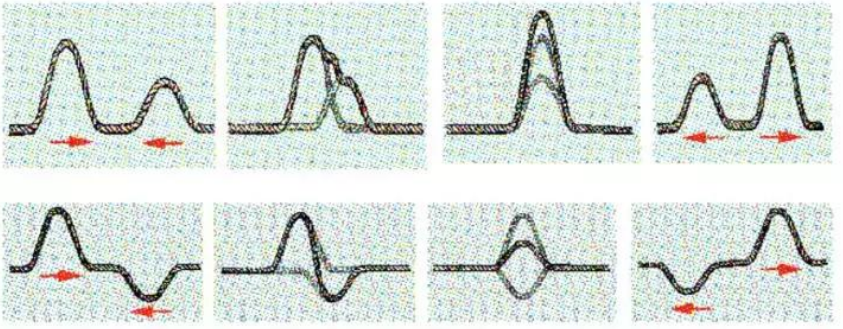


图 2-26 绳波的叠加

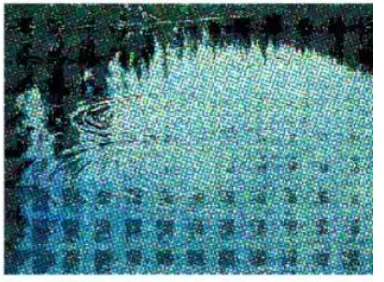


图 2-27 水波的叠加

长、振动方向等)继续传播,不受其他波的影响。在相遇区域内,任一质元的位移是各列波单独存在时在该点所引起的位移的矢量和。这就是波的独立性和叠加原理。

研究波的干涉

实验探究 研究水波的干涉

实验装置如图 2-28 所示。两振动小球周期性地触动水面,形成两个振动频率和振动步调相同的波源,两波的频率相同。这两列波相遇后,在它们的重叠区域会形成奇妙而稳定的图样(图 2-29)。仔细观察水面振动的图样,可以看出,存在着一条条从两个波源中间伸展出来的相对平静的区域和激烈振动的区域。

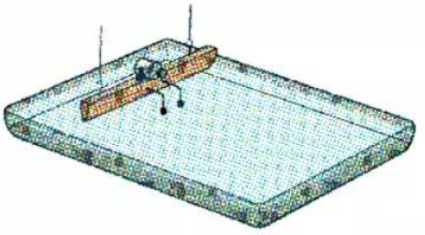


图 2-28 水波干涉实验装置

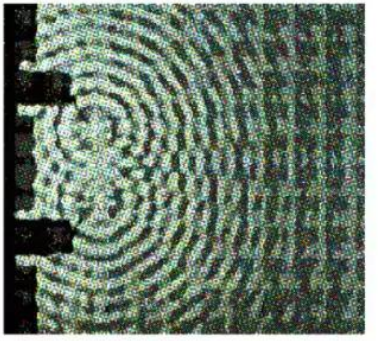


图 2-29 水波干涉图样

相对平静的区域和激烈振动的区域在水面上的位置是不是固定的?水面的花纹有什么特点?

分析论证

为了分析方便,将图 2-29 所示的照片画成图 2-30。某一时刻水面上的某一点(图 2-30 中的 a 点)是两列波的波峰跟波峰相遇,经过半个周期,就变成波谷跟波谷相遇。波峰跟波峰相遇时,质元的位移最大,等于两列波的振幅之和;波谷跟波谷相遇时,质元的位移也是最大,也等于两列波的振幅之和。在这一点上,两列波引起的振动始终是加强的,质元振动的振幅等于两列波的振幅之和。

请讨论：某一时刻水面上的另一点（图 2-30 中的 b 点）是两列波的波峰跟波谷相遇，经过半个周期，就变成波谷跟波峰相遇。在这一点上，两列波引起的振动是加强还是减弱？

图 2-30 中实线与实线的交点（或虚线与虚线的交点）为振动的加强区（用放射状实线画出）；实线与虚线的交点为振动的减弱区（用放射状虚线画出）。可以看出，这一图样跟实验所得到的图样是一致的。

由上面的实验和分析可知，振动频率相同、步调一致的两列波叠加，使某些区域的振动加强，某些区域的振动减弱，而且振动加强的区域和振动减弱的区域相互隔开、始终稳定，这种现象叫做波的**干涉**（interference）。能够产生干涉的波源叫做相干波源，干涉所形成的图样，叫做干涉图样。

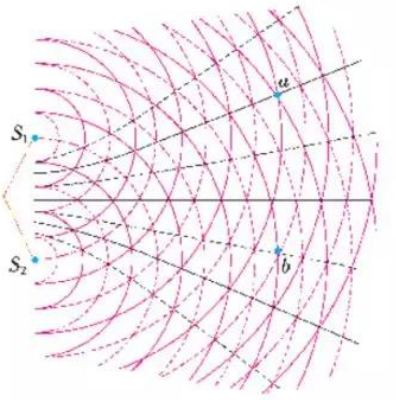


图 2-30 两列波的干涉（实线表示波峰，虚线表示波谷）

请讨论：

几列波相遇，一定会产生干涉现象吗？要产生干涉现象，对波源有什么要求？

一切波只要符合相干条件都能发生干涉。

STS

利用干涉原理制成干涉型消声器

图 2-31 是干涉型消声器的工作原理图。

有一列波长为 λ 的声波，沿水平管道自左向右传播。当入射波到达 a 处时，分成两束相干波，它们分别通过 r_1 和 r_2，再到 b 处相遇。若 $\Delta r = r_2 - r_1$ 恰好等于声波半波长 $\frac{\lambda}{2}$ 的奇数倍，即 $\Delta r = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$ 时，声波的振幅 $A = 0$。这就是说该频率的声波被削弱。利用这一原理，可以达到控制噪声的目的。

干涉型消声器能有效地消除低频噪声。发动机（正常工作期间）的周期性排气噪声，就是一种典型的低频噪声。一台四缸四冲程发动机，当它以 2000r/min 的转速运转时，其峰值频率在 200 Hz 以下的噪声较大。所以常用干涉型消声器来消除这类低速转动发动机所发出的低频噪声。一台带有干涉消声器的柴油发动机经消声处理后，其排气噪声可以降低 10 dB 以上。

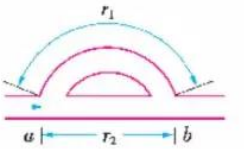


图 2-31

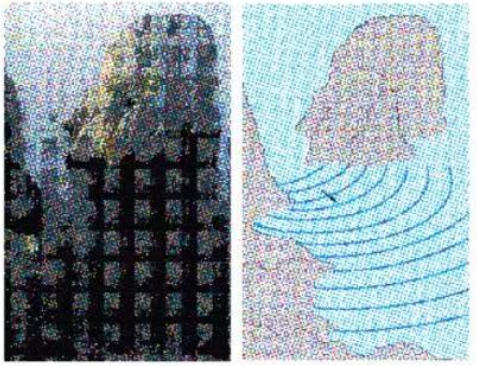


图 2-32　水波绕过小山

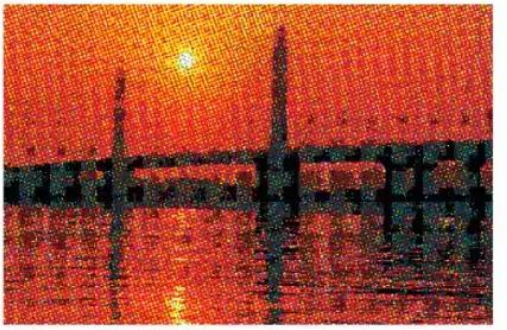


图 2-33　水波绕过桥墩

研究波的衍射

图 2-32 中，我们看到水波通过两山之间狭窄的水面时，半圆形的水波向外扩散，可以绕过小山。这是为什么呢？

图 2-33 中，雄伟的大桥下，悠悠江水，层层波浪绕过桥墩却“若无其事”？

波还会转弯，这是什么缘故？

实验探究　研究水波的衍射

在水波槽内，波源的前方竖一块木板，观察水波在传播过程中发生的现象。如果在波源的前方插一段细铁丝，观察到的现象又是怎样的呢？

波可以绕过障碍物继续传播，这种现象叫做波的衍射(diffraction)。在什么条件下波才能发生明显的衍射现象？

在水波槽里放两块挡板，当中留一窄缝，保持水波的波长不变，逐渐改变窄缝的宽度(由宽到窄改变)，观察波的传播情况(图 2-34)。

生活中，由于水波的波长较长，河堤缺口比较大时，也会出现水波绕过缺口两侧的现象(图 2-35)。

请讨论：缝、孔或障碍物的尺寸跟波长相比较，大致满足怎样的

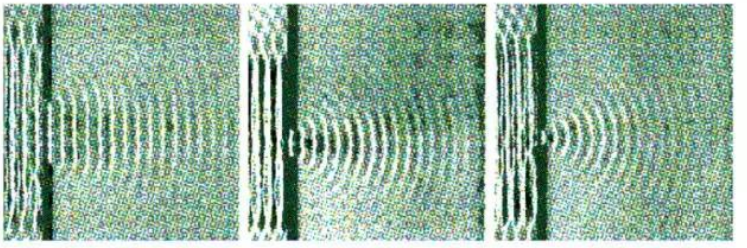


图 2-34　水波发生明显衍射的条件

关系才能观察到明显的衍射现象？如果缝、孔或障碍物较大时，就不存在衍射现象吗？



图 2-35 水波绕过河堤

障碍物或孔的尺寸大小并不是决定水波是否发生衍射的条件。障碍物或孔的尺寸也不是越小越好，当障碍物或孔的尺寸远小于波长时，尽管衍射现象十分突出，但由于波的能量的减弱，也不容易观察到衍射现象。

请解释生活中"闻其声而不见其人"的现象。

如图 2-36 所示，平面波传到狭缝时，缝上各点成为新的子波源，各点都要发射半圆形子波。设 v 为波速，请画出几个子波和波前，说明能发生的衍射现象。

如图 2-37 所示，如果缝很狭窄，宽度跟波长相差不多时，可认为波经过狭缝后的波前是圆形的。设 v 为波速，请画出几个波前，说明能发生明显的衍射现象。

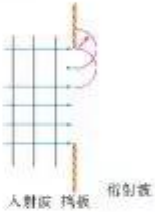


图 2-36 平面波的衍射

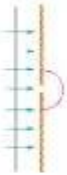


图 2-37 平面波带绕衍射

总之，当缝很宽，其宽度远大于波长，则波通过缝后基本上是沿直线传播的，衍射现象就很不明显。当缝的大小(或障碍物的大小)跟波长相差不多时，就能发生明显的衍射现象。

家庭作业与活动

1. 准备一台收录机，两个相同的扬声器，请设计一个实验，体验声波发生的干涉现象。如果学校操场上已经安装有落地音箱，请在播放音乐时体验一下。
2. 两列波长相等的水波发生干涉现象，若在某一时刻，恰好 P 点处两列波的波峰相遇，Q 点处两列波的波谷相遇，则
   A. P 点振动加强，Q 点振动减弱
   B. P、Q 两点振动都加强
   C. P、Q 两点振动周期相同
   D. P、Q 两点始终处在最大或最小位移处
3. 下列有关干涉图样的说法中，正确的是
   A. 振动加强的区域和振动减弱的区域相同
   B. 两个振动源连线的垂直平分线上的质元的振动是减弱的
   C. 两列波的波谷与波谷相遇处的质元的振动是减弱的
   D. 两列波的波峰和波谷相遇处的质元的振动是加强的
4. 在做水波通过小孔衍射的实验时，激发水波的振子振动频率为 5Hz，水波在水面中传播速度为 0.05m/s，为使实验效果更明显，使用小孔直径 d 应为_____。
5. 如图 2-38 所示，R 为波源，M、N 为两块挡板，其中 M 板固定，N 板可上下移动，两板中间有一狭缝。此时测得 A 点没有振动，为了使 A 点能发生振动，可采用的方法是
   A. 增大波源的频率
   B. 减小波源的频率
   C. 将 N 板向上移动一些
   D. 将 N 板向下移动一些



图 2-38

周南物理段石峰



图 2-39　空中飞机轰鸣声与多普勒效应

2.5 多普勒效应

生活中，我们能否从飞机轰鸣声调的高低，判断它是远处飞来，还是掠过头顶而离去？

站在马路边，一辆响着喇叭的汽车从身边驶过。你听到的喇叭音调是否变化？

1842 年初夏的一天，奥地利物理学家多普勒(J. C. Doppler)带着心爱的女儿在铁道旁散步。这时远处有一列高速行驶的火车鸣笛而来，火车经过他们身旁后又鸣笛离去，多普勒发现汽笛音调先变高，后又变低。多普勒对这种现象十分惊奇，他再次来到铁路旁，体验当初的感觉，证实了自己的直觉没错。

偶然中孕育着必然。多普勒对这种现象进行了认真的研究，总结出了其中的规律。

感受多普勒效应

1845 年，荷兰皇家气象学院院长白贝罗(C. Buys-Ballot)在乌得勒支铁路上进行了实验，让机车牵引一节平板车厢，上边坐了一队小号手奏乐。当机车快速驶来驶去时，由一些训练有素的音乐家用自己的耳朵判断音调的变化。然后音乐家与小号手对调位置，重新实验，实验进行了两天，观测到管乐器音调确实有明显的变化。

实验探究　感受多普勒效应

对于上述现象，我们可以通过如下两个实验来体验。

1. 将一个哨子系在约 1.5m 长的细绳一端，另一端系在手上，让手臂晃动，使哨子在我们头上旋转。另一些人坐在凳子上，聆听哨声的音调变化情况。相互交换一次，亲身体验一下。

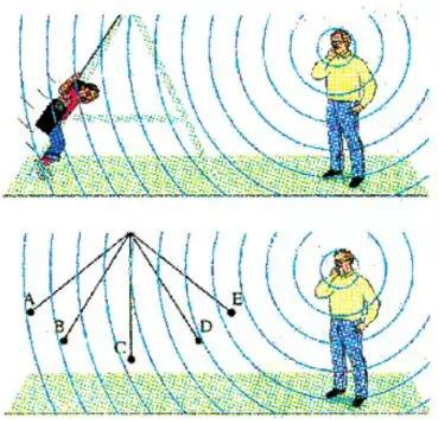


图 2-40 体验响声的变化

2. 两位同学相隔一段距离(约 10 m),一人手持小收音机播放音乐(或吹口哨),另一人坐在秋千上来回摆动(图 2-40),经过图中 A、B、C、D、E 不同位置,体会一下音调是如何变化的。

这种由于波源跟观察者之间有相对运动,使观察者感受到波的频率发生了变化的现象,叫做**多普勒效应**(Doppler effect)。

分析论证

多普勒效应表明:观察者与波源相对运动时,观察者接收到的频率与波源的频率不同(图 2-41)。这种效应是怎样发生的呢?

设波源频率为 f,波在介质中速度为 V,观察者接收到的频率为 f'。当波源和观察者均相对于介质静止时,单位时间内观察者接收到的"完整波"的个数等于波源发出的"完整波"的个数,即接收频率等于波源频率,有

$$f' = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{VT} = f$$

1. 当波源相对介质静止,观察者向着波源以速度 v 运动时,

波源频率是指单位时间内波源发出的"完整波"的个数。

接受器收到的频率是指单位时间内接受器接受到的"完整波"的个数。

波的频率是指单位时间内通过介质中某点的"完整波"的个数。

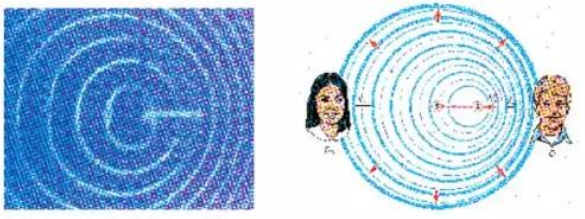


图 2-41 产生多普勒效应的原理示意图

相当于波相对于观察者的速度增大，而波长不变，故单位时间内观察者接收到的“完整波”的个数多于波源发出的“完整波”的个数，即接收频率大于波源频率，有

$$f' = \frac{V+v}{\lambda} = \frac{V+v}{VT} = \frac{V+v}{V} f$$

请思考：当观察者以速度 v 离开波源运动时，接收频率跟波源频率有什么关系？

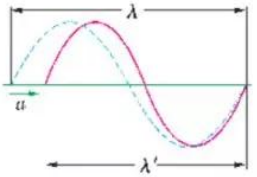


图 2–42

2. 当观察者相对介质静止，波源以速度 u 向着观察者运动时，相当于波长减小而波速不变，因此单位时间内观察者接收到的“完整波”的个数多于波源发出的“完整波”的个数，即接收频率大于波源频率，如图 2–42 所示，有

$$f' = \frac{V}{\lambda'} = \frac{V}{VT - uT} = \frac{V}{V-u} f$$

请思考：当波源以速度 u 离开观察者运动时，接收频率跟波源频率有什么关系？

请在上面分析论证的基础上，推导出波源与观察者同时相对于介质运动时，接收频率跟波源频率之间的关系

$$f' = \frac{V \pm v}{VT \mp uT} = \frac{V \pm v}{V \mp u} f$$

身边的多普勒效应

多普勒效应在科学研究、工程技术、交通管理、医疗诊断等多个领域有广泛的应用。工业生产中，根据多普勒效应制成的流量计，可以测定各种封闭管道中流体或悬浮物液体的流速。医学中根据多普勒效应制成的胎心控制器、血流测定仪，可以探测人体内脏器官因病变而引起的异常状况。利用激光的多普勒效应可以精确地测定各种运动物体的速度。天文学上，根据多普勒效应可以准确地计算出天体相对于地球运动的速度、人造卫星的运动速度等。观察恒星光谱，天文学家发现谱线向红端移动，也就是说频率在下降，可以判断出它们在向远方离去。美国科学家哈勃（E. P. Hubble）经过仔细测量得知，恒星越远，红移量越大，离开速度越大。这是大爆炸理论的重要依据之一。

案例分析

案例 交通警察利用多普勒效应可测量公路上汽车的车速。如一固定的声源发出频率为 10 kHz 的声波，一辆汽车向声源迎面驶来，在声源处接收到从汽车反射回来的声波，其频率从差频装置中测出为 11kHz。设空气中的声速为 300 m/s，试求汽车行驶的速度。

分析 汽车相对于空气以速度 u 趋近声源。从声源发出的声波到达汽车时，汽车是运动的接收装置。声波经汽车反射时，汽车又是以速度 u 运动的声源。

从固定的接收装置接收到的反射波频率为

$$f' = \frac{v+u}{v-u} f$$

由此可解出 u 为

$$u = \frac{f'-f}{f'+f} v = \frac{11-10}{11+10} \times 300\,\text{m/s} = 14.28\,\text{m/s}$$

即汽车的行驶速度为 14.28 m/s。

STS

利用超声波的多普勒效应，可以测定血液流动的速度。如图 2-43 所示，超声探头产生一束频率在 1~10 MHz 的超声波束。当超声波束遇到运动中的血细胞(称为声靶)时，沿发射方向返回，再被探头所接收。由于在血细胞中红细胞的数量占优势，因此，大部分的反射信号来自红细胞，其次来自白细胞和血小板。

如果探头发射的超声波频率为 f，接收器接收到的超声波频率为 f'，声波在人体组织内的传播速度为 u，便可测定血流速度 v。在进行多普勒超声心动图检查时，应使声束与血流方向尽可能平行。只要测得频移值 $f_D = f' - f$，就可知道血流速度

$$v \approx \frac{u f_D}{2f}$$

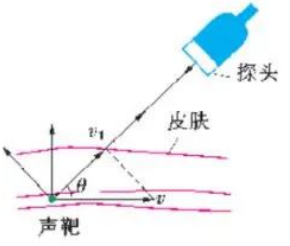


图 2-43

信息阅读

冲击波

图 2-44 中波源速度 v_s 超过波速 v。这时，任一时刻波源本身超过它此前发出的波前。当波源在 A 位置时，发出的波在其后 t 时刻的波面半径为 ut，而此时刻波源已前进了 $v_s t$ 的距离，到达 B 位置。在波源的前方，没有任何波动产生。在时间 t 内，系列波面的包络面形成圆锥面，这个圆锥面叫马赫

径。有时可以看到当船速超过水波的波速，就会在水中激起以船为顶端的V形波。当飞机或炮弹超音速飞行时，就会在空气中激起圆锥形的波，这就是冲击波。

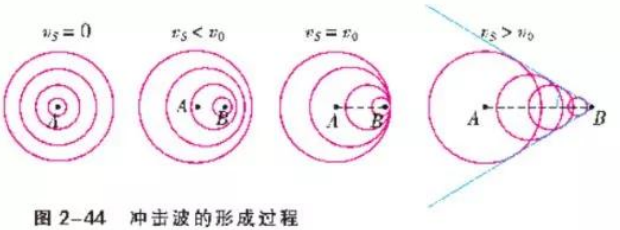


图 2-44　冲击波的形成过程

家庭作业与活动

1. 站在火车轨道旁，一列高速驶来的火车正在鸣笛，然后高速离人而去，则人听到的鸣笛声的频率将
   A. 变大　　B. 变小
   C. 先变大后变小　　D. 先变小后变大
2. 振源所发出的机械波的频率为180 Hz，观察者所接收到的频率也为180 Hz，则下列判断中正确的是
   A. 若振源静止不动，则观察者一定静止不动
   B. 振源和观察者之间的相对距离不变
   C. 振源和观察者之间的相对距离增大
   D. 振源和观察者之间的相对距离减小
3. 有一种用钢丝操纵做圆周飞行的飞机模型，装有两冲程的活塞式发动机作为动力。操纵者站在圆心，在他听来发动机工作时发出的声音是平稳不变的，场边的观察者则听到发动机的声音忽高忽低地做周期变化，这是由于_____，这种现象叫做_____。
4. 如图2-45所示，在公路的十字路口东侧路边，甲以速度v_1向东行走，在路口北侧，乙站在路边，一辆汽车以速度v_2通过路口向东行驶并鸣笛，已知汽车笛声的频率为f_0，车速$v_2 > v_1$，设甲听到的笛声频率为f_1，乙听到的笛声频率为f_2，司机自己听到的笛声频率为f_3，则此三人听到笛声的频率由高至低依次为_____。
5. 以速度20 m/s奔驰的火车，鸣笛频率为275 Hz，已知常温下空气中声速为340 m/s，(1)当火车驶来时，(2)当火车离去时，站在铁道旁的观察者听到的笛声频率分别是多大？

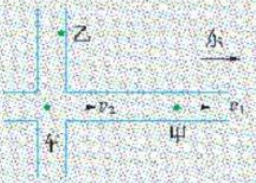


图 2-45

2.x

第 2 章家庭作业与活动

1. 如图2-46是同一机械波在两种介质中传播的波动图像。从图中可以直接观察到发生变化的物理量是
   A. 波速　　B. 频率
   C. 周期　　D. 波长

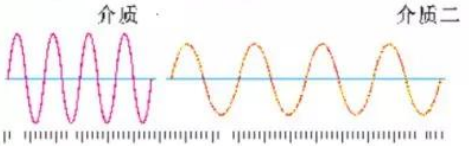


图 2-46

2. 如图2-47所示的是两列波叠加的示意图，这两列波的振动方向、振幅、频率完全相同，M、N、Q为叠加区域的三个点，Q为两个波谷相遇，M为两个波峰相遇，N点为波峰和波谷相遇，则下列说法中正确的是
   A. Q点为振动加强点
   B. N点始终静止不动
   C. 经$\frac{1}{2}T$，质点Q传播到N点

D. M 点为振动加强点，过 $\frac{1}{2}T$，此点振动减弱

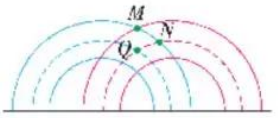


图 2-47

3. 关于波的衍射，下列说法中正确的是
   A. 衍射是一切波的特性
   B. 波长比孔的宽度大得越多，衍射现象越不明显
   C. 发生波的衍射时必须有两个波源
   D. 波的衍射也是由于波的叠加产生的
4. 有一测速雷达，发射的电磁波频率为 f_1，想用它来测量一辆迎面开来的汽车的车速，设该雷达接收到的汽车反射波频率为 f_2，则有
   A. $f_1 > f_2$　　B. $f_1 = f_2$
   C. $f_1 < f_2$　　D. 无法确定
5. 图 2-48 中所示为一简谐横波在某一时刻的波形图。已知此时质点 A 正向上运动，如图中箭头所示。由此可判定此横波
   A. 向右传播，且此时质元 B 正向上运动
   B. 向右传播，且此时质元 C 正向下运动
   C. 向左传播，且此时质元 D 正向上运动
   D. 向左传播，且此时质元 E 正向下运动

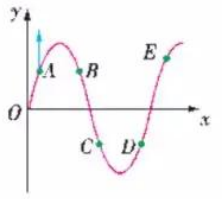


图 2-48

6. 如图 2-49 所示，A、B 是 Ox 轴上的两个质点，有一列简谐波沿 Ox 正方向传播。某一时刻，当 A 点沿竖直向上的方向通过其平衡位置时，B 点刚好沿竖直向下的方向通过其平衡位置，如果这列波的周期为 T，则这列波到 A、B 两点的时间差为

   A. $(2n+1)T$　　B. $\frac{(2n+1)T}{2}$
   C. $\frac{3(2n+1)T}{4}$　　D. $\frac{(2n+1)T}{4}$



图 2-49

7. 关于声波，下列说法中正确的是
   A. 空气中的声波一定是纵波
   B. 声波不仅能在空气中传播，也能在固体、液体和真空中传播
   C. 声音在水中的传播速度大于在空气中的传播速度
   D. 空中有时雷声不绝，这是由声波的干涉引起的
8. 已知空气中的声速为 340 m/s，现有几种声波：①周期为 1/20 s，②频率为 10^4 Hz，③波长为 10m。它们传播时若遇到宽度约为 13 m 的障碍物，能产生显著衍射现象的是
   A. ①和②　　B. ②和③
   C. ①和③　　D. 都可以
9. 当地壳某处发生地震时，地震波由震源向周围传播，既有横波又有纵波，已知横波的传播速度为 7.5 km/s，纵波的传播速度为 14 km/s。当地震发生时，离震源有相当距离处，人们先感到房子上下跳动了几次，隔了10 s，又感觉到房子水平方向摆了几次，则震源距人们所在处的距离约为多少米？（取两位有效数字）



图 3-1　东方明珠电视发射塔



图 3-2　火星表面彩色照片

第 3 章
电磁场与电磁波

当我们看到东方明珠电视塔、卫星接收天线，从电视中欣赏到“神舟”5 号飞船和“勇气”号火星探测器传回的高清晰度图片，以及用手机同远方的亲友通话时，我们都会感到电磁波的神奇！

电磁波是怎样产生的？

电磁波有什么特点？

电磁波是如何接收和传播的呢？

无线电通信的基本原理是什么？

……

本章将引领你进入这一奇妙的领域——“电磁场与电磁波”，领会麦克斯韦电磁场理论的基本思想，探究电磁波产生的条件；分析无线电通信的基本原理，了解电磁波在我们生活中的巨大用途。



图 3-3　微波接收天线

周南物理段石峰

3.1

麦克斯韦的电磁场理论

19世纪，麦克斯韦建立了电磁场理论，实现了物理学第二次伟大综合，为推进人类文明做出了巨大的贡献。

法拉第的贡献

在物理3-2中，我们研究过法拉第电磁感应定律。法拉第创造性地用“力线”和“场”的概念来描述电荷之间、磁体之间以及电与磁之间的相互作用。

“场”的概念是牛顿时代以来在物理学概念方面最重要的变革。爱因斯坦甚至认为：“它的价值要比电磁感应的发现高出许多。”

“场”的概念也使人们对物质概念的认识提升到一个新的高度，即物质的存在有两种形态：一种是分子、原子等实物，另一种是场。

法拉第形象化的“力线”和“场”能不能用精确的、定量的数学语言描述呢？

在法拉第的许多贡献中，最伟大的一个就是力线的概念了，我想借助它就可以把电场和磁场的许多性质以最简单而极富启发性地表示出来。

——约·汤姆生

在一个现代的物理学家看来，电磁场正和他所坐的椅子一样地实在。

——爱因斯坦

电磁场理论的两大支柱

麦克斯韦在库仑、安培、法拉第等对电磁学研究的基础上，提出了“变化的磁场产生电场”，“变化的电场产生磁场”的假说。这是电磁场理论的两大支柱。下面对这两个开创性的假说的由来作一些讨论。

变化的磁场产生电场

如图3-4所示，当磁棒在一闭合线圈上方做上下运动时，由于穿过线圈的磁通量发生变化，线圈中会产生感应电流。

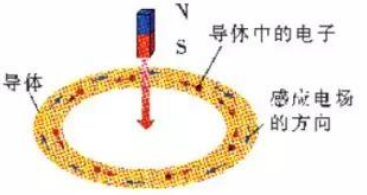


图3-4 变化的磁场使线圈产生感应电流



麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879)，英国物理学家、数学家，经典电磁场理论的奠基人。

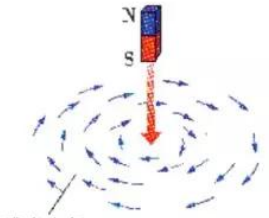


图 3-5　变化的磁场产生感应电场

请思考：

1. 电流是电荷的定向移动。闭合线圈中的电荷做定向移动，是受到什么力的作用？

2. 如图 3-5 所示，如果将闭合线圈拿走，磁棒运动过程中，在线圈的原位置上会存在感应电场吗？

麦克斯韦认为：在图 3-4 所示的实验中，由于变化的磁场产生感应电场，使线圈中产生感应电流。进而他设想，在线圈所在的空间即使没有闭合线圈，也存在感应电场。即空间磁场的变化，就会产生电场。

变化的电场产生磁场

变化的磁场能够产生电场，那么，“变化的电场”是否也会“产生磁场”呢？

我们知道，在如图 3-6 所示的交变电路中，电路闭合时，电路中有交变电流，导线周围存在磁场。那么在这个闭合电路的电容器中有电流吗？它的两极板间存在磁场吗？

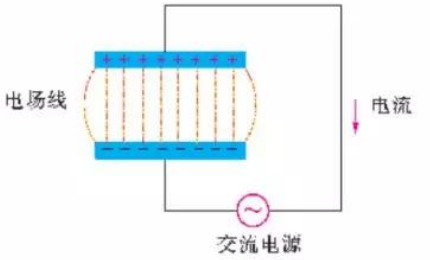


图 3-6　变化的电场产生磁场

位移电流的引入，是电磁场理论的一大突破，其伟大意义足可与法拉第发现电磁感应现象相比拟。

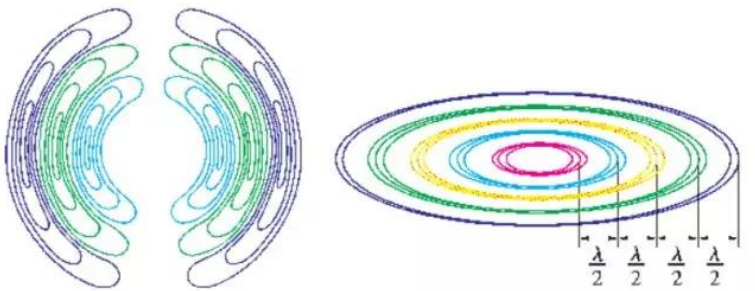
这个电路中有交变电流时，电容器中虽没有电荷通过，但它的两极板上的电荷和极板间的电场都随时间发生变化。麦克斯韦认为，电路中的电流应该是闭合的，所以电容器两极板间变化的电场应该具有电流的特征。于是，他引入一个全新的概念——**位移电流**(displacement current)。奥斯特的实验表明，电荷定向移动形成的电流能在其周围产生磁场。麦克斯韦推断，由变化的电场引入的位移电流也应产生磁场，即变化的电场产生磁场。

电磁场理论——伟大的丰碑

麦克斯韦根据电磁学的实验事实和两个假设，用一组方程描述了他的电磁场理论。电磁场理论大意如下。

变化的磁场能产生电场	变化的电场能产生磁场
磁场的变化是均匀的，产生的电场是稳定的	电场的变化是均匀的，产生的磁场是稳定的
磁场的变化是不均匀的，产生的电场是变化的	电场的变化是不均匀的，产生的磁场是变化的

麦克斯韦认为，变化的磁场和变化的电场相互耦连，形成不可分离的统一的电磁场。变化的电场会在周围的空间产生变化的磁场，这个变化的磁场又会在较远的空间产生变化的电场。电场与磁场相互激发，由近及远地向周围空间传播(图 3-7)，从而在理论上预言了电磁波的存在。



a 电场线　　b 磁场线

图 3-7　麦克斯韦预言的电磁波

麦克斯韦从他的电磁场方程组得到：电场和磁场的方向相互垂直并且都垂直于传播的方向，即电磁波是横波；电磁波在真空中传播的速度恰好等于光速。这一奇妙的结果促使麦克斯韦意识到："两个结果的一致性表明，光和磁乃是同一实体的属性的表现，光是一种按照电磁定律在场内传播的电磁扰动。"

麦克斯韦提出电磁场理论，是 19 世纪的一件大事，是物理学的又一座伟大丰碑。在当时，麦克斯韦被公认为是"自牛顿以后世界上最伟大的数学、物理学家"。

量子论的创立者普朗克(M. K. Planck)盛赞麦克斯韦："他的名字永远镌刻在经典物理学的门扉上，永放光芒。从出生地来说他属于爱丁堡，从个性来说他属于剑桥大学，从功绩来说，他属于全世界。"

课堂作业与活动

1. 麦克斯韦在建立电磁场理论的过程中，提出了什么假设？运用了哪些物理思想？它们对建立电磁场理论有怎样的意义？

2. 按照麦克斯韦的电磁场理论，什么样的磁场才能产生恒定的电场？什么样的电场才能产生变化的磁场？

3.2 电磁波的发现

麦克斯韦的电磁场理论，特别是电磁波的预言，深遂而新颖，以至在它问世后的相当长时间内，没有得到普遍的认问，一些科学家对这一没有通过实验证明的理论表示怀疑。直到 1887 年，德国物理学家赫兹才用实验发现了电磁波。



赫兹(H. R. Hertz，1857—1894)，德国物理学家。用实验证明了电磁波的存在。

电磁波预言的实现——赫兹实验

赫兹设计的实验装置如图 3-8 所示。整个装置由两部分组成：一是发射部分，包括开放的振荡器(装有小铜球的两块金属板、线圈和电源等)；二是接收器，是一个带有两个小铜球的开口金属圆环。

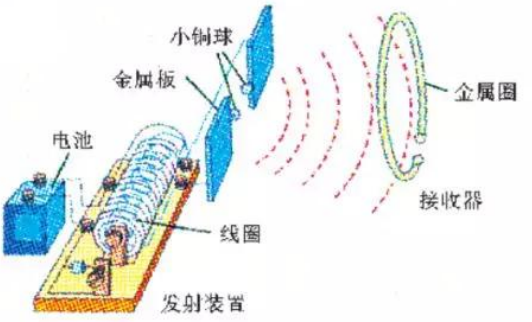


图 3-8　赫兹发现电磁波的实验装置

在振荡器两端加上电压时，小铜球之间的间隙就会断续地产生电火花，它周围的空间就产生了**电磁振荡**(electromagnetic oscillation)，并向远处传播。

赫兹用上述实验发现，当发射装置产生电火花时，调节接收器的方位和小球间的距离，接收器的两小球间也会产生电火花。赫兹的实验说明，电磁振荡能在空间向远处传播。电磁波就这样被发现了。困扰着物理学界 20 多年的难题，被赫兹以卓越的设计思想和高超的实验技巧解决了。

赫兹的贡献在于用实验事实证明了麦克斯韦电磁场理论的正确性，为人类利用电磁波奠定了重要的基础，预示着广泛利用电磁波技术的时代即将到来。

物理学家们花了几十年的时间才理解到麦克斯韦发现的全部意义……只是等到赫兹以实验证实了麦克斯韦电磁波的存在以后，对新理论的抵抗才被打垮。

——爱因斯坦

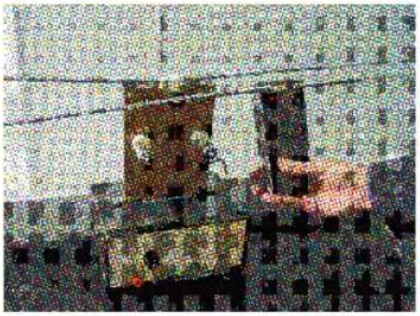


图 3-9 模仿赫兹做实验

实验探究 模仿赫兹做实验

实验器材如图 3-9 所示。当电磁波发射器发出电磁波时，移动接收器，改变它与发射器间的距离和方位，使接收器上的指示灯发光。

1. 接收器上的指示灯为什么会发光？

2. 接收器与发射器之间的距离和方位变化时，指示灯发光情况怎样？

由赫兹实验和上述实验可知，要产生电磁波，首要条件是产生电磁振荡。那么怎样才能产生电磁振荡呢？

电磁振荡

实验探究 观察电磁振荡

把自感线圈、可变电容器、示波器、电池组和单刀双掷开关按照图 3-10 连成电路。先把电键 S 扳到电池组一边，给电容器充电，稍后再把电键扳到线圈一边，让电容器通过线圈放电。在放电过程中，电路中的电压、电流怎样变化？我们可用示波器观察电路中电压、电流随时间变化的规律。

1. 调节示波器，在显示屏上看到什么图像？是电流的图像还是线圈两端电压的图像？

2. 调节电容器电容的大小，显示屏上的图像将如何变化？

此电路中存在能量损耗，实际电路还有一个补偿电路，用来补充能量。

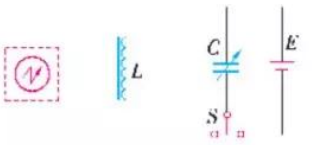


图 3-10　振荡电路

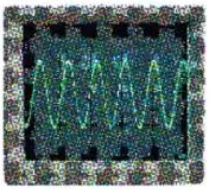


图 3-11　示波器显示的波形图

由上面的实验可以发现，示波器上呈现了周期性变化的电压图像（图 3-11）。这表明电路中存在周期性变化的**振荡电流**（oscillatory current）。能够产生振荡电流的电路，叫做振荡电路。在振荡电路中，除了电路中的电流发生周期性变化，电容器极板上的电荷、电容器里的电场强度和线圈中的磁感应强度都要发生周期性变化，这种现象叫做电磁振荡。

图 3-10 是由自感线圈和电容器组成的电路，这是一种基本的振荡电路，叫做 LC 振荡电路。理论与实验研究表明，振荡电流的周期只跟电容和电感有关，而跟其他因素无关。LC 振荡电路的**固有周期**（natural period）为

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

与之对应的**固有频率**（natural frequency）为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中的 T、L、C、f 的单位分别是秒（s）、亨利（H）、法拉（F）、赫兹（Hz）。

多学一点　分析电磁振荡过程

为讨论方便，可将上面的振荡电路简化为图 3-12 所示的电路。

先接通电源，给电容器充电；稍后，将电容器与线圈接通，这样，图 3-13 所示的电路中就会产生电磁振荡。下面结合图 3-14，把电磁振荡过程中能量的转化过程同单摆摆球的能量转化过程作类比分析。

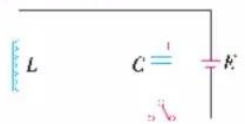


图 3-12　给电容器充电

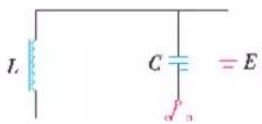


图 3-13　电容器放电

开始时，电容器内的场强最大时，电路中没有电流（图 a）；此时电场能最大，磁场能为零；此后电容器放电，电容器中电场能减少，线圈中磁场能增大。

当电容器内场强为零时，电路中电流最大；此时电场能为零，线圈中磁场能最大（图 b）。电场能全部转化为磁场能。

请自己分析图 3-14c、d 电容器充放电过程中，磁场能与电场能相互转化的过程。电磁振荡过程就是这样一个电场与磁场周期性相互转化的循环过程。

再请将电磁振荡过程中，电场能与磁场能的相互转化情况，跟单摆振动过程中，动能与势能的相互转化情况进行比较，并作出说明。

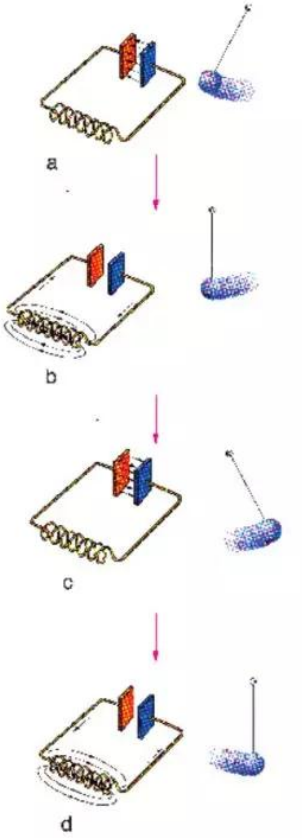


图 3-14 电磁振荡的过程示意图

电磁波的发射

在振荡电路中，电磁能量主要集中在电路中，辐射出去的较少，不能用来有效地发射电磁波。

请思考，怎样才能有效地发射电磁波呢？

如果把振荡电路中电容器的两极板拉开，并变成两条长的直导线，一条伸入空中成为天线，另一条接入地下成为地线，就可以有效地向外辐射电磁能量（图 3-15）。这种电路叫做**开放电路**（open circuit）。

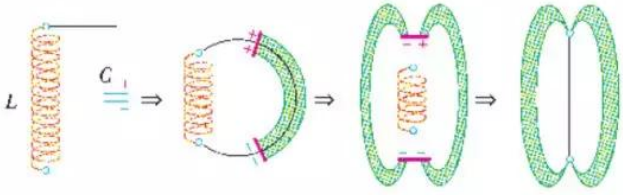


图 3-15 由闭合电路变成开放电路

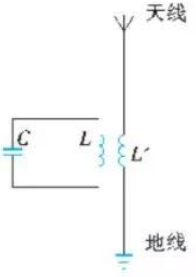


图 3-16　开放电路示意图

实际应用的开放电路如图 3-16 所示。自感系数不大的线圈 L' 与产生高频电磁振荡的电路相耦合，产生同频率的电磁振荡，通过天线向四周发射电磁波。

理论与实验表明，要增大电磁波传播的距离，可以从以下两个方面进行改善：

第一，将发射天线架设得足够高。

第二，提高振荡频率。理论研究表明，振荡电路向外界辐射能量的本领，即单位时间内辐射出去的能量，跟频率的四次方成正比。频率越高，电磁波辐射的能量也就越多。

图 3-17 描述的是发射天线在振荡过程中所产生的变化的电场（变化的磁场未画出）。

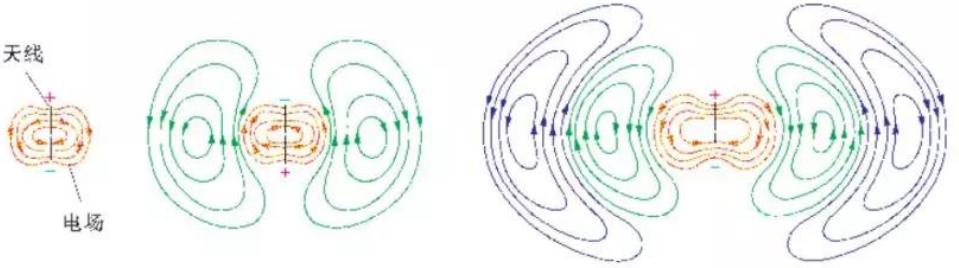


图 3-17　天线周围电场随时间的变化

电磁波的特点

根据麦克斯韦电磁场理论，电磁波是横波。电磁波的电场 E 和磁场 B 相互垂直，电磁波的传播方向跟 E 和 B 均垂直，如图 3-18 所示。

在我们知道的各种波中，有哪些波跟电磁波相似，也是横波？

电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度 c，约为 $3.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$。

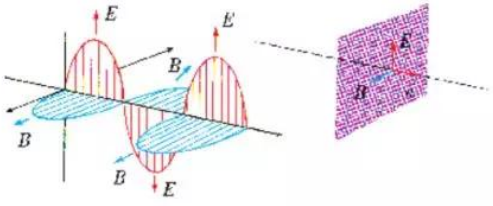


图 3-18　电场方向、磁场方向和电磁波传播方向三者相互垂直

电磁波具有波的一般特征，也有波长(λ)和频率(f)，波长、频率和波速之间的关系为

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

中央人民广播电台第一套节目的频率是 639 kHz，请计算其波长。试试在此波长的位置上用收音机是否能收听到中央一套的节目。

电磁波和其他波一样，也具有能量。电磁波的发射过程就是辐射能量的过程。

请讨论电磁波与机械波相比，有哪些相同点和不同点？电磁波的传播需要介质吗？请举例说明。

本节作业与活动

1. 今天，人人都可以做发现电磁波的实验，但在19世纪，证明电磁波存在的问题却困惑了科学界几十年。请你谈一谈赫兹实验的意义。
2. 电磁波的频率与什么因素有关？电磁波的辐射需要什么条件？
*3. 在 LC 振荡电路中，电容器上的电压从零变化到最大值所需要的时间是

A. $\frac{\pi}{4}\sqrt{LC}$　　B. $\frac{\pi}{2}\sqrt{LC}$

C. $\pi\sqrt{LC}$　　D. $2\pi\sqrt{LC}$

*4. 在图 3-10 中，当电键 S 从右端扳到左端时，请描绘上极板所带电荷 Q 随时间变化的图像。
5. 比较机械波和电磁波，下列结论中正确的是

A. 它们都可发生反射、折射、干涉和衍射现象

B. 它们在本质上是相同的，只是频率不同而已

C. 机械波传播的速度由介质决定，电磁波的传播速度由频率决定

D. 机械波的传播需要介质，电磁波可以在真空中传播

3.3 无线电通信

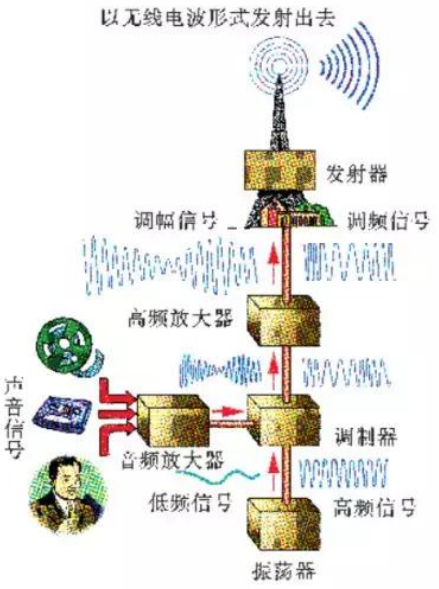


图 3-19　无线电广播信号发射示意图

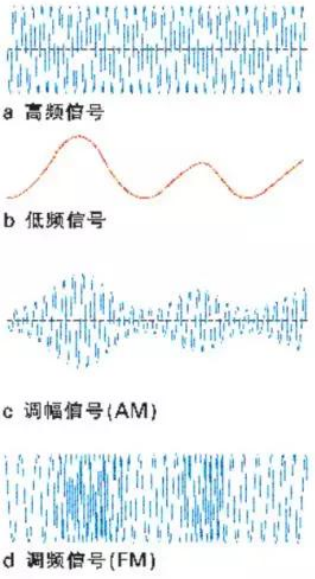


图 3-20　调制信号

无线电通信是电磁场理论的重要应用。无线电波是怎样发射、传播和接收的？

无线电波的发射

无线电广播传递的是声音信号。无线电广播是先将声音信号转变成电信号，再将此电信号加载到等幅的高频信号上，并进行放大，再通过发射塔发射出去。无线电广播的发射整个过程如图 3-19 所示。

振荡器的作用

振荡器的作用是产生等幅高频信号。低频音频信号只有加载到高频信号上去，形成随音频信号而改变的高频信号，才能通过发射天线发射出去。

为什么不用低频信号直接发射呢？

调制器的作用

调制器的作用就是把低频信号加载到高频信号上去。

常用的调制方式有调幅 (amplitude modulation，AM) 和调频 (frequency modulation，FM) 两种 (图 3-20)。调幅是使高频振荡信号的振幅随低频信号变化；调频就是使高频振荡信号的频率随低频信号变化。

调制后的高频信号经过放大后，送到发射天线，再向外发射。

请调查你家乡调频和调幅广播电台的频率和波长。

无线电波的传播

无线电波传播的方式与其自身的波长或频率有关。如下表所示，波长(频率)不同的电磁波，其传播的方式是不同的。

无线电波段及传播方式

波段	波长	频率	传播方式	主要用途
长波	30000~3000 m	10 kHz~100 kHz	地波	超远程无线电通信、导航
中波	3000~50 m	100 kHz~1500 kHz	地波和天波	调幅无线电广播、通信
短波	50~10 m	1500 kHz~30 MHz	天波	
微波	10~1 m	30 MHz~300000 MHz	直线传播	调频无线电广播、电视、雷达、导航

请思考，为什么在方圆数十千米范围内就有一座移动通信的发射塔？卫星转发器能够传递所有的无线电波吗？为什么我们不能收听到外省的调频广播？

中、长波的波长较长，能绕过地球表面上的一般障碍物，因此能够沿着地球的表面进行传播，这种传播方式叫做地波传播。由于地球是球形的，所以沿地球表面传播的无线电波能够发生绕射，从而传播的距离较远。我国收音机调幅波段就是采用地波传播方式进行传播的。

短波和部分中波的波长较短，难以绕过地球表面上的一般障碍物，但能够在地面与电离层之间来回反射进行传播，这种传播方式叫做天波传播。由于电离层的物理状态随经度、纬度呈现复杂的空间变化，并与太阳活动有关，所以，以天波方式传播的无线电波容易受到干扰。

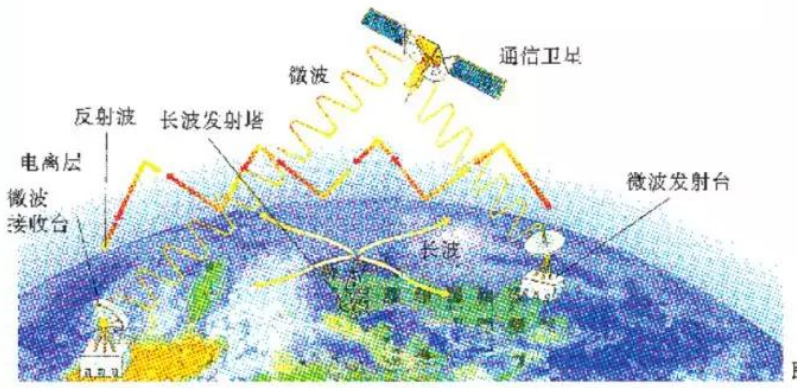


图 3-21 无线电波传播方式

微波的波长更短，能够穿透电离层，因此只能从发射天线直接传播到接收天线，这种传播方式叫做直线传播。用微波进行远距离传送时，就必须建立中继站。微波从微波发射台发射出去后，经过中继站的接收、放大、发射，再传向下一站，这样一站传一站，把微波传向微波接收台。

无线电波的接收

在空间传播的电磁波如果遇到接收天线——导体，就会在接收天线上产生微弱的感应电流，这个感应电流的频率跟接收的电磁波的频率相同。但是空间有多种频率的电磁波在传播，它们都会在接收天线上产生各自的感应电流。要从众多的电磁波中得到我们所需要的信号，就需要经过调谐、高频放大、检波、音频放大的过程(图 3-22)。

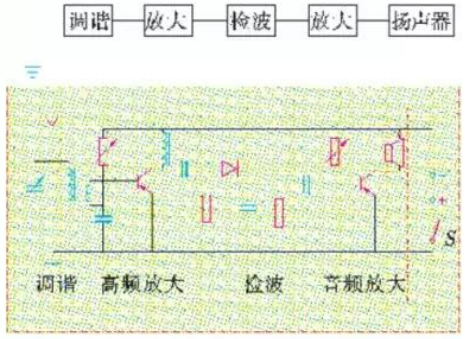


图 3-22　无线电广播的接收示意图

调谐

从诸多的电磁波中挑选出某一频率电磁波的过程，叫做调谐。调谐就是把图 3-23 所示电路的固有频率调节到我们所需要的某一电磁波的频率，使这一频率的电磁波与此电路产生电“共振”——电谐振，从而在电路中激起较强的感应电流。

根据 LC 振荡电路固有频率的公式，我们既可以调节可变电容器 C 的电容，也可以调节电感 L 的电感。

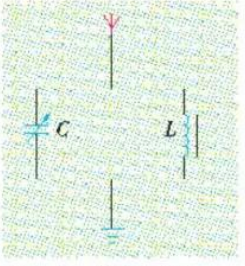


图 3-23　调谐电路

调谐后所获得的高频振荡电流还需要放大，从而得到强度较大的高频振荡电流。

检波

高频振荡电流并不能直接使扬声器振动发出声音，还需要从中滤除高频信号，“检”出所承载的低频信号，这一过程叫做检波。

检波是调制的逆过程，也叫做解调。其过程如图 3-24 所示。

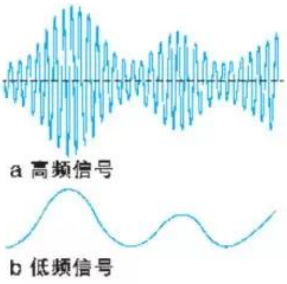


图 3-24 从高频信号中"检"出低频信号

实验探究 用示波器观察检波的作用

1. 将高频调幅信号源的"高频输出"端接到示波器的输入端。打开示波器的电源，调节示波器的扫描微调，可观察到调幅信号的波形。

2. 在信号源的输出端和示波器"Y 输入"端之间，串联一只晶体二极管(检波器)，并在信号源的输出端和示波器的接地端之间连接一个电容器，如图 3-25 所示，就可看到经检波后的低频信号的波形。

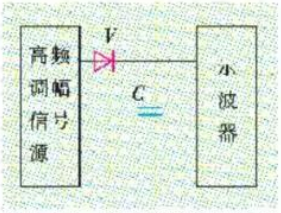


图 3-25 观察检波过程的电路

检波后的信号经过放大处理后，传送到扬声器，便可使其发出声音。

请同学们利用课余时间参观广播电台、移动通信基站、电视台，了解它们的工作过程。

无线电波在我们生活中

今天我们已进入信息时代，微波通信、卫星通信和光纤通信为人类交流信息发挥着巨大的作用。微波通信以其承载的信息量大而得到广泛运用。微波能够畅通无阻地穿越地球上空的电离层，从而可以实现以卫星为中转站的卫星通信。随着激光器和光纤的发明，人类用激光作为信息载体，以光纤为光的通道，又实现了光纤通信。光纤通信因其传播过程中能量损耗小，抗干扰能力强而得到广泛应用。

移动通信塔(图 3-26)可以用来传送电话、传真和数据信息。塔顶的碟状物体是微波天线，指向远处的其他移动通信塔，从而实现信息快速传递。

请思考，在两座移动通信塔的碟状物之间能否有障碍物？

人造卫星的出现引发了信息传播和信息收集等领域的革命。卫星既可以进行地球上两地之间的信息传递，又能用于收集气象信息、检测大气环境、勘探矿藏和发射导航信号等。

因特网就是利用光纤来交互信息。你可以在网络上查询你所需要的资料，发送电子邮件，实现信息资源共享，还可以进行网上



图 3-26　移动通信塔

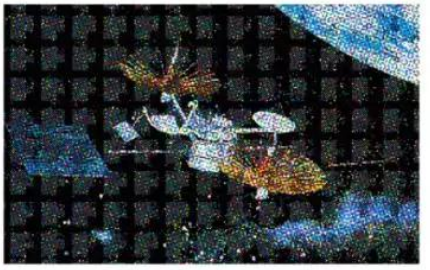


图 3-27　通信卫星

购物、网上学习等。

现代通信技术正在改变着人与人之间的交往方式、生活方式、工作方式和学习方式。“地球村”已经实现，“宇宙村”还会遥远吗？

请同学们调查自己所在地区的微波通信、卫星通信和光纤通信发展的情况。

课程作业与活动

1. 观察身边的收音机，计算一下调幅广播和调频广播的波长范围。
2. 收音机能同时收听到两个电台的广播吗？为什么？
3. 收音机中的调谐电路线圈的自感系数为 L，要想接收频率为 f 的电台信号，应把调谐电路中电容器的电容调至（光速为 c）

A. $\dfrac{\lambda}{2\pi Lc}$　　B. $\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}\ \lambda}$

C. $\dfrac{\lambda^2}{2\pi Lc^2}$　　D. $\dfrac{\lambda^2}{4\pi^2 Lc^2}$

4. 无线电波的发射和接收主要经历哪些过程？无线电波传播的方式跟什么因素有关？有哪些传播方式？

3.4

电磁波家族

电磁波是一个大家族，无线电波只是这个大家族中的一员。本节我们首先对人类发现的各种电磁波按波长或频率排列，从整体上认识电磁波谱，再了解电磁波谱中各波段的应用。

电磁波谱

赫兹发现电磁波后，人们通过许多实验，证明光也是一种电磁波。而且还发现了更多形式的电磁波，例如X射线、γ射线、红外线、紫外线等。这些电磁波在本质上完全相同，只是波长或频率不同而已。其中波长最长的波跟波长最短的波之间频率相差近10^{20}倍。把各种电磁波按波长或频率的大小顺序排列起来，就组成了**电磁波谱**(electromagnetic spectrum)，如图3-28所示。

请根据图3-28，谈一谈各段电磁波还有哪些应用。

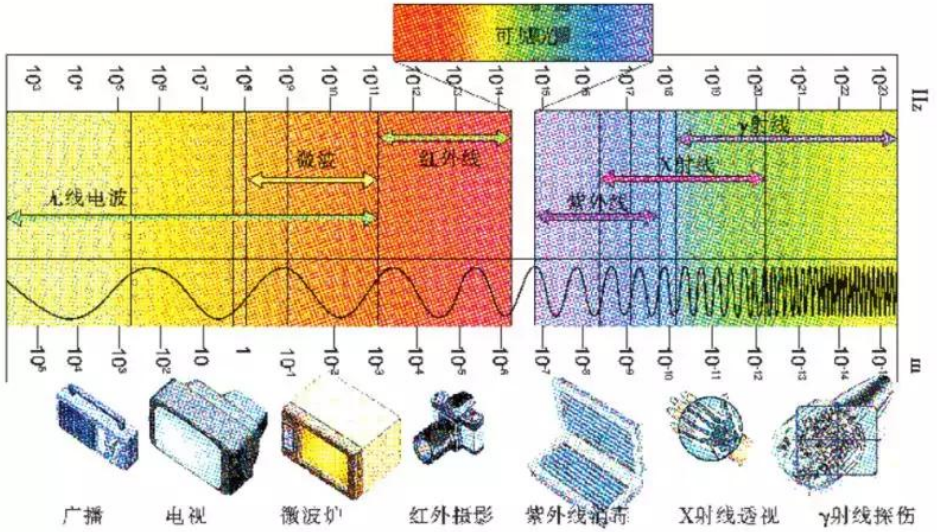


图3-28 电磁波谱及各部分电磁波的主要应用

电磁波家族成员的特性

通常人们按用途将电磁波谱划分为无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线六个波段。

可见光

进入人眼能引起视觉的电磁波叫做可见光。它只占据电磁波中一个很狭窄的波段。可见光是由原子或分子内电子的跃迁产生的。

如果没有可见光，地球上的生命就难以存在，世界就不会丰富多彩。

左表给出了各种颜色的可见光在真空中的波长和频率。

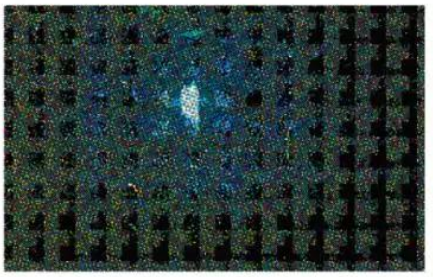
各种可见光在真空中的波长和频率

色光	波长 λ/nm	频率 ν/×10^{14} Hz
红	720~620	3.90~4.80
橙	620~600	4.80~5.00
黄	600~580	5.00~5.20
绿	580~490	5.20~6.10
蓝-靛	490~450	6.10~6.70
紫	450~390	6.70~7.70

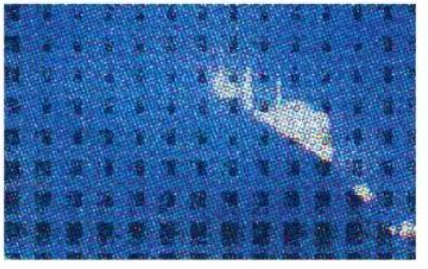
红外线

红外线的频率比可见光的红色光低。它是英国物理学家赫歇耳(F. W. Herschel)于 1800 年发现的。红外线虽然看不见，但人类可以感受到它的热效应。太阳辐射的电磁波中，有较多的红外线。

红外线是由构成物体的分子热运动所产生的。因此，所有物体都会辐射红外线。高温物体辐射红外线的本领比低温物体强，低温物体可以通过吸收红外线来提高自身温度。工业上常用红外线来干燥物体。红外线的波长较长，衍射现象明显，容易透过云雾、烟尘，因此被广泛应用于红外遥感和红外高空摄影。图 3-29a 为可见光拍摄火箭升空的照片，只能看到火焰。图 3-29b 为红外热像仪拍摄火箭升空的照片，可以看到火箭的全貌。

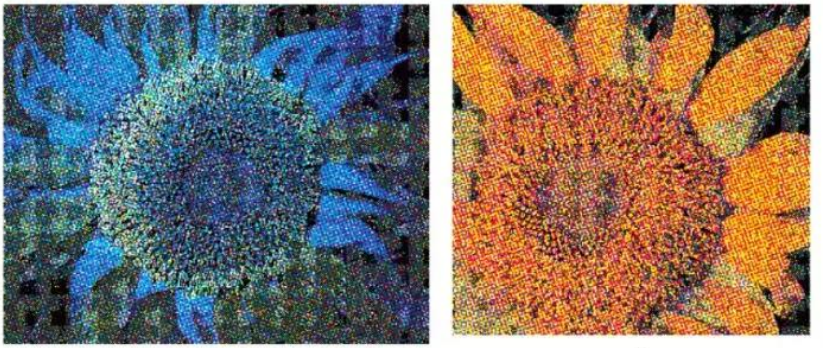


a 可见光拍摄火箭升空照片



b 红外热像仪拍摄火箭升空照片

图 3-29 火箭升空照片



a b

图 3-30 蜜蜂和人看到的葵花

紫外线

紫外线的频率高于紫色光，属于不可见光。紫外线由德国物理学家里特(J. W. Ritter)于 1801 年发现。

紫外线能够杀死活细胞，在医院病房常用紫外线灯杀菌。虽然人类不能看到紫外线，但是有些昆虫却能够看到紫外线。图 3-30a 是蜜蜂看到的葵花，3-30b 是人类看到的黄色葵花。

紫外线还具有较强的荧光效应，能使很多物质发出荧光。我们常用的日光灯和农业上消灭害虫的黑光灯，都是用紫外线来激发荧光物质发光的。

X 射线

X 射线是比紫外线频率更高的电磁波，又叫伦琴射线。它是德国物理学家伦琴(W. K. Röntgen)于 1895 年发现的。当时他发现，阴极射线的高速电子流射到电子管壁上，会使管壁发出一种看不见的射线。这种射线具有很强的穿透本领，能使荧光物质发出荧光，还能使照相底片感光。后来人们发现高速电子流射到任何固体上都能产生这种射线。X 射线穿透物质的本领，跟被穿透物质的密度有关。这种特性在工业上可以用来检查部件的裂纹和气孔，在医学上则可以用来透视人体和检查体内的病灶(图 3-31)。

图 3-32 是利用不同波长的电磁波对人手进行照射所得到的图像。你知道它们各是用哪一波段的电磁波照射的吗？

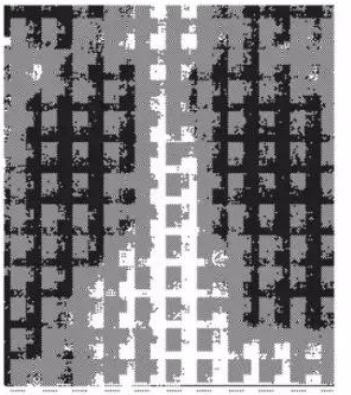


图 3-31 用 X 射线进行医疗诊断

γ 射线

γ射线是比 X 射线波长更短的电磁波，它是从放射性元素的原子核中放射出来的。γ射线的电离作用很小，穿透本领特别

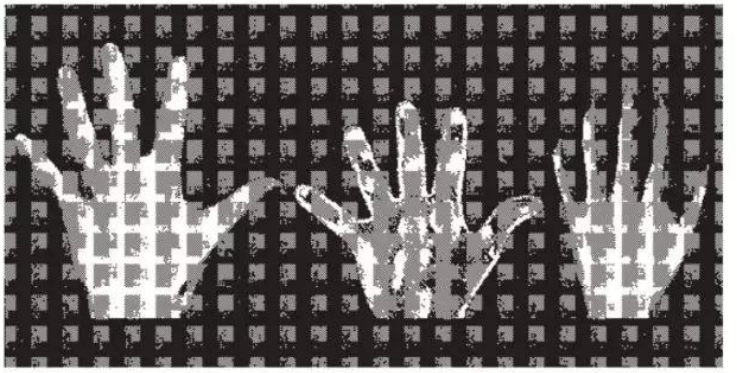


图 3-32　各种射线照射下手的图像

强，能穿过几厘米厚的铅板和穿过 3m 厚的混凝土。

你周围的环境中，哪些设备是借助于电磁波进行工作的？

信息浏览

电磁辐射的危害与防护

电磁波给人类带来福祉的同时，也给人类的生存环境带来危害。电磁辐射能够引起人体的疾病，叫做“无线电波病”；电磁辐射引起的环境污染，叫做“电磁污染”。

电磁辐射对人体的危害可以是急性的，也可以是慢性的。它可以引起人体的心血管系统、神经系统和造血系统的功能紊乱，造成人体免疫力下降。人长时间处于电磁辐射作用下，容易引起头晕、失眠、嗜睡等神经功能的紊乱症状，也有可能使人体白血球下降、视力模糊、心电图不正常等症。特别是在强电磁辐射作用下，会导致人体多种器官的损坏。

避免或减小电磁辐射危害的方法主要有：

(1) 正确摆放和使用家用电器

家用电器摆放要合理，不要过于集中放置，尽可能在卧室内少放置电器。正确使用家用电器，家用电器的电磁辐射量一定要在国家标准规定的范围内，电器使用的时间不宜过长，且尽可能避免多台电器同时使用，使用时人体与电器之间要保持适当的距离。

(2) 电磁屏蔽

屏蔽主要是利用导电性能和导磁性能良好的金属板和金属网，通过反射和吸收来阻隔电磁波的传播。例如长期在强电磁辐射环境下工作的人，应穿具备电磁屏蔽功能的衣服。

(3) 注意饮食，多吃些富含维生素 B 或螺旋藻的食物。

家庭作业与活动

1. 太阳发射出的紫外线对人体有害，幸运的是地球被臭氧层所包围，它能够减弱紫外线照射。但是，最近科学家们发现，臭氧层在变薄，并且有的地方出现了臭氧层空洞。我们应该怎么办呢？
2. 按频率由低到高的顺序排列，以下排列中正确的是

A. γ 射线→X 射线→紫外线→红外线→可见光

B. 紫外线→可见光→红外线→γ 射线→X 射线

C. 红外线→可见光→紫外线→X 射线→γ 射线

D. γ 射线→X 射线→紫外线→可见光→红外线

3.x

第3章家庭作业与活动

1. 麦克斯韦电磁场理论的基本思想是什么？
2. 从地球向月球发射电磁波，经过多长时间才能在地球上接收到反射回来的电磁波？地球到月球的距离为 $3.84\times10^5\,\mathrm{km}$。
3. 为什么赫兹实验中需要把接收器的两金属球调节到合适的距离，才有明显的接收效果？
4. 一个雷达观察站发射出去和反射回来的脉冲在屏幕上每隔 8cm 表示 $10^{-3}\,\mathrm{s}$ 的时间差。如果屏幕上在发出去的信号后面 4.2cm 出现反射回来的信号，那么观察的目标有多远？
5. 由自感系数为 L 的线圈和可变电容器 C 构成的 LC 回路，为使振荡频率在 $f_1=550\,\mathrm{kHz}$ 至 $f_2=1650\,\mathrm{kHz}$ 赫兹范围内可调，则可变电容器与 f_1 对应的电容 C_1 和与 f_2 对应的电容 C_2 之比为

   A. $1:\sqrt{3}$　　B. $\sqrt{3}:1$

   C. $9:1$　　D. $1:9$
6. 什么是电磁场？什么是电磁波？电磁场和电磁波之间的区别和联系是什么？

课题研究

电磁波谱中的各个波段对人类都有重要意义。请收集有关资料，写一篇关于科学技术与社会发展的述评。

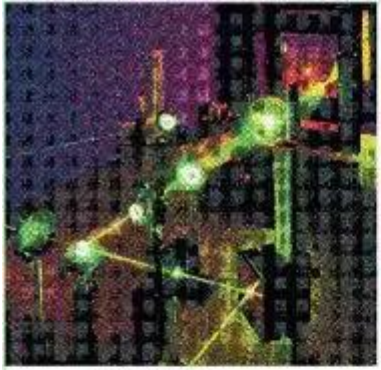


图 4-1　光学实验



图 4-2　绚丽的舞台灯光

第 4 章
光的波动性

“赤橙黄绿青蓝紫，谁持彩练当空舞？”我们生活在一个五光十色的世界中。

光是什么呢？

这个问题很早就引起了人们的注意。科学家通过大量的实验探索和理论分析，对光现象的规律和光的本性进行了深而不舍的研究。现在我们知道，光是一种电磁波。那么，你能不能解释：

肥皂膜上为什么会出现彩色花纹？

甲虫的外壳为什么会变换色彩？

孔雀羽毛为什么显得色彩斑斓？

白光通过三棱镜为什么会产生色散？

为什么用激光可以对人体器官进行检查或做手术？

……

本章将在波的背景下，通过实验，探究光的干涉、衍射、偏振、折射和全反射现象，并用惠更斯原理分析和讨论这些光现象的规律。最后了解激光的特性，以及它在生产、生活等方面的应用。

古希腊学者毕达哥拉斯(Pythagoras)认为，光是以极小微粒的形式从一个物体伸到人眼中的。柏拉图(Platon)却认为，光是从眼睛发出的流体。古希腊人根据物体的影子，得知光是沿直线传播的。

4.1
光的干涉

在 17 世纪，牛顿(I. Newton)支持光的微粒说，认为光是从光源发出的一种物质微粒，在均匀的介质中沿直线传播。而当时惠更斯则认为光是一种波。光的微粒说在大约 100 年中占据了主导

地位。直到19世纪，托马斯·杨和菲涅耳(A. J. Fresnel)等人在实验室里观察到无法用微粒说来解释的干涉、衍射现象，光的波动说才得到普遍承认和迅速发展。

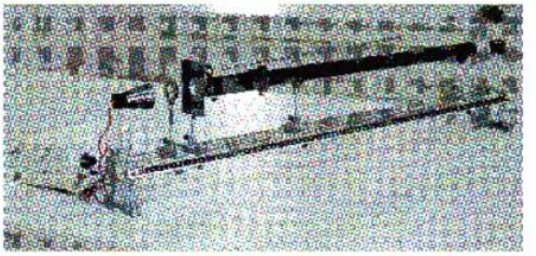


图4-3 双缝干涉实验装置

杨氏双缝干涉实验

1801年，托马斯·杨做了著名的光的双缝干涉实验。现在用类似的方法来研究光的干涉现象。

实验探究 研究光的干涉现象

实验装置如图4-3所示，用单色光照射双缝干涉仪上的双缝 S_1 和 S_2，通过测微目镜可观察两束光在屏上形成的一系列明暗相间的条纹(图4-4)。

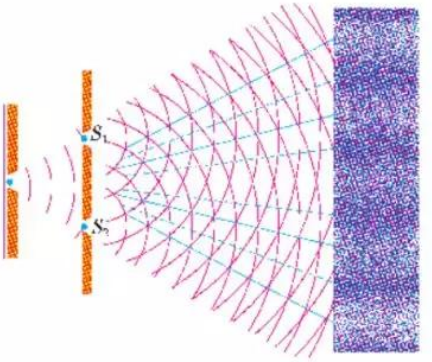


图4-4 光的双缝干涉条纹的示意图

分析论证

为什么会在光屏上出现这一系列明暗相间的条纹呢？

你能用波的叠加原理解释这一现象吗？

在图4-5中，P_0 到 S_1 和 S_2 的距离相同，因此，由 S_1 和 S_2 发出的两列光波的波峰(或波谷)同时到达 P_0 点，在 P_0 点总是波峰跟波峰叠加，波谷跟波谷叠加(图4-6a)。P_0 点的光得到加强，出现一条亮条纹。这种情况叫做相长干涉。



托马斯·杨(T. Young，1773—1829)，英国物理学家，最先用波动学说成功地解释了白光照射下薄膜颜色的由来，并用双缝显示了光的干涉现象。

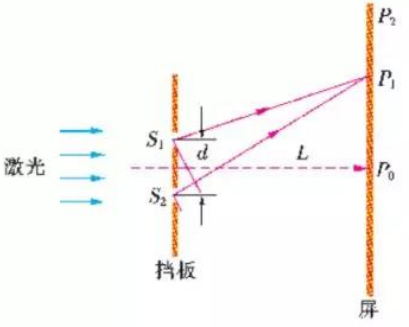


图4-5 双缝干涉原理分析

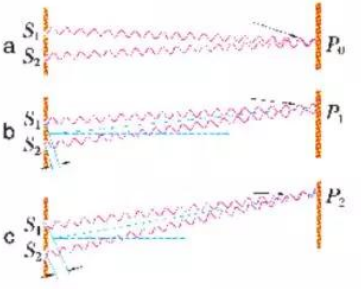


图4-6 两列光波的叠加

在真空或空气中，一列光波所传播的路程叫做光程；两列光波传播的路程之差叫做这两列光波的光程差。

在 P_0 点上方的另一点 P_1，两列光波到达 P_1 点的路程不相等，但路程差（光程差）s 正好是半个波长（图 4-6b）。这时两列光波叠加的结果是互相削弱，于是这里出现暗条纹。这种情况叫做相消干涉。

请思考与讨论：

（1）假如两列光波到达 P_2（图 4-6c）的光程差正好等于波长的整数倍时，这里会出现什么条纹？

（2）怎样确定观察屏上亮条纹或暗条纹的位置呢？

如果从双缝到屏的距离为 L，双缝之间的距离为 d，取 P_0 点为坐标原点，屏上任一点 P 的坐标为 x。研究表明：

满足 $x=\pm k\dfrac{L}{d}\lambda$ 的地方出现亮条纹。$k=0$ 时，$x=0$，为中央亮纹；$k=1,2,3,\cdots$，分别为中央亮纹两边的第 1 条、第 2 条……亮纹。

满足 $x=\pm(2k-1)\dfrac{L}{d}\dfrac{\lambda}{2}$ 的地方出现暗条纹。$k=1,2,3,\cdots$ 时，分别为中央亮纹两边的第 1 条、第 2 条……暗纹。

在相同实验条件下（两缝间的距离 d 以及双缝到屏的距离 L 一定），用不同颜色的单色光或白光做双缝干涉实验，可得到图 4-7 所示的实验结果。

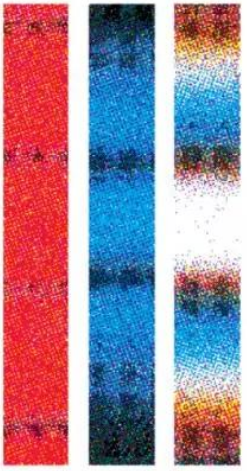


图 4-7　红光、蓝光和白光的干涉条纹

请仔细观察这个实验结果，思考并回答下列问题：

红光和蓝光的干涉条纹间距是否相同？哪个的间距大？这说明波长与间距有什么关系？

用白光做实验时，中央亮纹是什么颜色？为什么？

多学一点　双缝干涉条纹亮、暗条件

在图 4-5 中，设双缝到屏的距离为 L，双缝间的距离为 d，取 P_0 点为坐标原点，屏上任一点 P 的坐标为 x。从狭缝 S_1 到 P 的距离 $S_1P=L_1$，从 S_2 到 P 的距离 $S_2P=L_2$。由勾股定理可得

$$L_1^2=L^2+\left(x-\frac{d}{2}\right)^2 \tag{1}$$

$$L_2^2=L^2+\left(x+\frac{d}{2}\right)^2 \tag{2}$$

(2)式和(1)式相减，得

$(L_2-L_1)(L_2+L_1)=2dx$

L_2-L_1 即两列光波的光程差 ΔL。由于 d 很小，可以作近似处理，$L_1\approx L_2\approx L$，因此 $L_1+L_2\approx 2L$，上式成为

$L\Delta L\approx dx$，即 $\Delta L\approx dx/L$，则干涉条纹的坐标为

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

当 $\Delta L=k\lambda(k=0,1,2,3,4,\cdots)$ 时，屏上满足 $x=\pm k\frac{L}{d}\lambda$ 的地方出现亮条纹。

当 $\Delta L=(2k-1)\frac{\lambda}{2}(k=1,2,3,4,\cdots)$ 时，屏上满足 $x=\pm(2k-1)\frac{L}{d}\frac{\lambda}{2}$ 的地方出现暗条纹。

相邻两条亮条纹(暗条纹)之间的距离 $\Delta x=\frac{L}{d}\lambda$。由此可见，相邻两条亮纹(或暗纹)的间距相等。

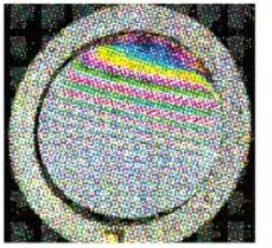


图 4-8 肥皂膜的彩色条纹

奇妙而有用的薄膜干涉

将肥皂膜附着在竖直的铁丝圆环上，在阳光下会看到美丽的彩色条纹(图 4-8)。

请仔细观察：肥皂膜上的干涉条纹有什么特征？你能用光的干涉解释彩色条纹产生的原因吗？

在重力的作用下，肥皂薄膜下方厚一些，上方薄一些。

实验探究 研究肥皂膜上的干涉条纹

为了探究肥皂膜上彩色条纹产生的原因，我们先研究单色光的情况。

如果在酒精中溶解一些氯化钠，酒精灯焰会发出黄光。在铁丝圈上附着一层肥皂膜，放在酒精灯旁，膜上就会出现灯焰的像(图 4-9)，像上出现了亮暗相间的条纹。



图 4-9 灯焰的像有明暗相间的条纹

肥皂膜上明暗相间的条纹，是肥皂膜前后两个面反射光干涉的结果。

请根据光的干涉规律，参考图 4-10，分析肥皂膜前后两个面反射光之间满足什么条件，会出现亮条纹？满足什么条件会出现暗条纹？



图 4-10 液膜前后两面反射光的干涉

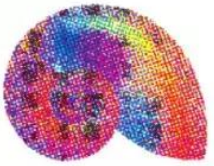


图 4–11　贝壳呈现的彩色

如果用白光照射肥皂膜，为什么会出现彩色条纹？肥皂泡和水面油膜上常常看到的彩色花纹，贝壳呈现的彩色是否与光的干涉有关（图 4–11）。

你还能举出一些生活中光的干涉的事例吗？

测定光的波长

利用双缝干涉条纹间距公式，可以测定单色光的波长。

实验探究　用双缝干涉仪测定光的波长

双缝干涉仪如图 4–12 所示。请仔细阅读《双缝干涉仪使用说明书》（摘要），根据以下步骤完成单色光波长的测定。

1. 把遮光筒水平放在光具座上，筒的一端装有双缝，另一端装有毛玻璃屏。取下双缝，打开光源，调节光源的高度和方向，使光源发出的光能够沿着遮光筒的轴线把屏照亮。然后放好单缝和双缝，单缝和双缝间的距离约为 5~10 cm，使缝相互平行，中心大致位于遮光筒的轴线上（这个调整过程称为调节共轴）。

2. 在狭缝和光源间放上滤光片；利用测微目镜测定相邻两条亮（暗）纹间的距离 Δx；用米尺测出双缝到屏的距离 L。

3. 根据 Δx、L 和 d 测出被测光的波长 λ。

请思考：实验中条纹之间的距离 Δx 很小，应该采用什么方法测量？

换用不同颜色的滤光片进行实验，干涉条纹间的距离有什么变化？请测出相应色光的波长。

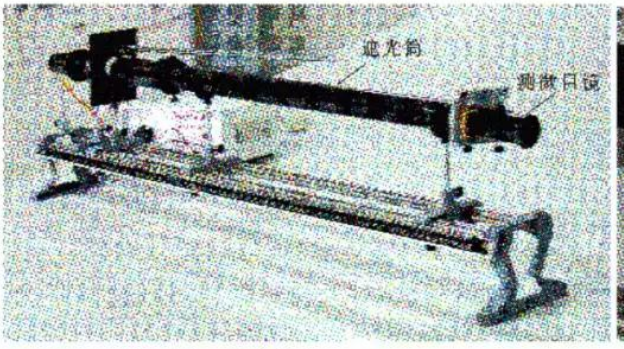


图 4–12　双缝干涉仪测定光的波长

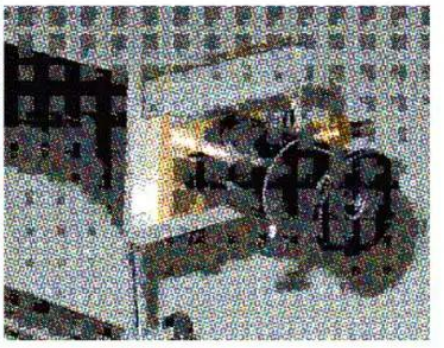


图 4–13　测微目镜

双缝干涉仪使用说明书(摘要)

一、结构

双缝干涉仪结构如图4-12所示，遮光筒直径约6cm，长约1m，测微目镜置于筒后，用于测量干涉条纹间的距离。

二、原理

光源发出的光通过滤色片成为单色光，然后通过单缝成为线光源，经双缝便产生稳定的干涉图样，可以在屏上看到条纹。由于双缝间的距离d已知，双缝到屏的距离L可以用米尺测出，相邻两条亮(暗)纹间的距离Δx用测微目镜测出。根据公式$\lambda=\frac{d\Delta x}{L}$，便可算出该单色光的波长。

三、测微目镜的使用方法

测微目镜如图4-13所示，它由刻度板、目镜、手轮等构成。转动手轮，刻度板会左右移动。

1. 测量时，应使刻度板中心刻线对齐某条纹的中心，记下此时手轮上的示数。

2. 转动手轮，使刻度板中心刻线对齐另一条纹的中心，记下此时手轮上的示数。两次读数之差就是两条纹间的距离。

3. 由于测微目镜的螺杆存在间隙，手轮在向左和向右转时对准同一个目标，读数将有差异，称为"回程差"。为了避免回程差，在测量两点间距离时，应该是移动过去，再回转移动，在同一移动方向下读数。

采用测出n条亮(暗)纹间的距离a的方法，可以解决条纹间距Δx很小的问题。这时相邻两条亮(暗)纹间的距离$\Delta x=\frac{a}{n-1}$。

课堂作业与活动

1. 在白光照射下，双缝干涉花样中央条纹为什么是白的？在其他各级条纹中，为什么红色条纹在外侧？
2. 在测量单色光波长的实验中，你是怎样测相邻两个条纹的间距Δx的？为什么测定了n条条纹的总间距，要除以$n-1$得到Δx？
3. 街后公路的积水上漂着薄薄的油层，看上去有许多彩色花纹，其中有一条绿色花纹与条紫色花纹相等。在这两条花纹处，哪里的油层更薄些？为什么？
4. 取两张平玻璃板，用手指把它们紧紧捏在一起，会从玻璃板面上看到许多彩色花纹，改变用力的大小，花纹和颜色和形状也随着改变，请试一试，并思考产生这一现象的原因。
5. 无色的肥皂液，吹出的肥皂泡为什么是彩色的？

周雨物理段石峰

4.2 光的衍射

研究光的衍射现象

水波能绕过障碍物发生衍射。光是电磁波。为什么平时很难看到光的衍射现象呢？

实验探究 观察光的衍射现象

1. 在双缝干涉仪上换上一个单缝，用测微目镜观察屏上的图样（图 4-14）。

2. 随着单缝由宽变窄，亮线发生了什么变化？你能看到如图 4-15 所示的情况吗？这种变化说明什么？

3. 单缝衍射图样的中央亮条纹与两侧亮条纹有什么不同（图 4-16）？不同单色光的衍射条纹有什么不同？

当孔小到一定程度时，光通过小孔也会发生衍射现象。图 4-17 是在实验中拍摄到的红光的圆孔衍射照片。

通过以上实验，请总结一下，光产生明显衍射现象的条件是什么？

当缝、孔或物体的宽度远大于入射光的波长时，衍射现象不明显，可以认为光沿直线传播。在很多情况下，由于障碍物、摄影器材孔径都远大于光的波长，因此很难看到光的衍射现象。

请用惠更斯原理解释光通过单缝和圆孔的衍射现象。



图 4-14 观察光的单缝衍射现象

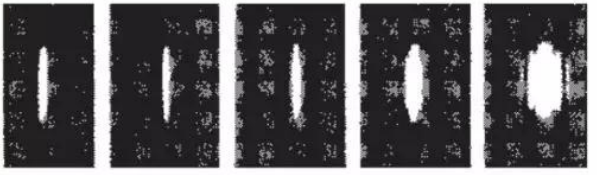


图 4-15 单缝由宽变窄时拍摄得到的衍射条纹

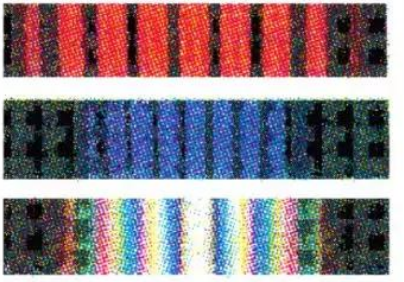


图 4-16 红光、蓝光和白光产生的衍射条纹

身边的光衍射现象

在日常生活中，我们也有机会看到光的衍射现象。图4-18是透光的过刀片的边缘时发生的衍射现象；雨天的晚上，透过眼镜片上的水滴看路灯，水滴的边缘就有衍射条纹。夜观星空，月亮、行星和恒星发光的直线传播规律在我们视网膜上成像，如果我们眯缝着眼睛去观察它们时，都会在视网膜上形成衍射斑。

请在夜晚观察星空，分析当我们眯缝着眼睛时，看到的星球是什么样？

孔雀的羽毛为什么会色彩斑斓？原因是孔雀羽毛上有很多细缝，在自然光（各种颜色的光的混合）的照射下，就产生了衍射现象（图4-19）。

你还能举些生活中光的衍射的事例吗？



图4-17 红光的圆孔衍射照片

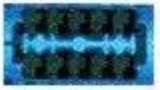


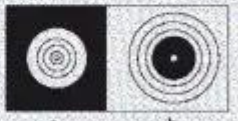
图4-18 激光经过刀片边缘时的衍射



图4-19 孔雀羽毛上的衍射现象

课后作业与活动

1. 把两张卡片的两个刀口充分靠近，通过由此形成的狭缝观看日光灯，记录所看到的花样。
2. 下列现象中属于光的衍射现象的是
   A. 太阳光通过玻璃的棱镜形成的彩色光带
   B. 通过遮光板上的小孔观察远处发光的电灯，看到电灯周围有一圈彩色光环
   C. 油滴漂在潮湿水泥路面上形成油膜，在阳光照射下油膜上有一圈圈的彩色光环
   D. 吹出的肥皂泡上出现彩色条纹
3. 某研究性学习小组用激光束照射圆孔和不透明圆板后，分别得到如图4-20所示的衍射图样，据此可以判断出
   A. a、b都是光线射到圆孔后的衍射图样，a中孔的直径较大
   B. a、b都是光线射到圆板后的衍射图样，b中板的直径较大
   C. a是光线射到圆孔后的衍射图样，b是光线射到圆板后的衍射图样
   D. b是光线射到圆孔后的衍射图样，a是光线射到圆板后的衍射图样



a b

图4-20

4. X射线是一种波长约在1×10^{-12}~1×10^{-8} m的电磁波。但在20世纪初，人们对X射线是不是电磁波争论较多。为什么用通常的光学光栅观察不到X射线的衍射现象？劳厄的X射线衍射实验起到了“一箭双雕”的作用，被爱因斯坦称为“物理学最美的实验”。你认为他的实验将要解决了那两个问题？

周南物理殷石鲜



图 4-21　立体电影的视觉效果

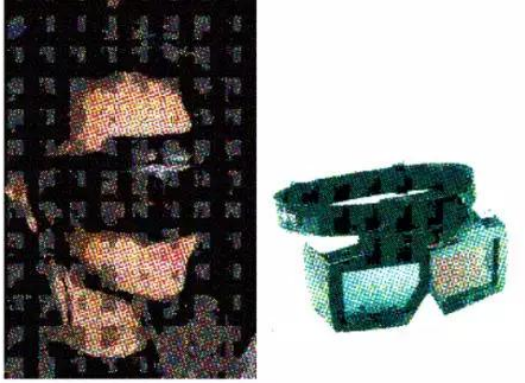


图 4-22　戴上特制的眼镜看立体电影

4.3

光的偏振与立体电影

你看过立体电影吗？当你戴上一副特制的眼镜，开始欣赏立体电影时，隆隆的火车向你驶来，飞机从头顶呼啸而过……

那么，看立体电影时为什么要戴上一副特制的眼镜呢？这种特制的眼镜到底有什么作用呢？

这些问题都与光的偏振有关。

感知光的偏振现象

实验探究　透过偏振片观察图形

取两副观看立体电影的眼镜（也可以取两块偏振片），观看书或杂志上的彩图。直接观察和透过偏振片观察有什么不同？

如图 4-23 所示，将两块偏振片叠放在一起，使其中的一块不动，另一块旋转。观察图案的变化情况。

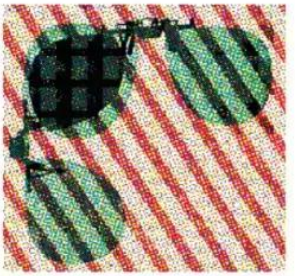


图 4-23　透过偏振片看到的图案

在什么情况下看不到图案？

探究偏振片的原理

分析论证

用偏振片观察物体时，为什么会发生上述现象呢？这与光是

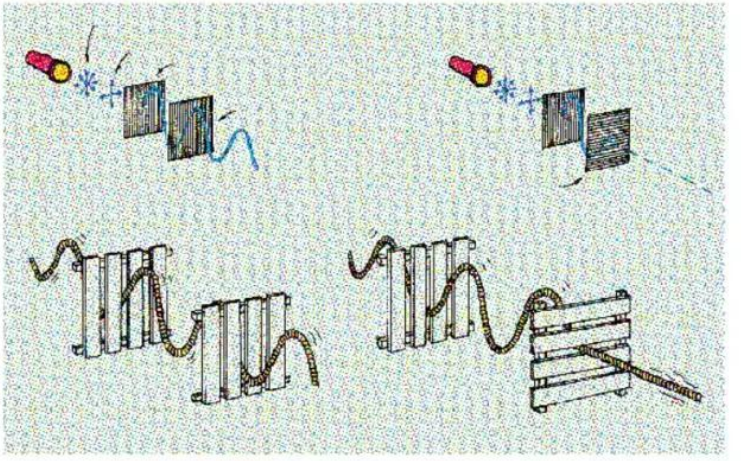


图 4-24 横波通过狭缝的情况

横波有关。为此，我们先研究绳波通过狭缝的情况。

绳波是横波。如果狭缝与振动方向平行，则振动可以通过狭缝继续向前传播；如果狭缝与振动方向垂直，振动就被狭缝挡住，不能向前传播（图 4-24）。狭缝的方向叫做透振方向。

请思考，如果用细软的长条弹簧穿过带有狭缝的木板，用手前后推拉弹簧，形成纵波。纵波能不能通过狭缝继续向前传播呢？

对于光来说，偏振片相当于狭缝，能让光通过的振动方向是确定的。

太阳、电灯等普通光源发出的光，在垂直于传播方向的一切方向上都有光振动，这种光叫做自然光。如图 4-25 和图 4-26 所示，自然光传播到偏振片 P 时，只有跟偏振片的透振方向相同的光振动才可以通过。这种只有沿特定方向振动的光，叫做**偏振光**（polarized light）。如图 4-26 所示，当偏振光传播到偏振片 Q，由于偏振光的振动方向跟偏振片 Q 的透振方向垂直，就不能通过了。

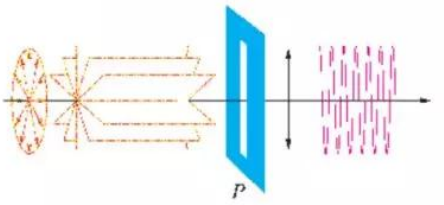


图 4-25 自然光通过偏振片成为偏振光

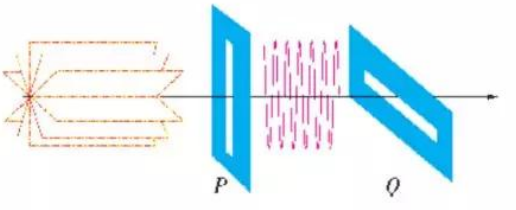


图 4-26 偏振光不能通过第二个偏振片

偏振现象在生产生活中的应用

立体电影

人们观察物体时产生立体感的主要原因是两眼的视差。观察物体时，左右两眼得到的外界图像是有差别的，这叫做双眼视差。

在拍摄立体电影时，用左右并排的两个镜头（相当于人的两只眼睛）同时拍摄，两组胶片上的景物也略有差别。在放映时，用两台放映机同步放映这两组胶片（图 4–27），且在两个放映镜头前各装一块偏振片，并使它们的透振方向互相垂直。这样，就形成两束透振方向相互垂直的偏振光。这两束偏振光投射到银幕上再反射出来，偏振方向不改变。

观看立体电影时，观众戴的眼镜是一对透振方向互相垂直的偏振片。每只眼睛只看到相应的偏振光图像，这样就会像直接观看物体一样产生立体感。这就是立体电影的原理（图 4–28）。

请思考，假如你不戴偏振片眼镜看立体电影，会看到什么样的图像？戴上这副眼镜但闭上一只眼睛还能有立体效果吗？

液晶显示屏

许多电视机、广告牌、电脑、手机、数字显示式电子手表、电子计算器都用液晶显示屏。

液晶既有液体的属性，也有晶体各向异性的属性。液晶的一个特性是能够产生双折射现象。双折射是将一束入射光经折射分成两束光。这两束光在液晶中的传播速度是不相同的，而且都是偏振光。在大多数情况下，这两束光的振动方向几乎互相垂直。因此，为了在液晶显示屏上显示字符和图像，在液晶层的上下要各放置一张偏振片（图 4–30）。

奥地利植物学家赖尼策尔（F. Reinitzer）早在 1888 年就发现了液晶（liquid crystal）的奇特性质。液晶是在某个温度范围内介于液态与结晶态之间的一种物质状态。

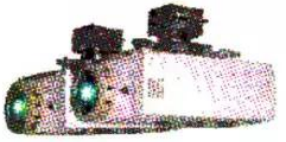


图 4–27　两台放映机同步放映

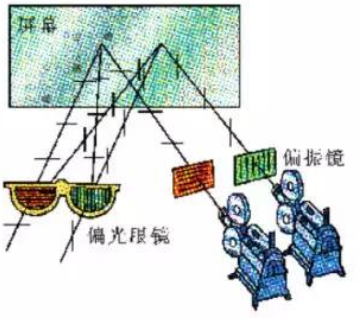


图 4–28　立体电影的原理

液晶显示屏分辨率高、寿命长、功耗低、没有 X 射线和电磁辐射，受到人们的青睐。

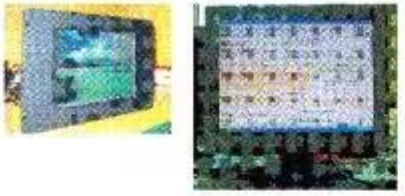


图 4-29 液晶显示电视机与电脑的显示屏

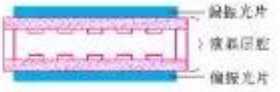


图 4-30 液晶显示屏的构造

本章作业与活动

1. 汽车在夜间行驶时，遇到迎面开来的汽车，那车灯射来的强光常常使驾驶员看不清路面，容易发生事故。请应用光的偏振知识解决这个问题。

2. 如图 4-31 所示，让太阳光或白炽灯光通过偏振片 P 和 Q，以光的传播方向为轴旋转偏振片 P 或 Q，可以看到透射光的强度会发生变化，这是光的偏振现象。这个实验表明

A. 光是电磁波　　B. 光是一种横波

C. 光是一种纵波

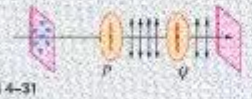


图 4-31

3. 如图 4-32 所示，电灯 S 发出的光先后经过偏振片 A 和 B，人眼在图中 P 处迎着光入射方向看，结果不到亮光，则

A. 图中 a 光是偏振光

B. 图中 b 光是偏振光

C. 将偏振片 B 转过 180° 后在 P 处看到光

D. 将偏振片 A 转过 90° 后在 P 处看到光



图 4-32

4. 图 4-33 所示是观察光的偏振现象的示意图。第一个偏振片 A 叫做起偏器，其作用是 _____；第二个偏振片 B 叫做检偏器，其作用是 _____。当 B 相对于 A 转动时，会看到透射光强度 _____（选填“不变”或“变化”）。

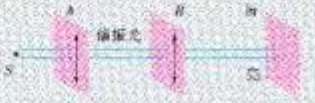


图 4-33

5. 透过一块偏振片观察电灯、蜡烛、月亮、反光的黑板，当以入射光线为轴转动偏振片时，能观察到的现象有何不同。

周南物理段石峰

4.4 光的折射

公元140年，古希腊天文学家托勒密（C. Ptolemaeus）认为入射角 i 与折射角 r 之间是简单的正比关系。但这个结果只对比较小的入射角才大致成立。

在初中，我们已经知道光的折射现象，但没有研究入射角跟折射角之间的定量关系。

探究光的折射定律

1621年，荷兰数学家斯涅尔（W. Snell）从实验中得到了入射角 i 跟折射角 r 之间的定量关系，即入射角的正弦跟折射角的正弦成正比。

实验探究　研究光的折射规律

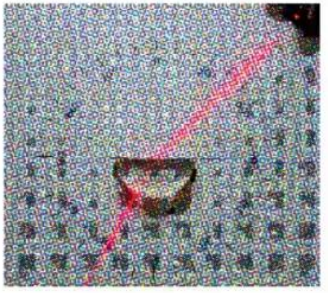


图 4-34　用光具盘探究光的折射定律

如图 4-34 所示，将半圆形玻璃砖固定在光具盘上，用激光射到半圆形玻璃砖的直边上，从光具盘上观察入射光、折射光的方向，并从光具盘边缘的刻度读出入射角 i 和折射角 r。

请测定入射角为 10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°时的折射角，计算入射角的正弦与折射角的正弦及其比值。

你得到的结果跟斯涅尔的一致吗？

这样，我们就得到了光的折射定律：当光从真空射向介质时，入射角 i 跟折射角 r 满足下式

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

分析论证

上面的实验结果应该跟斯涅尔的结论非常接近。在第 2 章中，我们已用惠更斯原理研究过机械波的折射规律，用这种方法也可以得到光的折射定律。惠更斯认为，光的折射是因为光波在界面两侧不同介质中有不同的传播速度。

假设有一列光波从真空进入介质(图 4-35),光在真空和介质中的速度分别是 c 和 v,入射角为 i,折射角为 r。

请根据惠更斯原理,用作图法和几何法证明下式

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c}{v}$$

由于 c 是常量,比值 $\frac{c}{v}$ 取决于光在介质中的速度 v。研究表明,不同介质的光学性质是有区别的,光在不同介质中的速度是不同的。

根据上式,对于从真空以同一个入射角 i 进入介质的光来说,光在介质中的速度 v 越小,折射角 r 是越大还是越小?

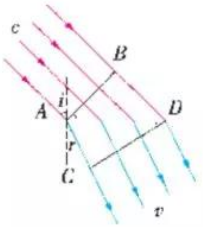


图 4-35 光的折射

折射率

物理学中用**折射率**(index of refraction)来反映介质使光偏折的性质。某种介质的折射率,等于光在真空中的传播速度 c 跟光在这种介质中的传播速度 v 之比。即

$$n = \frac{c}{v}$$

由于光在真空中的传播速度 c 大于光在任何其他介质中的传播速度 v,所以任何介质的折射率 n 都大于 1。光从真空射入任何介质时,$\sin i$ 总是大于 $\sin r$,即入射角 i 总是大于折射角 r。

光在真空中跟在空气中的速度相差很小,通常情况下可认为,光从空气进入某种介质时,入射角的正弦跟折射角的正弦之比就是那种介质的折射率。下表列出了几种介质在室温情况下对钠黄光的折射率。

常见介质的折射率

物质	折射率	物质	折射率
空气	1.000 293	水	1.333 0
二氧化碳	1.000 451	金刚石	2.417
氢气	1.000 132	石英玻璃	1.458
甲烷	1.000 444	钠钙玻璃	1.512
二氧化硫	1.000 686	火石玻璃	1.655
甘油	1.473 0	冰	1.310



图 4-36 牛顿用三棱镜把太阳光分成连续分布的七种色光

同一种介质对不同频率的光发生折射时，折射率是不同的，折射率是随着光的频率的增大而增大的。当一束白光以某个角度入射介质时，由于各种色光的折射角不同，各种色光就分开了，这种现象叫做光的色散。把白光射到三棱镜上，经过两次折射，不同色光就分散得更加明显(图 4-36)。牛顿首次观察到三棱镜把太阳光分成连续分布的七种色光。

光谱中红光的偏折角度最小，紫光的偏折角度最大，中间是橙、黄、绿、蓝、靛等色光。下表是实验测得的冕牌玻璃对各种色光的折射率。

色光	紫、靛	蓝	绿	黄	橙	红
折射率	1.532	1.528	1.519	1.517	1.514	1.513

测定材料的折射率

材料的折射率是衡量光学材料性能的重要指标。根据折射定律，就可以测定材料的折射率。

实验探究 测定玻璃的折射率

用长方体玻璃砖、刻度尺、量角器、激光笔、白纸、大头针、铅笔等器材，设计测定玻璃折射率的实验方案，拟订实验步骤，完成测量。

请思考：怎样确定光从空气进入玻璃砖后的折射方向？

如果玻璃砖的前后表面平行，那么光从空气入射玻璃砖又出射到空气中，出射光的方向与入射光的方向有什么关系？

怎样把激光的光路描绘在白纸上？

当入射角是 15°、30°、45°、60°、75°时，用量角器量出相应的折射角，把入射角 θ_1、折射角 θ_2 和它们的正弦值分别记入自己设计的表格中。

计算出不同入射角下的 $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$，再算出它们的平均值，即得到玻璃的折射率。

家庭作业与活动

1. 某种单色平行光从玻璃射向玻璃和空气的分界面，如图4-37所示，若它能进入空气，则

A. 进入空气后光速变慢

B. 进入空气后光速变大

C. 进入空气后波长变长

D. 进入空气后光束宽度不变

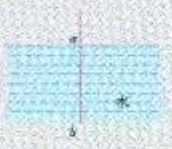


图4-37

2. 发出白光的细线光源 ab，长度为 l_0，竖直放置，上端 a 恰好在水面以下，如图4-38所示。现考虑线光源 ab 发出的靠近水面法线（图中的虚线）的细光束经水面折射后所成的像，由于水对光有色散作用，若以 l_1 表示红光所成的像的长度，以 l_2 表示蓝光所成的像的长度，则

A. $l_1 < l_2 < l_0$　　B. $l_1 > l_2 > l_0$

C. $l_2 > l_1 > l_0$　　D. $l_2 < l_1 < l_0$



第4-38

3. 如图4-39所示，有一底面镀银的圆柱体，其底面直径和圆柱高均为 d。当细光束从圆柱体的某点 A 以入射角 $i=45°$ 入射到圆柱体内，经底面上的 B 点反射后，从圆柱体上的 C 点射出，且 C 点恰好在 A 点的正下方，$AC=d$。则圆柱体的折射率 $n=$_____；光在圆柱体中的传播速度 $v=$_____ m/s（结果可用根式表示）。



图4-39

4. 如图4-40所示，光线以入射角 i 从空气射向折射率 $\sqrt{2}$ 的透明玻璃表面。

(1) 当入射角 $i=45°$ 时，求反射光线与折射光线的夹角 θ。

(2) 当入射角 i 为何值时，反射光线与折射光线间的夹角 $\theta=90°$？



图4-40

周南物理段石峰

4.5 全反射与光导纤维

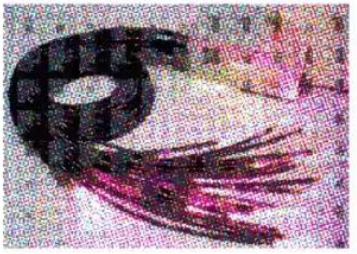


图 4-41 光导纤维

互联网是通过光导纤维(图 4-41)传输信息的。那么,光导纤维是怎样传输光及相关信息的呢?这跟光的全反射有关,让我们先通过实验来探究光的全反射规律。

研究光的全反射现象

实验探究 探究光的全反射现象

如图 4-42 所示,将半圆形玻璃砖固定在光具盘上,观察激光光束从玻璃进入空气时的折射情况。

1. 请仔细观察,当入射角增大时,折射角如何变化?反射光和折射光的强度如何变化?

2. 当入射角增大到多大时,可看到折射光线沿着玻璃砖的直边传播?如果再增大入射角,你会看到什么现象?

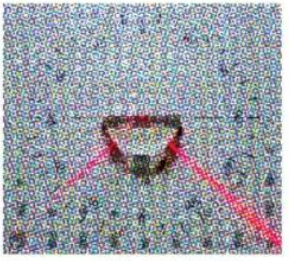


图 4-42 光的全反射实验

由实验可知,当入射角增大到超过某一角度时,折射光会完全消失,只剩下反射光(图 4-43)。这种现象叫做**全反射**(total internal reflection)。

分析论证

上述实验中,玻璃与空气相比较,玻璃是光密介质,空气是光疏介质。当光从光密介质进入光疏介质时,有可能发生全反射现象。

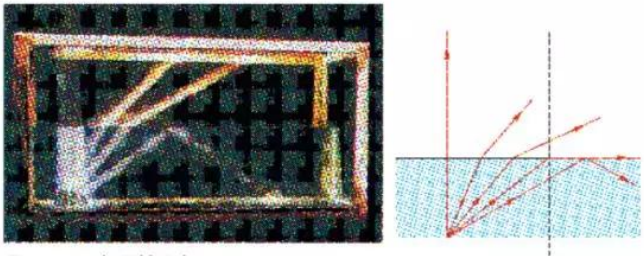


图 4-43 全反射现象

当光从光疏介质进入光密介质时，会发生全反射现象吗？请用实验证实一下你的结论。

实验表明，光从玻璃进入空气时，折射角大于入射角。当入射角增大到一定程度时，折射角就会增大到90°，这时的入射角叫做**临界角**(critical angle)。

当光线从光密介质射入光疏介质时，如果入射角大于临界角，就发生全反射现象，也叫做全内反射。

光从不同的介质进入空气(或真空)时，发生全反射的临界角是不一样的。那么，怎样确定全反射的临界角呢？

假设某种介质的折射率为 n，当光从其进入空气(或真空)，请证明，这时的临界角

$$C = \arcsin \frac{1}{n}$$

已知介质的折射率，就可以确定光从这种介质射到空气(或真空)时的临界角。

水的临界角为48.8°，各种玻璃的临界角在32°~42°，金刚石的临界角为24.5°。

全反射现象的应用

全反射是自然界里常见的现象。例如，水中或玻璃中的气泡，从侧面看起来特别明亮，就是因为光线从水或玻璃射向气泡时，一部分光在界面上发生了全反射。

发生全反射时，光的能量损失很小。这一优点自然被人们广泛利用。例如，把玻璃微珠掺入涂料，刷在各种交通标志上，夜间在汽车前灯的照射下，光会几乎全部反射后再折射出来，特别耀眼醒目。如图4-44所示的直角三棱镜，叫做角锥棱镜，任何入射的光在三个面上都会发生全反射，最后使入射的光折返，自行车尾灯用的就是角锥棱镜(图4-45)。

工程上用激光测量距离时，常用全反射角锥棱镜做靶。例如“阿波罗11号”的登月航天员，就把由100个角锥棱镜组成的18英寸方形靶带到月球上，以用于测量月地距离。

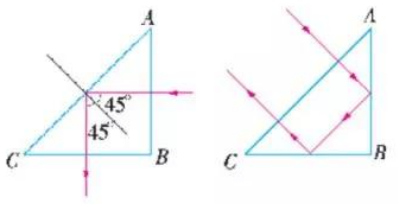


图4-44 角锥棱镜

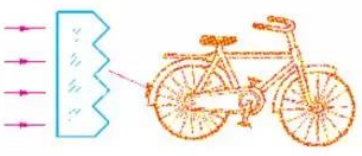


图4-45 自行车的尾灯

光纤及其应用

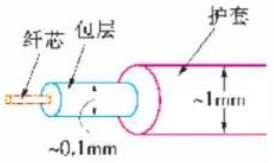


图 4-46　光纤的结构

光纤的原理

光导纤维(简称光纤)是近年出现的一种新材料。每根光纤分内外两层，内层纤芯的折射率为 1.8 左右，外面包层的折射率为 1.4 左右(图 4-46)。这样当光由内层射到内外层的界面时，入射角小于临界角的那些光会逸出纤维，而入射角大于临界角的光则会发生全反射。在界面上经多次全反射后从光纤的一端传到另一端，如图 4-47 所示。

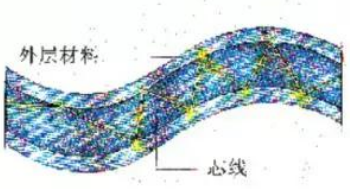


图 4-47　光纤的原理

取一根弯曲的细玻璃棒，一端插在激光笔的输出端，观察玻璃棒的另一端(图 4-48)。你会看见光传递过来吗？

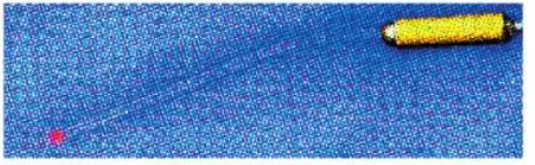


图 4-48　激光沿玻璃棒传播

光纤在医学上的应用

把许多光纤聚集成一束，保持排列位置不变，就可以传输图像信号。医学上用这种传像光纤束制成内窥镜(图 4-49)，检查人体胃、肠、气管等器官的内部。实际的内窥镜装有两组光纤，一组用来把光传送到人体内部，另一组用来把人体内部的图像传送出来让医生观察(图 4-50)。利用光纤，还可以把激光导入人体内做肿瘤切除手术。图 4-51 所示的蓝色管状物为导入人体内的光纤。

光纤通信

光纤通信是光纤技术最成功的应用之一。将载有声音、图像



图 4-49　内窥镜



图 4-50　用光纤检查人体

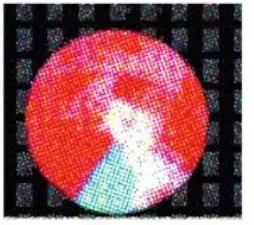


图 4-51　把激光导入人体内进行肿瘤切除

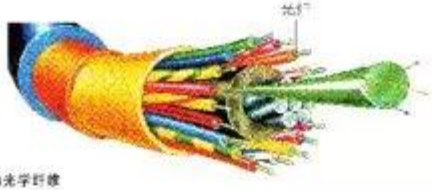


图 4-52 通信用的光学纤维

以及各种数字信号的激光（波长为 1.31~1.55 μm 的近红外线）从光纤的一端输入，就可以沿着光纤传到千里以外的另一端。在使用光纤通信之前，人们使用同轴电缆通信。同轴电缆单管每千米质量至少 200kg，而每千米光纤的质量仅为 2.7×10^{-2} kg。通信用的光纤是由直径约几微米的多根或单根玻璃（或透明塑料）纤维组成的（图 4-52）。由几十根甚至几百根光纤集束在一起组成的光缆具有强大的通信能力。现在，由光纤通信构成的“信息高速公路”已将全世界迅捷成互联互通的信息网络，使人类进入信息时代。

课堂作业与清明

1. 如图 4-53 所示，ABC 为一全反射玻璃，玻璃对不同色光的折射率不同，对红光的临界角为 42°，M 为一与 BC 垂直的光屏，一束白光沿平行于 BC 的方向射向 AB 面，经 AB 面折射后的光线又射向 BC 面，则

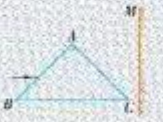


图 4-53

A. BC 面将有色光射出
B. 光屏 M 上会出现色彩光带且紫光在上
C. 光屏 M 上会出现色彩光带且红光在上
D. 将光屏与 BC 保持垂直地向右平移，屏上彩色光带连续变宽

2. 如图 4-54 所示，只含黄光和紫光的复色光束 PO，从空气中沿半径方向射入玻璃半圆柱后，被分成两光束 OA 和 OB，又分别沿着如图所示的两个方向射出，则

A. OA 为黄光，OB 为紫光
B. OA 为紫光，OB 为黄光
C. OA 为黄光，OB 为复色光
D. OA 为紫光，OB 为复色光



图 4-54

3. 有一个半导体砷化镓发光管，发出波长为 0.9 μm 的红外线光，发光区为直径 AB=3mm 的圆盘，发光面上覆盖着一个折射率 n=2.4 的半球透介质，如图 4-55 所示。要使发光器发出的全部光线在球面上不发生全反射，则透介质球的半径至少应该多大？



图 4-55

周南物理段石峰

4.6

激光

ISBN 7-5428-3519-X

激光(laser)早已进入我们生活的方方面面。超级市场的售货员把商品上的条形码(图 4-56)对着一道红色的细光束一划,商品的名称、价格就显示在收银机的屏幕上了,这道细光束就是激光。计算机读取光盘上的信息、我们打长途电话、听 CD 唱片、看 DVD 电影、制作全息图像防伪标志(图 4-57),等等,都用到激光。



图 4-56 商品的条形码扫描

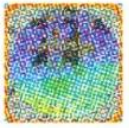


图 4-57 激光防伪标志

激光的特性

自 20 世纪 60 年代发明了第一台红宝石激光器以来,各种各样的激光器相继问世(图 4-58),它们可以产生不同功率、不同波长的激光。激光有哪些特性呢?

实验探究 研究激光的特性

取激光笔一支、手电筒一个。观察比较普通光和激光经三棱镜折射后的传播情况?

激光与手电筒的光柱在传播方向、颜色、亮度等方面有什么不同?

根据以上实验观察,你能总结出激光有哪些特点?

激光的第一个特点是单色性好、相干性好。所谓单色性好,就是频率单一。只有频率严格单一、且在同一个方向上偏振的光才产生稳定的干涉现象,这种光称为相干光。激光就是一种很好的相干光。

激光的第二特点是方向性好,或者说平行度好。激光在传播很远的距离后仍不会像普通光那样发散得很开。激光的发散角只有 0.06°。

激光的第三个特点是亮度高,它可以在很小的空间和很短的时间内聚集起大到难以想像的能量。如果把强大的激光束会聚起来照射到物体上,其功率密度将达到 $10^{24}\mathrm{W/cm^2}$,是太阳表面功率

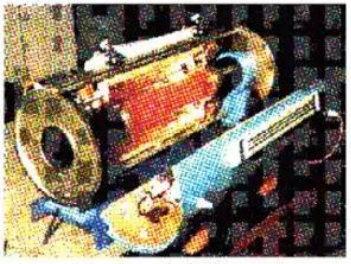


图 4-58 激光器

密度的 10^{14} 倍！它可以使物体的被照部分在不到千分之一秒的时间内产生几千万度的高温，最难熔化的物质也会瞬间化成气体。

激光的应用

由于激光是很好的相干光，因此可在各种干涉仪中作为相干光源，用于长度、频率、转角等物理量的精密计量，并用来记录和再现全息照相。

由于激光能像无线电波那样进行调制，因此可以用来传递信息。光纤通信就是用激光在光导纤维中传递信息的高新技术。

由于激光平行度好，可以会聚到很小的一点上，因此可用于读出 VCD 机、CD 机或计算机光盘上记录的信息。由于会聚点很小，光盘记录信息的密度就很高。光盘技术是利用激光和计算机存储信息的最新技术。

激光平行度好的特点还使它可以用来进行精确的测距。对准目标发出一个极短的激光脉冲，测量发射脉冲和收到回波的时间间隔，就可以求出发射点与目标的距离。现在用于工程测量的激光经纬仪已经很普及。在军事上，激光的这个特点可用于反坦克导弹、精确炸弹的制导。激光测距雷达不仅可以测量距离，而且能根据多普勒效应测出目标的运动速度。激光准直可用于开挖隧道，组装大型客机和监测水坝、桥梁的平直度。

激光的亮度高。如图 4-59 所示，可以用来切割布料、汽车钢板等各种材料，可以对金属表面进行热处理，焊接金属、陶瓷等难熔材料，以及在宝石轴承、人造丝喷头板等硬质材料上打孔。医学上可以用激光作“光刀”来切开皮肤、切除肿瘤，其好处是出血少、不易感染；还可以用激光“焊接”剥落的视网膜、修正角膜、治疗近视眼。目前，世界上发达国家正在用最强大的激光器试验激光核聚变。

农业专家用激光照射种子；物理学家用激光探索物质的奥秘；化学家把激光用于控制化学反应，进行化学分析，甚至还可以剪裁分子；核科学家则用激光分离铀的同位素。

一张直径为 12cm、厚度仅为 0.15cm、重量 15g 的光盘，其存储量可达 650 兆比特。随着技术的进步，新一代的光盘可以反复擦除、写入，存储量再增加 2 到 4 倍。

严禁把激光束直接对着人眼！

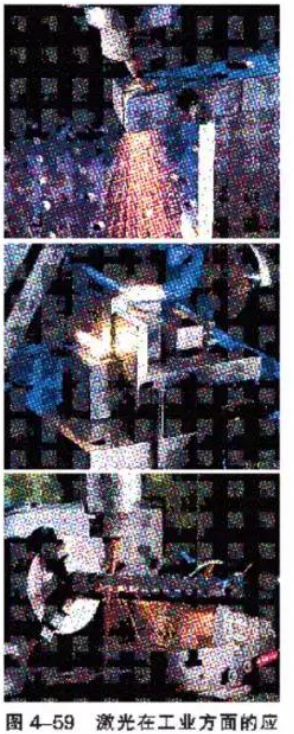


图 4-59 激光在工业方面的应用

全息照相

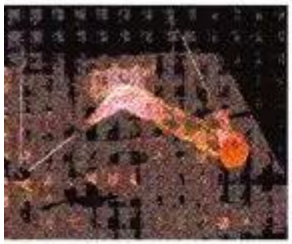


图 4-60　全息照相原理

早在 1948 年，英国物理学家伽柏(D. Gabor)就提出了全息照相的原理。1960 年以后出现了激光，它相干性好、强度大、自然成为全息照相的十分理想的光源。全息技术由此进入一个新阶段，发展非常迅速。

全息照相的工作原理如图 4-60 所示。一束激光通过分光镜分成两束光。一束光经透镜扩束照射到物体上，经物体反射再照射到感光底片上，这部分光叫做物光。另一束光直接投射到感光底片上，这部分光叫做参考光。物光和参考光在感光片上叠加时形成干涉条纹，被摄物体反射光中的全部信息以不同浓黑程度和不同疏密分布的干涉条纹形式记录下来。

全息照片和普通照片截然不同，上面并没有像普通照片那样的具体景象，只有通过高倍显微镜才能看到上面有浓黑程度不同、疏密程度不同的干涉条纹。



图 4-61　全息影像再现

要看到被摄物体的像，必须用一束与参考光的波长和传播方向完全相同的光束照射全息照片才行(这一光束叫做再现光)。再现光照到全息照片上，就会发生衍射，再现出原来的物光波。这样，在拍摄时放置物体的地方就能看到与原物形象完全一样的立体虚像，有视差，有纵深感，观察者从不同角度观察时，就好像面对原物一样，看到它不同的侧面，甚至在一个角度被遮住的东西也可以在另一个角度看到它。

有趣的是，如果取全息照片的一个碎片，用它仍能看到原物的全部形象，只是观察者要多移动(图 4-61)。全息照相用激光拍摄，用激光再现，无所谓正负片。

如果用白光去照射全息照片，则出现一片彩虹似的模糊光。图 4-57 所示的防伪标志就是彩虹全息照片，它在自然光照射下会再现所拍摄物体的形象。

请在实验室里观察全息照片及其记录的影像。

本课作业与活动

1. 纳米技术是跨世纪的新技术，将激光束的宽度集中到纳米范围内，可修复人体已损坏的器官，可对 DNA 分子进行超微型基因修复，把缺损基因切掉，重新接入正常基因，治疗疾病等等。在这些技术中，人们主要利用了激光的
   A. 单色性　　B. 单向性
   C. 亮度高　　D. 能量集中
2. 脉冲激光器的电功率为 2×10^6 W，每秒钟输出 10 个光脉冲，每个脉冲持续的时间为 10^{-8} s，携带的能量为 0.2 J，则每个脉冲的功率为 _____ W，该激光器将电能转化为激光能量的效率为 _____。
3. 红宝石激光器发射的激光是不连续的一道一道的闪光，每道闪光称为一个光脉冲。现有一红宝石激光器，发射功率为 1.0×10^{10} W，发射的每个光脉冲持续时间 Δt 为 1.0×10^{-11} s，波长为 693.4 nm，则每个光脉冲的长度为多少？

周南物理段石峰

4.x

第 4 章家庭作业与活动

1. 如图 4–62 所示是一种自行车尾灯的截面图，这种尾灯中并没有灯泡，夜间行驶时，后方来的汽车灯光照到这种尾灯上时，尾灯就变得十分明亮，引人注目。这种灯的原理是利用了

A. 光的全反射　　B. 光的折射

C. 光的色散　　D. 光的干涉



图 4–62

2. 根据激光亮度高、能量集中的特点，在医学上可以利用激光

A. 杀菌消毒　　B. 切除肿瘤

C. 透视人体　　D. “焊接”剥落的视网膜

3. 当戴上偏振片眼镜观察水面时，能够清楚地看到水中的游鱼，试解释其中的道理。

4. 在图 4–63 中，人眼隔着起偏器 B、A 去看一只发光的电灯泡 S，一点透射光都看不到。那么，下列说法中正确的是

A. 使 A 和 B 同时转过 90°，仍然一点光都看不到

B. 单使 B 转过 90°过程中，看到光先变亮再变暗

C. 单使 B 转过 90°过程中，看到光逐渐变亮

D. 单使 A 转动时，始终看不到透射光

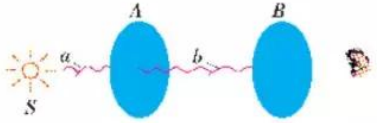


图 4–63

5. 请说说激光与普通光相比有哪些特点？举一些激光应用的实例。

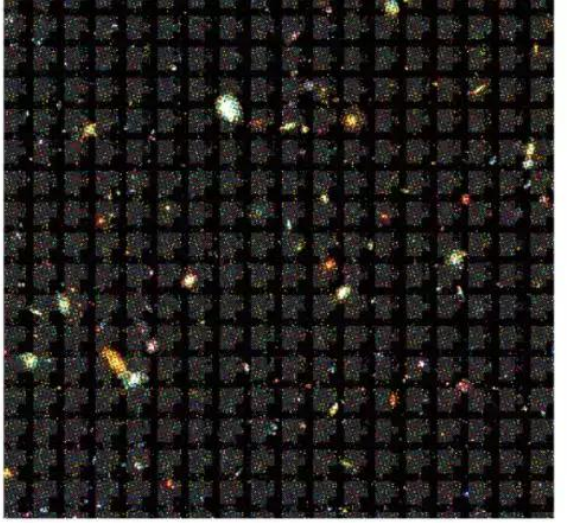


图 5-1　哈勃望远镜 1996 年拍摄的浩瀚的宇宙

四方上下曰宇
往古来今曰宙
——尸佼

第 5 章
新时空观的确立

电磁场理论的确立，光是电磁波的确证，以及电磁波的高速传播，使人们的认识进入微观高速运动领域。

从伽利略开始，就用时间和空间的概念来定量地描述宇宙间物体的运动。牛顿(I. Newton)在《自然哲学的数学原理》中，第一个对时间和空间概念作了阐述，这就是经典物理学的时空观。人们坚信，这种时空概念是绝对正确的，并一代又一代地沿袭下来。19 世纪末 20 世纪初，有些实验事实与经典物理学发生了尖锐的矛盾。这些事实使爱因斯坦(A. Einstein)产生了一个革命性的思想，他认为经典物理学的时空观并不是绝对真理。由此，他创立了相对论。

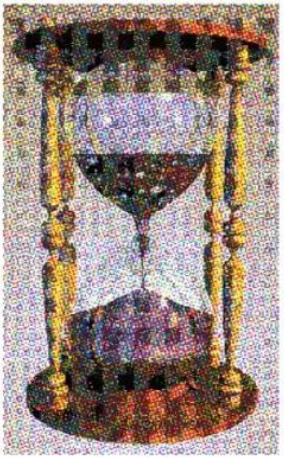


图 5-2　古老的沙漏时钟

相对论不仅揭示了物体做高速运动的规律，更重要的是，相对论提出了新的时空观，为人类描绘了新的世界图景。

你对时间和空间是怎样认识的？

牛顿提出的时空观(绝对时空观)是怎样的？它与哪些事实发生了尖锐的矛盾？

相对论时空观是怎样的？

……

本章将用实验事实揭示经典物理学时空观遇到的困难，展示**狭义相对论**(special theory of relativity)和**广义相对论**(general theory of relativity)的新时空观下的奇特效应，以及支持相对论的主要观测证据，从地球走向宇宙深处，追溯那历史的星空。

5.1

电磁场理论引发的怪异问题

19世纪后半叶，人类对电磁场理论进行了深入研究，电磁场理论预言了电磁波的存在，并确认光是电磁波。人们当时认为，电磁波与机械波相似，传播也需要介质。那么，传播光的介质是什么？按照传统的看法，是一种叫做“以太”(ether)的物质；光在真空中的传播速度 c 就是光相对于“以太”的速度。

“以太”真的存在吗？如果“以太”不存在，麦克斯韦电磁场理论还正确吗？

亚里士多德认为，世界由四种元素“土”、“水”、“火”、“气”构成，后来又补充了第五种元素“以太”。人们为了给电磁波的传播找到介质，就接受了“以太”的学说。奇特的“以太”在何处？它究竟是什么东西？这些问题曾长期困惑着人类。

迈克尔孙—莫雷实验

按照经典物理的速度合成公式，一个人在相对地面以速度 v 运动的车或船上，向前进方向掷出一个相对于自己以速度 u 运动的球，则这个球相对地面的速度应为 $V = u + v$。根据经典物理，这种算法是绝对正确的。

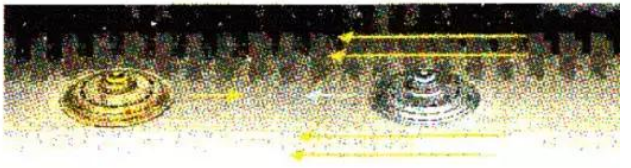


图 5-3 光通过以太运动

如果光在“以太”中传播(图 5-3)，其速度为 c。在顺着光的方向运动的航天飞船中观测，光的速度是显得更快还是更慢？在逆着光的方向运动的航天飞船中观测，又会得到什么结论？

关于这两个问题的解答，关键取决于“以太”是否存在。如果“以太”存在，我们就应该观测到地球相对于“以太”的速度 v。迈克尔孙(A. A. Michelson)把一束单色光巧妙地分成两束相互垂直的光：一束与 v 平行，一束与 v 垂直。根据经典物理速度合成公式，这两束光应该有相对于地球不同的速度。

请思考，我们能不能直接观测这两束光相对于地球的速度的差异？为什么？

显然，由于光速 c 远远大于地球相对于“以太”的速度 v，直接观测这两束光的速度差异非常困难。迈克尔孙将这两束光叠加，产生干涉现象。根据不同情况下干涉条纹的变化，以判断地球是否相对“以太”运动。因此，迈克耳孙设计了以他名字命名的“迈克尔孙干涉仪”(图 5-4)。

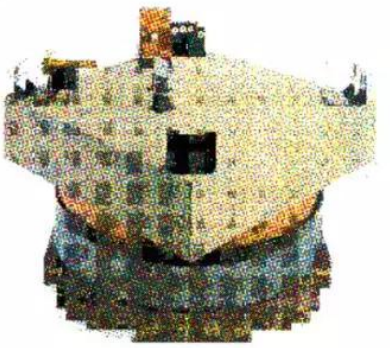


图 5-4 迈克尔孙干涉仪

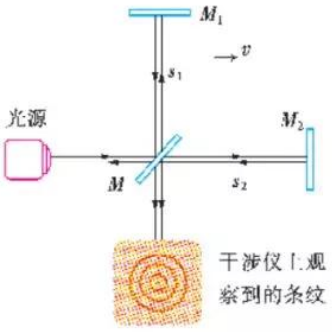


图 5-5 迈克尔孙干涉仪的工作原理

1886 年，迈克尔孙和莫雷(E. W. Morley)利用可以自由转动的实验台等装置，在水平面内不同的方位进行光的干涉实验，观察干涉条纹的移动情况。结果表明，在水平面内不同的方位进行光的干涉实验，干涉条纹并没有预期的移动。这说明，光在任何方向传播时，相对于地球的速度都是相同的。也就是说，地球相对于“以太”的速度 v 实际上为零，或者说“以太”根本不存在；光速 c 是不变的。这就是迈克尔孙-莫雷实验的“以太漂移的零结果”。

此后的近 50 年中，有 11 位科学家发表了 13 份精确的实验数据，都得到了“以太漂移的零结果”。这些都成为光速 c 不变和“以太”不存在的判定性实验。

迈克尔孙-莫雷的实验结果从根本上动摇了“以太”假设，使牛顿的绝对时空观念遭到严重困难，这就是物理学史上的第一朵乌云。

电磁理论的“缺陷”

爱因斯坦在 1919 年的一篇手稿中写道：“在构思狭义相对论的过程中，关于法拉第电磁感应(实验)的思考对我起了主导作用。”如图 5-6 所示，根据法拉第的观点，当磁体相对于导体回路运动时，导体回路就会感应出电流。不管是磁体运动还是导体运动，结果都一样。爱因斯坦认为，“从磁体看，肯定没有电场；可是从导体回路看，却肯定有电场。于是电场的有无就成为相对的了，取决于所用坐标系的运动状态。”

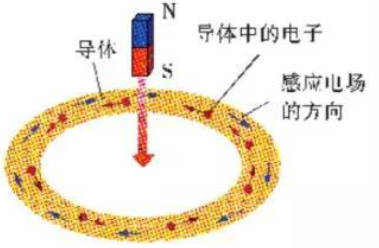


图 5-6 电磁感应实验

同一个实验现象或物理规律，在不同的参考系中居然有完全不同的解释，这违背了伽利略相对性原理，也是很难让人接受的。**伽利略相对性原理**(Galileo principle of relativity)指出：对于力学规律来说，一切惯性系都是等价的。

爱因斯坦说：“只是在经过若干年的探索之后，我才注意到这个困难在于运动学上一些基本概念的任意性上。”他坚信，在不同的参考系中，一切物理过程和规律都是相同的，必须从整体上认识电场和磁场；同时，他认为，把力学中的速度合成公式用于电磁场问题之中是值得怀疑的。

实践作业与活动

1. 既然经典力学和电磁场理论难以支撑的“以太”不存在，经典物理学的正确性应该受到怀疑吗？你认为经典物理学的问题可能出在哪里？
2. 请查阅有关资料，了解一下迈克尔孙-莫雷实验的详细情况。
3. 请讨论，如果你以光的速度追逐电磁波，你会看到什么景象？

5.2

狭义相对论的基本原理

面对“以太漂移的零结果”、“光速是与参考系无关的常量”、“经典的速度合成公式对电磁学规律不适用”等事实，许多物理学家在经典物理的框架内试图进行各种修补。爱因斯坦摒弃了经典物理学的时空观，提出狭义相对论的两个公设；用理论研究的方法，得到了狭义相对论的全部结论。

相对论的兴起是由于实际需要，是由于旧理论中的矛盾非常严重和深刻……新理论(相对论)的好处在于它解决这些困难时，很一致，很简单，只应用了很少几个令人信服的假定。

——爱因斯坦

狭义相对论的两条公设

经典物理学的时空观集中体现在伽利略变换中。事实上，伽利略变换来自时间、空间跟物体的运动无关的基本假设。

经典力学认为，时间和空间是分离的，时间尺度和空间尺度跟物体运动无关，都是绝对的，即绝对时间和绝对空间。

假设有两个开始完全重合的参考系 X 和 X'，有一个事件 P 在两个参考系中的位置和时间分别为 x、y、z、t 和 x'、y'、z'、t'。如果参考系 X' 相对参考系 X 沿 x 方向的速度为 v，则

$$\begin{cases} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases}$$

这就是所谓**伽利略变换**(Galileo transformation)。伽利略变换既隐含了时间与参考系、物体的运动无关($t = t'$)，也隐含了不同惯性参考系之间速度的合成法则($V = V' + v$)。

爱因斯坦认为，空间和时间在本质上是统一的，空间和时间不是分离的。

爱因斯坦提出的两个基本公设是：

1. 在所有相互做匀速直线运动的参考系中，物理规律都是相同的。这个公设叫做爱因斯坦**相对性原理**(principle of relativity)。

2. 在所有相互做匀速直线运动的参考系中，光在真空中的速度都是相等的。这个公设叫做**光速不变原理**(constancy of lightspeed)。

洛仑兹变换

假设有两个开始完全重合的参考系 X 和 X'。有一个事件 P 在这两个参考系中的位置和时间分别为 x、y、z、t 和 x'、y'、z'、t'。如果参考系 X' 相对参考系 X 沿 x 方向的速度为 v。根据空间和时间不可分离的观点，爱因斯坦提出了更一般的坐标变换

$$\begin{cases} x = a_{11}x' + a_{12}t' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = a_{21}x' + a_{22}t' \end{cases}$$

这一坐标变换，从根本上否定了空间和时间分离的经典力学的时空观。

请思考，为什么说上述坐标变换从根本上否定了空间和时间分离的时空观？

在上面的变换式中，引入的系数 a_{11}、a_{12}、a_{21}、a_{22} 需要四个条件才能导出。爱因斯坦根据光速不变原理和新的时空性质，导出如下关系式

$$\begin{cases} x = \dfrac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \dfrac{t' + \dfrac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

式中 c 为光速。这一变换式叫做**洛仑兹变换**（Lorentz transformation）。

请思考，为什么说洛仑兹变换是更一般的坐标变换？你能够在 $v \ll c$ 时，由洛仑兹变换得到伽利略变换吗？

爱因斯坦的两条基本公设只涉及无加速运动的惯性系，由此建立的相对论通常叫做狭义相对论。

在爱因斯坦提出狭义相对论之前，洛仑兹（H. A. Lorentz）已经给出了这一变换式。他为了使麦克斯韦方程组满足相对性原理，在提出一些特殊假设的基础上导出这一变换式的。

这里，爱因斯坦是从他的两个基本原理出发，运用逻辑推理和数学工具推导出来的。

同时的相对性

在物理2中，我们曾讨论了如下问题：爱因斯坦设想一列开得很快的火车（速度为 v），在它的一节车厢的正中间有一观察者 A 和一台闪光器，车头和车尾各有一台光接收器 P 和 Q，在站台上有另一个观察者 B，如图 5-7 所示。

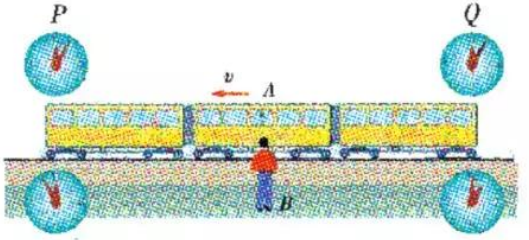


图 5-7 爱因斯坦理想实验

火车驶过站台，在 A 和 B 相遇的瞬间，闪光器发出一次闪光，这个闪光会被车头和车尾的两个接收器 P、Q 同时接收到吗？车上的观察者 A 和站台上的观察者 B 的结论一致吗？

观察者 A 认为，闪光信号以光速 c 相对于他（即火车）传播，P、Q 两个接收器与闪光器的距离相同，闪光信号到达 P、Q 的时间是相同的，即两个接收器同时收到闪光信号。

而站台上的观察者 B 看来，闪光信号也是以光速 c 相对于他传播。假设站台所在的参考系为 X，火车所在的参考系为 X'，在 A、B 相遇时两参考系完全重合，且 X' 相对于 X 沿 x 方向的速度为 v，根据洛仑兹变换，闪光信号到达 P 点和 Q 点所需的时间 t_P 和 t_Q 为

$$t_P=\frac{t'+\frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}},\qquad t_Q=\frac{t'-\frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

显然，t_P 和 t_Q 并不相等，$t_P>t_Q$，闪光信号应先抵达 Q，后抵达 P，即两个接收器不是同时收到信号。

你能够根据洛仑兹变换，从观察者 B 所观测到的 x_P 和 x_Q 不同，说明在他看来两个接收器不是同时收到信号的吗？

这种不同时性，确实令人惊讶！人们通常认为，地面上的人、甚至其他星球上的“人”，都会有相同的“同一瞬间”，因此宇宙中存在牛顿式的普适时间。现在从爱因斯坦的狭义相对论来看，不存在全宇宙普适的同时性概念。也就是说，“同时”是相对的，跟观察者所选取的参考系有关。

如果观察者 B 信奉牛顿力学，那么他根据经典力学规律和伽利略变换，可得到

$t_P(c+v)=x'+vt_P$

$t_P=\frac{x'}{c}$

同理可得

$t_Q(c-v)=x'-vt_Q$

$t_Q=\frac{x'}{c}$

则 $t_P=t_Q$，即两个接收器仍然是同时收到信号。

为什么在日常生活中人们没有观察到这种同时的相对性呢？在实际生活中，火车的运动速度远小于光速，地面上的观察者 B 不能分辨出闪光到达 P、Q 的时间差异。

请根据上述分析，在 $v \ll c$ 的情况下，用洛仑兹变换得到 $t_P = t_Q$，说明它的物理意义。

多学一点 相对论速度变换公式

我们以高速运动的飞船为例，飞船相对于地球的速度为 v，飞船上的某物体以速度 u' 沿着飞船前进的方向相对飞船运动，那么物体相对于地球的速度 u 为多少呢？研究表明

$$u = \frac{u' + v}{1 + \dfrac{u'v}{c^2}}$$

如果飞船上的某物体运动的方向与飞船相对于地球飞行的方向相反，则 u' 取负值。如果 u' 与 v 之间的夹角不是 0°或 180°，那么此式不再适用。

由上式可以发现，当 v 和 u' 为光速时，物体相对于地球的速度也不会超过光速。这就表明：一切物体的运动速度都不会超过光速，光速是物体运动速度的极限。

当 v 和 u' 远小于光速时，$\dfrac{u'v}{c^2} \approx 0$，上式就演变成 $u = u' + v$，这样就得到经典物理时空观下的速度合成公式。

所以，经典的速度合成公式，可以看成是速度远小于光速时的一种特殊情况。

实践作业与活动

1. 为什么说洛仑兹变换是更一般的坐标变换？请在 $v \ll c$ 的条件下，由洛仑兹变换得到伽利略变换。
2. 爱因斯坦相对性原理与光速不变原理有没有矛盾？为什么？
3. 在图 5-7 所示的理想实验中，在 $v \ll c$ 的情况下，用洛仑兹变换推导 $t_P = t_Q$。

5.3 奇特的相对论效应

运动时钟延缓

由于同时性的相对性，根据洛仑兹变换容易知道，地面上测量的时间间隔 Δt，跟在以速度 v 相对于地球飞行的飞船上测量的时间间隔 $\Delta t'$ 的关系为

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

此式说明，假设惯性系 X' 以 v 相对于另一惯性系 X 运动，如果在惯性系 X' 中，测量某一物理过程所需要的时间是 $\Delta t'$，则在惯性系 X 中，测量到这一过程所需要的时间 Δt 总要长一些。

也就是说，在一个相对于我们做高速运动的惯性系中发生的物理过程，在我们看来，它所经历的时间比在这个惯性系中直接观测到的时间长。物体所在的惯性系相对于我们所在的惯性系的速度越大，我们所观测到的某一物理过程的时间就越长。这个结论对于化学反应、生命过程等都是正确的。这就是运动**时钟延缓**(time dilation)。

你能够用洛仑兹变换得到运动时钟延缓公式吗？

设物体所在的运动惯性系中某一处 x'，物体完成某一物理过程所需的时间是

$\Delta t' = t_2' - t_1'$

根据洛仑兹变换可以得到，在静止的参考系中的 t_2 和 t_1，由此可得

$\Delta t = t_2 - t_1$

比较 Δt 和 $\Delta t'$ 便可得到运动时钟延缓公式。

案例分析

案例

宇宙射线中有一种叫做 μ 子的粒子，在与 μ 子相对静止的惯性参考系中观测到，它平均经过 2×10^{-6}s(其固有寿命)就衰变为电子和中微子。但是，这种 μ 子在大气中运动的速度非常大，可以达到 $v = 2.994 \times 10^8$ m/s=0.998 c。请分析，μ 子在大气中可以运动多远的距离？

分析 已知$\Delta t' = 2 \times 10^{-6}$s，$v = 2.994\times10^8$ m/s。如果按照经典物理来看，μ 子从产生到衰变的这段时间里平均走过的距离仅为

$$l' = 2.994 \times 10^8 \times 2 \times 10^{-6}\,\mathrm{m} \approx 600\,\mathrm{m}$$

根据狭义相对论，在地面的实验室中观测 μ 子的“运动寿命”为

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1-(0.998)^2}}\,\mathrm{s} = 3.16 \times 10^{-5}\,\mathrm{s}$$

因此 μ 子在大气中运动的距离应为

$$l = 2.994 \times 10^8 \times 3.16 \times 10^{-5}\,\mathrm{m} \approx 9500\,\mathrm{m}$$

这一结论与实验观测结果基本一致。说明狭义相对论是经得起实验检验的。

运动长度收缩

我们知道，测量一根棒在某一时刻的长度，就是测量它的两个端点在同一时刻的位置之间的距离。在经典物理学中，这种测量是跟参考系的选择无关的。但是，根据爱因斯坦的时空观，长度的测量跟参考系的选择有关。

爱因斯坦认为，地面上测量的长度 l 跟以速度 v 相对于地球飞行的飞船上测量的长度 l' 的关系是

$$l = l'\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

你能够用洛仑兹变换得到上式吗？

其实，上述案例中的 μ 子为什么能够穿越我们在地面上观测到的 9500m 的大气呢？对于 μ 子来说，大气在以 2.994×10^8m/s 运动，因此，9500m 厚的大气收缩为

$$l' = l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx 600\,\mathrm{m}$$

此式说明，如果某一惯性系相对于静止惯性系以速度 v 运动，在这个运动惯性系中有一根沿运动方向放置且静止的棒，在运动惯性系测得的长度是 l'，在静止惯性系中测得的长度 l 总要比 l' 短一些，两者之间相差一个因子 $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$。这种效应叫做运动长度收缩(length contraction)，或尺缩效应。这个效应显示了空间的相对性。

由长度收缩公式可以看出，当 $v \ll c$ 时，$l \approx l'$。这时又回到了牛顿的经典时空概念：空间的量度跟时间和参考系无关。这也说明，牛顿的绝对时空只是相对论时空在低速情形下的近似。

爱因斯坦质量公式

根据牛顿第二运动定律，在一定的外力作用下，物体就会以恒定的加速度运动，只要经过足够长的时间，它就能够达到你想要达到的速度，甚至可以超过光速。但是爱因斯坦的相对论速度变换公式告诉我们，光速是物体运动速度的极限。如何解决这一矛盾呢？

爱因斯坦认为，牛顿力学中质量与速度无关只是低速情况下的近似。实际上物体的质量随速度的增加而增加。物体以速度 v 运动时的质量 m 跟它静止时的质量 m_0 之间的关系为

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

这一理论推导的结论与考夫曼实验中的实验数据是吻合的。实际上，在高能物理实验室中，质量随速度增加而增加是司空见惯的事。例如，一个亚原子粒子可以加速到超过 $0.99c$ 的速度，非常接近光速，相对论预言它的质量要比静止质量大许多倍，实验观察的结果与预言的情况符合得非常好。

质能关系

狭义相对论的一个重要结论是，物体的质量跟它具有的能量是相互联系的。

信息浏览

考夫曼实验

1901 年，德国物理学家考夫曼(W. Kaufman)在测定 β 射线的比荷时，在假设电荷不随速度变化而变化的前提下，发现了电子的质量随其运动速度的变化而变化。如果用 m_0 表示电子的静止质量，m 表示运动电子的质量，c 表示光速，则根据考夫曼的测量结果，可以得到如图 5-8 所示的曲线。

这一实验结果跟后来爱因斯坦推导出的质量公式完全一致，成为狭义相对论的一个重要的实验证据。

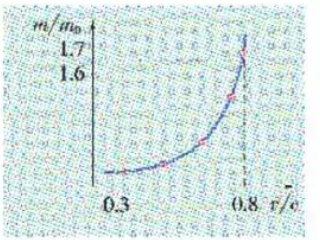


图 5-8 考夫曼实验曲线

爱因斯坦于1905年，推导出了如下关系式

$$E = mc^2$$

上式表明，任何质量 m 都对应着一定的能量 mc^2。此式把“质量”和“能量”两个概念紧密地联系在一起，通常叫做爱因斯坦的**质能关系**(mass-energy relation)。

爱因斯坦的质能关系式的发现，具有划时代意义。

狭义相对论认为，在一个物理过程中，物体的质量发生了变化，其能量也相应发生变化。由质能关系不难得到

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

其中 Δm 为物理过程前后质量的变化，ΔE 为物理过程释放或吸收的能量。

普通的炮弹爆炸时，碎片的动能来自于化学能。核反应释放的能量 ΔE 可以用质量亏损 Δm 来计算。

狭义相对论认为，时间、空间、质量都跟运动速度相联系，时间、空间是物质的存在形式；时空概念是从物质运动中抽象出来的，而不是独立于物质运动之外的概念；时空是相对的，质量也是相对的。这些时空概念也是下一节要学习的广义相对论的基本观念。

爱因斯坦创立的狭义相对论，是20世纪物理学伟大的成就之一。这个理论引发了物理学史上一次深刻的变革，成为近代物理学的两大支柱之一(另一大支柱是量子力学)。同时，狭义相对论使人类对物质世界的认识发生了巨大的飞跃。爱因斯坦提出狭义相对论至今，经历了百年的验证和考察，已有50多个重要实验证明了它的正确性。

家庭作业与活动

1. 一艘空间飞船以0.99c的速度飞经地球上空1000m的高空，向地面上的观察者发出持续2×10^{-6}s的激光脉冲。当飞船正好在观察者头顶上垂直于视线飞行时，观察者测得脉冲的持续时间为多少？在这一脉冲期间，飞船相对于地球飞了多远？
2. 一核弹含20 kg的钚，爆炸后生成物的静止质量比原来小$\frac{1}{10000}$。求爆炸中释放的能量。

5.4

走近广义相对论

在狭义相对论建立两年后，1907年，爱因斯坦在《我是如何创立相对论》的演说中说道："我对狭义相对论并不满意，因为它被严格地限制在一个相互具有恒定速度的参照系中，它不适用于一个任意运动的参照系……"爱因斯坦几乎是一个人经过长达8年的研究，将相对性原理从惯性系推广到非惯性系，于1915年建立了广义相对论。

广义相对论的两个基本原理

爱因斯坦怎样将相对性原理从惯性系推广到非惯性系的呢？

众所周知，在均匀引力场中的任一位置，一切物体都具有相同的加速度。正是这个极普通的事实引起了爱因斯坦的深入思考，而"在狭义相对论的框子里，是不可能有令人满意的引力理论的"。爱因斯坦为寻求"满意的引力理论"，他陷入深深的思考之中。他说，"我坐在伯尔尼专利局办公室里，脑子里突然闪出一个念头：如果一个人正在自由下落，他绝不会感到他有重量。我吃了一惊，这个简单的想象给我的印象太深了。它使我由此找到了新的引力理论。"

爱因斯坦通过理想实验推断：在一个加速参考系中做物理实验，观察到的结果跟在引力场中的实验是没有区别的。

为理解爱因斯坦的推断，让我们来分析一下乘电梯的感受。

请思考，当电梯开始启动上升时，你有什么感受？想象一下，如果电梯一直加速上升，你又会有什么感受？

显然，电梯启动实际上是一个加速过程，正是这个加速度使你感到被压向下，产生沉重的感觉。这种现象在物理学中叫做"超重"，也就是说，在电梯加速上升过程中，好像地球对你的引力增加了。因此，我们完全可以认为，电梯这个加速参考系就相当于给你加上了一个均匀向下的引力。可见，爱因斯坦的上述推断是正确的。

让我们再研究一个理想实验。在外层空间的宇宙飞船上（忽

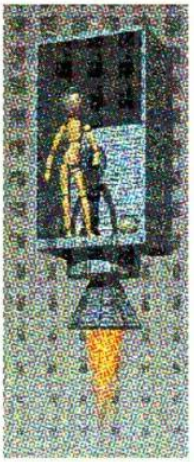


图 5-9　飞船上的自由落体实验

略所有星体的引力，这一点你一定从电视中宇航员在太空舱中飘飘欲仙的画面得到证实），如果你正在一个以加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 向头顶方向运动的电梯中，根据你的感受，你会断定电梯在向你的头顶方向加速运动（图 5-9）。这时，你举起一个小球让其自由下落，你会观测到什么物理现象和过程？

小球是否做自由落体运动？为什么？

有了以上思考和讨论，我们就可以理解爱因斯坦提出的广义相对论的两条原理：

1. 在任何参考系中（包括惯性参考系），物理过程和规律都是相同的。这一原理叫做广义相对性原理。

2. 一个均匀引力场与一个做加速运动的参考系等价。这一原理叫做**等效原理**（principle of equivalence）。

广义相对论的预言与证实

在一般的物理学研究中，由于广义相对论效应是极其微弱的，所以常常忽略不计。但是，在宇宙学研究的过程中，广义相对论的作用就体现出来了。

时空弯曲

广义相对论认为，时空不是平直的，而是弯曲或“扭曲”的（图 5-10）。扭曲的根本原因在于时空中物质的质量或能量的分布。时空几乎在每一点上都是弯曲的，只有在没有质量的情况下，时空才没有弯曲。如果质量越大，**时空弯曲**（bending of space-time）的程度也就越大。

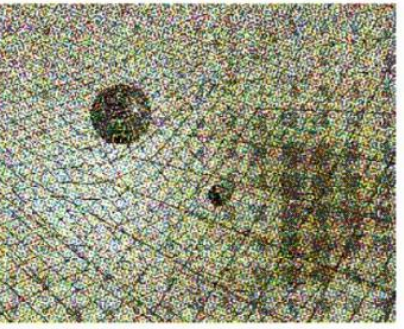


图 5-10　时空弯曲

天体之间的引力作用是时空弯曲的结果。太阳的质量带来的引力场的强度比地球引力场的强度大 27 倍，它使时空弯曲达到这样的程度，以致我们的行星要依从这一弯曲而沿着一种特定的轨道运行。

牛顿力学认为，行星的轨道是以太阳为焦点的椭圆（图 5-11）。这是一个封闭曲线，行星沿着这一曲线做严格的周期性运动。但是实际观测的结果告诉我们，行星的轨道不是严格封闭的。牛顿力学能够对此进行解释，但是实际观测结果与牛顿力学理论的计算结果有较大的偏差。爱因斯坦的广义相对论的计算结果与实验观察结果十分接近，被认为是广义相对论初期的重要验证之一。



图 5-11　行星椭圆轨道

光线弯曲

根据电磁理论和经典光学，在无障碍的情况下，光线是直线传播的。但是按照爱因斯坦的广义相对论，在引力场存在的情况下，光线是沿弯曲的路径传播的(图 5-12)。

爱因斯坦根据广义相对论推算，光经过太阳附近时会发生1.7″左右的弯曲，这一偏移在日全食时能够测量到。1919 年 5 月 29 日发生日全食，有两个天文观测队同时进行日全食观测，观察到金牛星座的一些恒星的射线偏移，其偏折角与爱因斯坦根据广义相对论计算的偏角符合得很好，从而证实了爱因斯坦广义相对论关于光线弯曲的说法。

光线在引力场中弯曲的一个推论是“引力透镜效应”。1979 年科学家在观察大熊星座时发现了第一个引力透镜，在那里发现了两个似乎是孪生类星体的物体。事实上，其中一个是这个星体的影子。这就是所谓宇宙中的“海市蜃楼”。

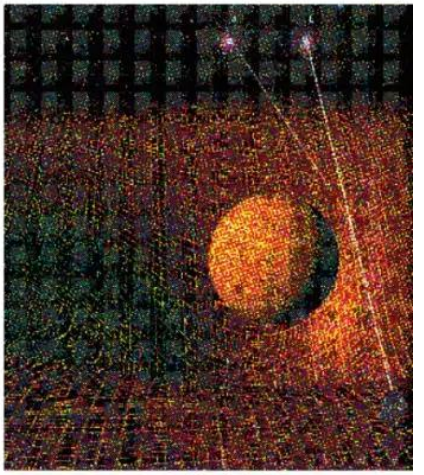


图 5-12 光线弯曲引发的“海市蜃楼”：星体的实际位置和观测到的位置

引力红移

根据爱因斯坦的广义相对论，在强引力场中，时钟要走得慢些。因此，光在引力场中传播时，它的频率或波长会发生变化。理论计算表明，氢原子发射的光从太阳(引力场强度大)传播到地球(引力场强度小)时，它的频率要比地球上氢原子发射的光的频率低，这就是引力红移效应。

如果将光的电磁振动看作是最简单的时钟(原子钟)，那么这种时钟在一些天体上和在地球上计时的情况就有所不同。天体上的电磁振荡频率低，周期长，其时钟走得慢。例如，地球上的时钟走上 1 年的时间，同样的钟在太阳上就要慢 1min，在白矮星上的钟就要慢 2.6h。

引力红移效应是非常小的，容易受到其他因素的影响，所以在实验中测量起来比较困难。1959 年，科学家完成了第一个地面上的引力红移实验，得到的数据与理论计算符合相当好。1961 年，科学家们观测到太阳光谱中的钠谱线的引力红移与理论结果比较符合。

课后作业与活动

1. 在外层空间的宇宙飞船上，如果你正在一个以加速度 $g=9.8m/s^2$ 向头顶方向运动的电梯中，这时，你举起一个小球自由地丢下，请说明小球是做自由落体运动。
2. 请讨论归纳一下，爱因斯坦的时空观与普通人的时空观有什么本质差别。

5.5 无穷的宇宙

从古到今，关于宇宙的起源、宇宙的演化等神秘问题，引发了人类种种遐想。为了回答上述问题，人们将宇宙作为一个整体来研究，形成了一门新的科学——宇宙学。

宇宙的起源

宇宙大爆炸模型，与DNA双螺旋模型、地球板块模型、夸克模型一起，被认为是20世纪科学中最重要的四个模型。

关于宇宙的起源，目前比较有影响的理论是宇宙的大爆炸学说。它是俄裔美国物理学家伽莫夫(G. Gamov)在1948年首先提出的。该理论认为，我们所观察到的宇宙，产生于最初的一次大爆炸，那时宇宙的温度极高，密度极大，体积极小。随着爆炸的发生，它不断地向各个方向迅速膨胀，随着温度和密度的降低，宇宙早期存在的微小的密度不均匀在引力作用下不断增强，最后逐渐形成今天宇宙中的各种天体。这一宇宙模型被公认为标准宇宙模型。

伽莫夫根据自己的大爆炸理论预言，作为爆炸的后果，宇宙空间应该存在当时产生的微波辐射。那么在实验中能否探测到这一微波辐射，就被认为是初步验证大爆炸理论的关键。

20世纪60年代初，美国科学家威尔逊(R.W.Wilson)和彭齐亚斯(A. A. Penzias)在一次实验中意外地发现，接收微波的天线不管指向何方，总会接收到一定的微波噪声，这一微波噪声跟方向、日夜和季节均无关。他们认为，这是来自空间的一种辐射。为此他们获得了1978年的诺贝尔物理学奖。

总之，从宇宙学观点来看，这种微波辐射是几十亿年前的宇宙存留到今天的遗迹，对它的进一步精密观测将告诉我们许多关于宇宙早期的信息。例如，大爆炸后的第一瞬间发生了什么？宇宙是如何演变成今天我们所见到的复杂星系结构？宇宙的年龄究竟是多少？宇宙的膨胀速度到底有多大？

宇宙的演化

1929年，美国天文学家哈勃(E. P. Hubble)用望远镜对远距离

星云进行观测时，发现遥远的恒星发出的光谱线普遍存在一种“红移”现象，即和地球上同物质的谱线进行比较时，其波长会变长，频率减小，且离地球越远的恒星，其谱线的红移越大。这一现象表明，那些存在“红移”现象的恒星正在离我们远去，也说明星系系统处于一种膨胀状态。

这一现象与机械波中的多普勒效应相似。

在宇宙演化过程中，黑洞(black hole)是恒星演化的结果。当一个大质量的恒星进入演化的后期，由于自身强大的引力使得这种恒星收缩，随着它的收缩，其引力场的强度变得越来越大。当恒星收缩到一定程度时，引力场变得如此之强，以致光线弯向内部并囚禁在那里，再不会返回到空间。根据相对论，光的速度是最快的，如果它都不能逃脱这样星体的束缚，那么任何其他的东西也就不可能逃出了，一切都被极强的引力场所吞噬。这样的星体就叫做黑洞(图 5-13)。

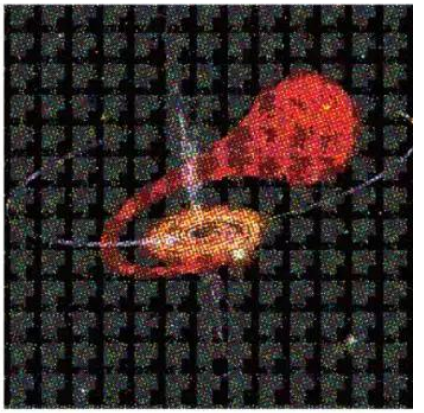


图 5-13 黑洞吸引大爆炸产生的物质

黑洞本身不能发出光线，所以就不可能直接显示它的存在。但是，可以观察到它巨大的引力场对周围物质产生的效应。例如，从黑洞边缘经过的光线，如果没有被黑洞所吸收，它们就会发生很大的偏移，甚至可能在到达观察者之前，在黑洞周围多次地以循环形轨道行进。

家庭作业与活动

1. 谈一谈你对宇宙的起源和演化的看法。写一篇科普报告。
2. 请查阅资料，了解一下关于黑洞的研究进展。

5.x

第 5 章家庭作业与活动

1. 根据本章学习的内容，归纳经典物理学的时空观与相对论时空观的主要观点。
2. 查阅资料，写一篇介绍爱因斯坦及其科学成就的短文。

总结与评价　课题研究成果报告会

亲爱的同学：

祝贺你即将完成物理 3-4 的学习。在那些激动人心的探索活动中，你和你的同学经历了困难的考验，也享受了成功的喜悦，可能还有许多独到的见解和研究成果。在学完本书后，你一定想让同学们分享自己的这些成果。那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以在你平时做过的最满意的课题中挑选一些，再做进一步的研究，取得更有意义的成果；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你最感兴趣的课题，独自或与同学合作进行研究；当然，你还可以自选其他课题进行研究。

带着你的研究成果，到报告会上去展示吧！

报告会上，虽然没有宏篇大论，也可能没有什么重大发明，但这里展示的成果，凝聚着你们的心血，闪烁着你们智慧的火花。

在这里，最可贵的是真实、简单和甚至异想天开！

这个“课题研究成果报告会”，将让你的才智得到充分的展示！

研究课题示例

设计简易地震仪

访问当地气象部门或地震研究所，查阅有关资料，了解地震仪的简单工作原理，结合所学的机械振动和机械波方面的知识，制作一个简易的地震仪。通过模拟地震实验，检测一下你设计的地震仪的工作性能。

探究电磁屏蔽现象

参观电视机、收音机生产厂家，向有关技术人员了解，一般采取哪些措施、选取哪些材料来制作家用电器的电磁屏蔽装置。选择恰当的材料，制作一个简易的电磁屏蔽网罩，用小收音机来检验这个电磁屏蔽网罩的屏蔽效果。

宇宙学研究的现状

上网或到图书馆查阅有关资料，了解人类对宇宙起源、演化规律的研究历程，发挥你的想像，大胆提出你关于宇宙起源、演化的看法，写一篇短文。

彩虹全息的基本特性

彩虹全息照片能够在自然光的条件下再现彩色形象。现在，彩虹全息技术已经广泛应用于生产和生活之中。请查阅有关资料，了解彩虹全息照片的拍摄过程和基本原理。

设计利用多普勒效应的实用装置

根据多普勒效应，设计一种利用多普勒效应的实用装置。

评价表

课题名称：

姓名：　　完成日期：

合作者：

1. 课题设计思路：

2. 课题研究过程：

3. 收集的主要资料或证据：

4. 分析和论证：

5. 研究成果和结论：

6. 自我评价：

我在课题研究中的表现：　　我对小组研究的贡献是：　　我擅长的是：

我在研究中遇到的困难是：　　我在这些方面应该做得更好：

自我评价等级(在评价的等级上画圈)：

A级(优秀)　B级(良好)　C级(合格)　D级(低于标准)

7. 小组评语：

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

8. 老师评语：

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

主　　编　束炳如　何润伟

本册主编　母小勇　张有光

编写人员（按姓氏笔画为序）

王　全　母小勇

张永兴　张有光

张橙华

后　记

本书根据《基础教育课程改革纲要(试行)》的精神，按照《普通高中物理课程标准(实验)》的要求，力求体现课程改革的理念，贯彻和完成《标准》所规定的多方面教育任务，全面推进素质教育。

在本书的编写过程中，得到了许多专家、学者、教学研究人员和广大教师的帮助和支持。沈永昭教授审阅了全书书稿。上海科技教育出版社的编辑朱惠霖、汤世梁、李志棣和有关工作人员为本书出版在组织协调、编辑加工、美术设计、排版印刷等方面做了大量的工作。特别是全国中小学教材审定委员会的委员们严格把关，对我们的送审本提出了许多宝贵的修改意见和具体修改细节。在此一并表示诚挚的谢意。

编写基于模块结构的普通高中物理教科书，是一个全新的课题。我们编写组全体成员认真学习、潜心研究、分工协作，充分发扬团队精神，终于可以把本书呈献给大家。但由于水平有限，仍不免有错误和不当之处。竭诚希望实验区的师生和广大读者提出批评和建议。

编者

2005年6月