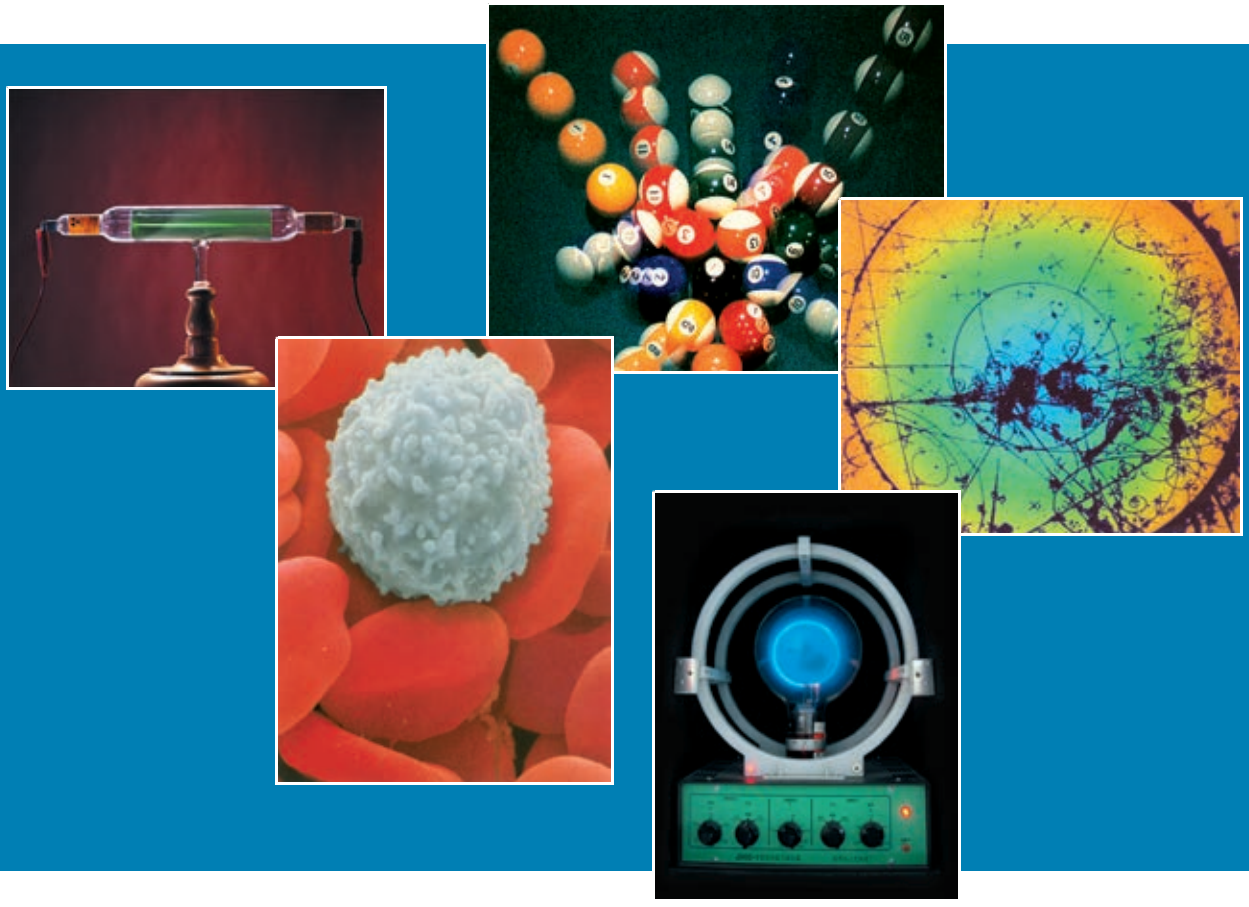
经全国中小学教材审定委员会 2005 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理 选修 3-5

PHYSICS

主编 束炳如 何润伟



上海科技教育出版社

亲爱的同学：

欢迎你选择学习《物理 3–5》！

通过物理必修模块和有关选修模块的学习，你已经领略了物理学的神奇，感受了物理学的魅力。在那些激动人心的探索活动中，我们共同度过了一段段令人难忘的美好时光。

现在，你迈进了《物理 3–5》的大门。你首先会在碰撞问题中再次享受守恒定律的美妙。接着你将探幽入微，进入一个你既熟悉、又陌生的微观世界。在这个世界里，你将看到一些似乎不可思议的现象，例如，光既是波又是粒子，一个粒子的位置和动量是不可能同时准确地测定的；你还将探究一连串的问题：小小的原子内部到底有些什么？为什么在原子内部储存着那么大的能量？科学家为什么要千方百计地打开原子、原子核、质子、中子……

在你面前展示的是：科学家面对一个个挑战，突破了经典物理学的框架，把人类对微观世界的探索跟对宇观世界的认识结合在一起，在奥妙无穷的科学世界中开拓出一片片新天地。

你将在一个全新的物理世界中遨游，尽情地享受自然界的美妙、和谐和统一。

为了让你在学习《物理 3–5》的过程中获得更大的成功，请浏览以下的本书栏目介绍。

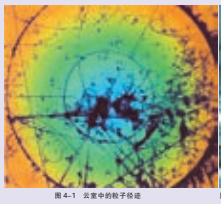


图 4–1　云室中的粒子径迹



图 4–2　国家同步辐射实验室

第 4 章

从原子核到夸克

20世纪初，物理学的研究已从宏观世界深入到了微观世界，卢瑟福的 α 粒子散射实验使人们确信，原子内部存在着比原子小很多的原子核。之后，科学家利用前所未有的强有力的实验手段，并跟理论探索紧密结合，对原子核结构进行深入探索，经历了从原子核到夸克的漫长而曲折的过程。

每章的开头都有一些情景，提出一些问题，让你明确本章研究的主要内容。

的照射下物体发射电子的现象叫做**光电效应**(photoelectric effect)，发射出来的电子叫做**光电子**(photoelectron)。

实验探究　探究光电效应产生的条件

如图 2–10 所示，取一块锌板，用砂纸将其一面擦一遍，去净表面的氧化层，连接在验电器上。设法给锌板带上负电，验电器的

锌板表面极易氧化，每次实验前都应该用砂纸擦一遍。

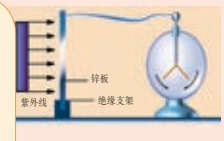


图 2–10　光电效应实验

实验探究

这里将要求你提出问题，设计实验方案，动手做一些有意义的实验，进行科学探究。

动量守恒定律

分析论证

如图 1–17 所示，有 A、B 两个木球，在同一直线上做同方向的匀速运动，它们的质量分别是 m_1 和 m_2，速度分别是 v_1 和 v_2，且 $v_2 > v_1$。经过一定时间后 B 追上了 A，发生碰撞，此后 A、B 的速度分别变为 v_1' 和 v_2'。

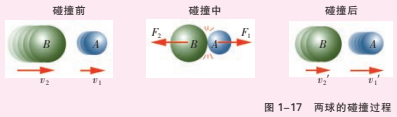


图 1–17　两球的碰撞过程

分析论证

在这里，你将经历分析、综合、应用数学工具进行推理，从而得出物理学规律和公式的过程，体会到高中物理理论思维的魅力。

多学一点

这里有更多更深的奥秘，将进一步开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。

2. 在什么情况下，v_1' 跟 v_1 方向相反？

3. 在什么情况下，碰撞后两球速度互换？（这正是英国皇家学会悬赏征答的问题。）

多学一点　研究斜碰问题

在台球比赛中，我们经常欣赏到精彩的斜碰事例（图 1–30）。研究斜碰问题时，运用正交分解法较为方便。斜碰也可分为弹性碰撞和非弹性碰撞两类。

如图 1–31 所示，我们用红球 A 撞击蓝球 B。设球 B 开始时是静止的，且不考虑球的转动。把 A、B 两球看作一个系统，在斜碰中，动量守恒，在 v_1 的方向上和垂直于 v_1 的方向上，动量都应守恒，因而有

$$m_A v_1 = m_A v_A \cos\alpha + m_B v_B \cos\beta$$

$$m_A v_A \sin\alpha = m_B v_B \sin\beta$$

又因 A、B 两球的碰撞可视为弹性碰撞，故动能也守恒：

两球在碰撞前的相对速度不沿两球球心连线的碰撞叫斜碰。



图 1–30　台球中的斜碰事例

课题研究

这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究会让你的才智得到充分的展示。

课题研究

估算子弹的射出速度

如图 1–21 所示，取一只乒乓球，在球上挖一个圆孔，向球内填进一些橡皮泥或碎泡沫塑料，放在桌子的边缘处。将玩具枪平放在桌面上，瞄准球的圆孔，扣动板机，让子弹射入孔中，与乒乓球一同水平抛出。只需测出球的质量 M、子弹的质量 m、桌面的高度 h 和乒乓球落地点离桌子边缘的水平距离 s，就可估算出玩具枪子弹的射出速度 v。你能推导出计算 v 的表达式吗？试着做一做这个实验。

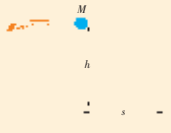


图 1–21

安全告诫：
实验中注意安全，
不要把枪口对着人！

家庭作业与活动

这里为你提供了丰富多彩的学习活动，让你通过回顾进行自我评价，加深对知识的理解，提高解决有关问题的能力，体验到成功的喜悦。

家庭作业与活动

1. 在日常生活中，我们不会注意到光是由光子构成的，这是因为普朗克常量很小，每个光子的能量很小。而我们观察到的光学现象中涉及大量的光子。试估算 60W 的白炽灯泡 1s 内发出的光子数。

2. 在生活中我们会拍很多照片，通常我们都认为，这是由人和景物发出或反射的光波经过照相机的镜头聚焦在底片上形成的。实际上照片上的图像也是由光子撞击底片，使上面的感光材料发生化学反应形成的。图 2–22 是用不同曝光量洗印的照片，请你根据自己对光的理解，做出说明。

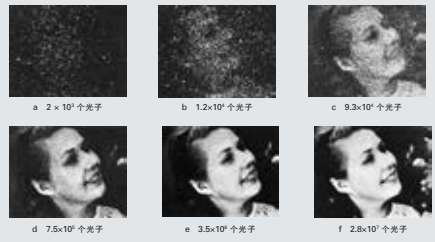


图 2–22　用不同曝光量洗印的照片

信息浏览、STS 栏目

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，它们反映了物理学与科学、技术、社会的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。

信息浏览

揭开太阳能之谜

太阳是人类最大的能源。千万年来，它的光辉未见有丝毫的减弱。那么，如此巨大和持久的太阳能究竟来自何方呢？

最初，人们曾设想太阳是一只大煤炉，靠燃烧煤释放的化学能维持着它的光和热。可是研究表明，太阳表面温度超过 6000 K，太阳辐射功率约 3.9×10^{26} W，碳和氧的化合反应很难达到这样的高温，也很难持久地辐射如此巨大的能量。

19 世纪末以来，物理学取得了重大进展，笼罩着太阳能之谜的面纱开始被逐渐揭开。

1911 年发现原子核后，人们开始猜测太阳能是从原子核内放出来的能量。

1938 年，流亡到美国的德国物理学贝特（H. A. Bethe）和冯·魏扎克（C. F. von. Weizsacker）分别提出太阳（和一般恒星）能量产生的现代理论。他们认为，氢是太阳中的燃料，太阳内不断发生着氢核聚变成氦核的反应，同时放出大量的能量。根据他们的理论推算，太阳的寿命长达 100 亿年，目前仅度过约一半时光，正处于“壮年”阶段，依然是生气勃勃，光芒万丈。

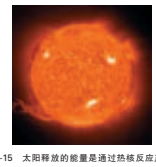


图 5–15　太阳释放的能量是通过热核反应产生的

目 录



第 1 章 碰撞与动量守恒 6

1.1 探究动量变化与冲量的关系 7

1.2 探究动量守恒定律 11

1.3 动量守恒定律的案例分析 16

1.4 美妙的守恒定律 19



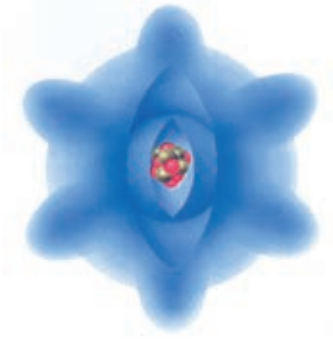
第 2 章 波和粒子 24

2.1 拨开黑体辐射的疑云 25

2.2 涅槃凤凰再飞翔 29

2.3 光是波还是粒子 37

2.4 实物是粒子还是波 40



第 3 章 原子世界探秘 46

3.1 电子的发现及其重大意义 47

3.2 原子模型的提出 51

3.3 量子论视野下的原子模型 55

3.4 光谱分析在科学技术中的应用 59

第 4 章　从原子核到夸克　64

4.1 原子核结构探秘　65

4.2 原子核的衰变　70

4.3 让射线造福人类　76

4.4 粒子物理与宇宙的起源　81



第 5 章　核能与社会　88

5.1 核能来自何方　89

5.2 裂变及其应用　94

5.3 聚变与受控热核反应　100

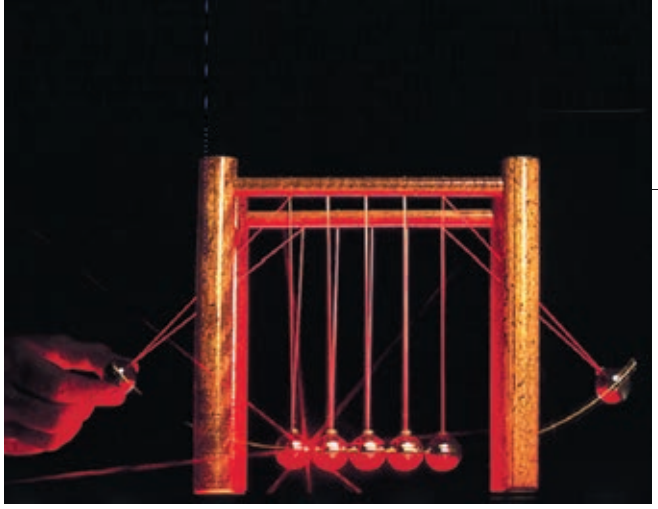
5.4 核能利用与社会发展　104

总结与评价　课题研究成果报告会　110

研究课题示例　110

评价表　111





a　奇妙的碰撞实验



b　台球的碰撞(频闪照片)

图 1–1　实验和生活中的碰撞

第 1 章
碰撞与动量守恒

你做过如图 1–1a 所示的实验吗?横杆上并排地悬吊着 5 个小球，当你将最左边的小球拉起后放手,你将观察到什么现象?

如果将最左边的两个小球拉起后放手,你又会观察到什么现象?

类似的实验现象曾使 17 世纪的科学家们惊讶不已。你是否也有同感?这其中隐藏着怎样的规律?

在自然界中,从微观、宏观到宇观,碰撞的事例很多(图 1–2)。由于碰撞时相互作用的时间很短，而且在碰撞过程中作用力是变化的,直接运用牛顿运动定律来分析就很困难。那么,怎样分析、研究这类碰撞问题呢?

本章将引入新的物理量——动量和冲量。通过实验，探究碰撞中所遵循的物理原理——动量定理和动量守恒定律,并从动量和能量的角度分析弹性碰撞和非弹性碰撞等问题。最后将对你学过的守恒定律进行总结。你将进一步体会自然规律的和谐与统一,感受物理学之美。

图 1–2　自然界中的碰撞

a　陨石与地面碰撞留下的坑



b　微观粒子的碰撞



1.1 探究动量变化与冲量的关系

从 1990 年起，我国香港的中学生每年都要举行趣味科学比赛，其中的一个项目叫“鸡蛋撞地球”，要求参赛者设计一个保护装置，使鸡蛋从大约 13 m 的高度落地后完好无损。

假如你受邀参加比赛，你的方案是什么？制定方案的依据是什么？

动量和冲量　动量定理

为了参加这项比赛，有一位同学做了如图 1–3 所示的实验。

让两只鸡蛋从约 1.5 m 的高处自由落下，分别落在海绵垫上和塑料盘中。

你会看到什么现象？你能猜想一下其中的物理原理吗？

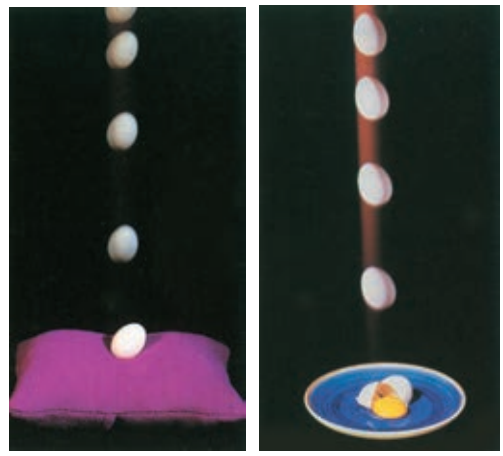


图 1–3　下落的鸡蛋

分析论证

先用牛顿第二定律，分析当鸡蛋落到海绵垫上或塑料盘中时的运动变化情况。

如图 1–4 所示，设鸡蛋的质量为 m，它从某一高度下落，到达海绵垫或塑料盘中时，速度为 v_0，在合力 $F = N - G$ 的作用下，经过一段时间 t 后，速度变为 $v_t = 0$。

由牛顿第二定律　$F = ma = m\dfrac{\Delta v}{t}$

可得　$Ft = m\Delta v = mv_t - mv_0$

那么，上式中的 Ft 和 mv 各有什么物理意义呢？

物理学中，**力和力的作用时间的乘积 Ft** 叫做**冲量**(impulse)，用 I 表示。在国际单位制中，冲量的单位是 N·s。由于力是矢量，冲量也是矢量，其方向跟力的方向相同。

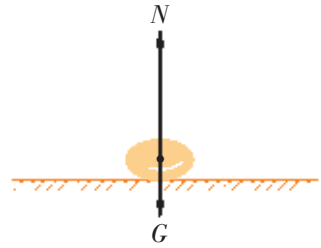


图 1–4　鸡蛋受到撞击时的受力示意图

物体的质量 m 和速度 v 的乘积 mv 叫做**动量**(momentum),用 p 表示。在国际单位制中,动量的单位是 kg·m/s。动量也是矢量,它的方向跟物体的速度方向相同。

上式可写成:

$$I = Ft = \Delta p$$

$F = \frac{\Delta p}{t}$ 是牛顿第二定律的最早表达式。

可见,**物体所受合力的冲量等于物体的动量变化**。这个结论叫做**动量定理**(theorem of momentum)。

讨论与思考

1. 运用动量定理分析:鸡蛋从高处落到海绵垫上时,为什么不会破碎。

2. 鸡蛋受到的合力是变力,还是恒力?如果是变力,那么上式中的 F 表示什么?

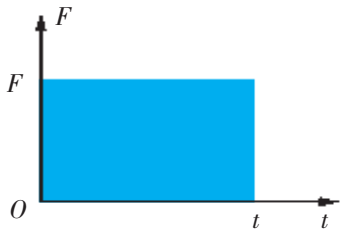


图 1–5　恒力 F 的冲量

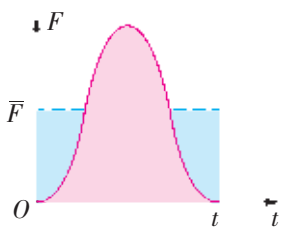


图 1–6　碰撞中的平均作用力

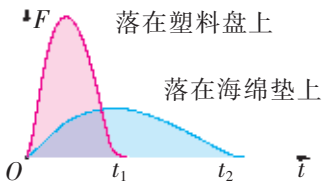


图 1–7　鸡蛋所受合力随时间的变化

多学一点　变力的冲量

如图 1–5 所示,冲量的大小也可以用 F–t 图像表示。当物体受到大小和方向不变的恒力作用时,F–t 图像是一条平行于 t 轴的直线,力 F 在 t 时间内的冲量大小在数值上等于图中蓝色矩形的“面积”。

当发生碰撞时,物体所受到的外力不是恒定的,而且作用时间也很短。在这极短的时间内,力先是急剧地增大,然后又急剧地减小为零,其大小变化情况如图 1–6 所示。可设想有一恒力 $\overline{F}$,它在 t 时间内的冲量与变力 F 在该段时间内的冲量大小相等,这个恒力 $\overline{F}$ 即为变力 F 在 t 时间内的平均值。

前面在分析鸡蛋的受力情况时,我们是把鸡蛋受到的合力当作恒力处理的,实际上这个合力是变力,如图 1–7 所示。由于两次碰撞中鸡蛋的动量变化量相等,因而它两次所受合力的冲量也相等,即两条 F–t 图像下方的“面积”相同。但鸡蛋与塑料盘的碰撞时间很短,受到的最大作用力很大,所以鸡蛋碎了;而落在海绵垫上的鸡蛋因碰撞时间较长,受到的最大作用力较小,因而安然无恙。

案例分析

案例　蹦床运动是一项扣人心弦的运动项目。运动员在一张

绷紧的弹性网上蹦跳、腾翻，做出各种惊险优美的动作(图 1–8)。现有一位质量为 50 kg 的运动员，从离水平网面 3.2 m 的高处自由落下，着网后沿竖直方向蹦回到离水平网面 5 m 的高处。若这位运动员与网接触的时间为 1.2 s，求网对运动员的平均作用力的大小(g 取 10 m/s^2)。



图 1–8　蹦床

分析　以运动员为研究对象，首先需分析运动员与网接触时的受力情况及接触前后的运动状态(图 1–9)。设竖直向上的方向为正方向。

由题意可知，这位运动员的质量 $m = 50$ kg，刚接触时的速度 $v_0 = -\sqrt{2gh}$，刚脱离接触时的速度 $v_t = \sqrt{2gh'}$，所受合外力的冲量 $Ft = (N - G)t$，接触前后的动量变化 $\Delta p = p_t - p_0 = mv_t - mv_0$。由动量定理即可求得网对运动员的平均作用力 N 的大小。

请你自行完成有关的计算。

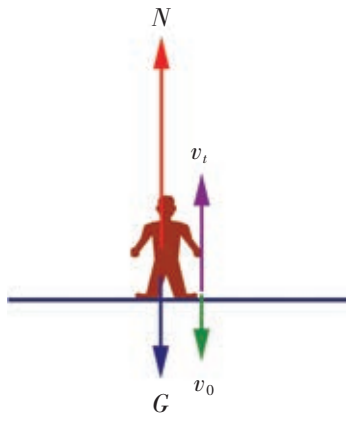


图 1–9　运动员与网接触时的受力情况及其前后的运动状态

动量定理的应用

动量定理在生产、生活中有着广泛的应用。

由动量定理可知，如果物体的动量变化一定，那么它受到的冲量也一定。因此作用时间越短，力就越大；作用时间越长，力就越小。

如图 1–10 所示，用铁锤钉钉子时，铁锤运动后具有较大的动量，由于它与钉子相碰的时间很短，可以对钉子产生较大的作用力，从而把钉子钉入木块中。



图 1–10　钉钉子

相反，有时则需要延长作用时间，以减小力的作用。赛车赛道边上，要设置用轮胎组成的防撞墙(图 1–11)。当赛车因故撞到轮胎上时，轮胎的良好弹性可使作用时间延长，从而减小赛车受到的冲击力。当我们从高处跳下，快要接触地面时，会本能地弯曲膝盖，其实也是不自觉地运用了同样的原理(图 1–12)。



图 1–11　赛车赛道的防撞墙



图 1–12　从高处跳下的人

你还能举出一些生活中应用动量定理的例子吗？

家庭作业与活动

1. 一个质量为 5 kg 的物体从离地面 20 m 的高处自由下落。不计空气阻力，试求在下落的这段时间内物体所受重力的冲量。
2. 如图 1–12 所示，一个质量为 60 kg 的人从高处跳下，落地时的速度为5 m/s，他本能地弯曲膝盖，经1 s后停下，求他受到地面的平均作用力(g取10 m/s²)
3. 质量为 5 kg 的小球以 5 m/s 的速度竖直落到地板上，随后以3 m/s的速度反向弹回。若取竖直向下的方向为正方向，则小球动量的变化为

   A. 10 kg·m/s　　B. −10 kg·m/s

   C. 40 kg·m/s　　D. −40 kg·m/s
4. 将纸带的一端压在装满水的饮料瓶底下，如图 1–13a 所示，用手慢慢地拉动纸带，可以看到瓶子跟着移动起来。拉紧纸带，用手指头向下快速击打纸带，可以看到纸带从瓶底抽出，而饮料瓶却平稳地停留在原处，如图 1–13b 所示。试说明产生上述现象的原因。



a



b

图 1–13

课题研究

组织“鸡蛋撞地球”的比赛

以小组为单位，在班上组织“鸡蛋撞地球”的比赛。要求让鸡蛋从 3 楼自由落下，着地后不会破碎。比赛要在老师的指导下进行，特别要注意安全。

对活动的评价可从以下几个方面考虑：

1. 实验的效果怎样；
2. 选用的材料是否符合经济、安全、取材便利等原则；
3. 对实验的现象能否做出令人信服的、科学的解释；
4. 小组的团队合作精神怎样。

1.2

探究动量守恒定律

两位同学在公园里划船。租船时间将到，她们把小船划向码头。当小船离码头大约 1.5 m 左右时，有一位同学心想：自己在体育课上立定跳远的成绩从未低于 2 m，跳到岸上绝对没有问题。于是她纵身一跳，结果却掉到了水里(图 1–14)。她为什么没有如她所想的那样跳到岸上呢？显然这里涉及人和船两个物体相互作用的问题。动量定理只反映了一个物体受力作用一段时间后的动量变化规律。当两个物体相互作用时，它们各自的动量怎样变化呢？



图 1–14　这位自信的同学为什么会掉到水里

探究物体碰撞时动量的变化规律

图 1–15 是小球碰撞的频闪照片，当左边的小球撞到右边的小球后，小球之间发生了多次碰撞，最终动量传递给了最右边的小球。那么，当小球碰撞时，它们的动量变化将遵循怎样的规律呢？

实验探究　探究物体碰撞时动量变化的规律

猜想与假设

为了使问题简化，这里先研究两个物体碰撞时动量变化的规律。

请写出你的猜想，并与同学讨论。

制定计划与设计实验

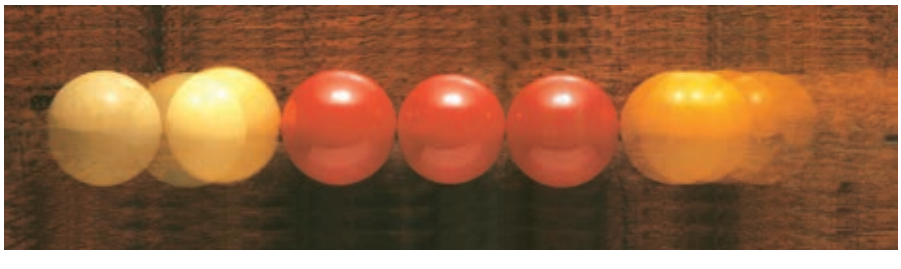


图 1–15　小球碰撞的频闪照片

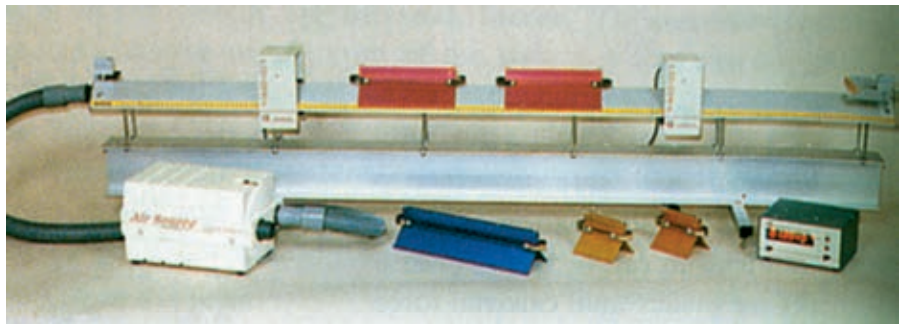


图 1–16　用气垫导轨研究物体间的碰撞

为了定量地研究这个问题，需要测量两个物体碰撞前后的动量。

你怎样设计实验？应选择哪些实验仪器和器材？需要测量哪些物理量？

请写出探究计划，设计出实验方案。

以下是用气垫导轨进行实验的三种方案，供你参考。

1. 使导轨上的一块滑块静止，推动另一块滑块去碰它（图 1–16），两滑块相碰后分开。

2. 使两块滑块相向运动，相碰后粘在一起。

3. 使一块滑块静止，推动另一块滑块去碰它，相碰后粘在一起。

你也可以根据自己制定的计划，选用 DIS 实验系统等来设计实验。

进行实验与收集证据

请写出主要实验步骤，设计出记录数据的表格，与同学组成小组，合作进行实验，记录实验中收集到的数据。

分析与论证

请写出处理数据的主要过程。

通过分析，你们小组得出的结论是什么？

评估

实验结论与你的猜想一致吗？

产生实验误差的原因是什么？你们是如何减小误差的？

你认为实验设计有什么不足？如何改进？

交流与合作

与其他小组交流、讨论，了解他们制定的探究计划和设计的

实验方案。你认为他们哪些方面值得学习？

请完成一份实验探究报告。

动量守恒定律

分析论证

如图 1–17 所示，在光滑的水平桌面上，有 A、B 两个木球在同一直线上做同方向的匀速运动，它们的质量分别是 m_1 和 m_2，速度分别是 v_1 和 v_2，且 $v_2 > v_1$。经过一定时间后 B 追上了 A，发生碰撞，此后 A、B 的速度分别变为 v_1' 和 v_2'。

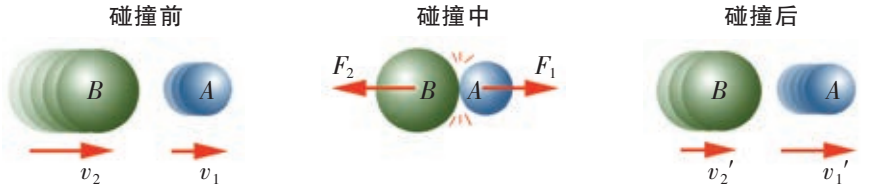


图 1–17　两球的碰撞过程

1. 请你分别写出两球在碰撞前后的总动量：

碰撞前：　$p_1 + p_2 =$

碰撞后：　$p_1' + p_2' =$

2. 根据动量定理和牛顿第三定律，分析两球碰撞前后总动量之间有什么关系。

实验探究和理论分析都表明：两物体在碰撞前后总动量的大小、方向均不变。但这个结论的成立是有条件的。

在物理学中，把几个有相互作用的物体合称为**系统**(system)，系统内物体间的相互作用力叫做**内力**(internal force)，系统外的物体对系统内物体的作用力叫做**外力**(external force)。上面两个木球在碰撞过程中就组成了一个最简单的系统，该系统受到的外力有重力和支持力，但它们彼此平衡，即系统所受外力的合力为零，这就是上述结论成立的条件。于是，我们得到：

如果一个系统不受外力，或者所受合外力为零，那么这个系统的总动量保持不变。这个结论叫做**动量守恒定律** (law of conservation of momentum)。

动量守恒定律和能量守恒定律一样，是自然界最普遍、最基本的规律之一。它比牛顿运动定律的适用范围更广，不仅适用于

宏观、低速领域，而且适用于微观、高速领域。小到微观粒子，大到天体，无论内力是什么性质的作用力，动量守恒定律总是适用的。

案例分析



图 1–18　保龄球

案例　如图 1–18 所示，一只质量为 5.4 kg 的保龄球，撞上一只质量为 1.7 kg、原来静止的球瓶，此后球瓶以 3.0 m/s 的速度向前飞出，而保龄球以 1.8 m/s 的速度继续向前运动，求保龄球碰撞前的运动速度。

分析　保龄球与球瓶碰撞时的相互作用力是内力，并且远大于系统所受的合外力，因此合外力可以忽略不计，满足动量守恒定律的适用条件。

保龄球的质量 $m_1 = 5.4\ \text{kg}$，球瓶的质量 $m_2 = 1.7\ \text{kg}$。设碰撞前保龄球的速度为 v_1，球瓶的速度 $v_2 = 0$，两者组成的系统的总动量 $p = m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1$。

碰撞后保龄球的速度 $v_1' = 1.8\ \text{m/s}$，球瓶的速度 $v_2' = 3.0\ \text{m/s}$，系统的总动量 $p' = m_1 v_1' + m_2 v_2'$。

请你自己完成有关的计算。

现在，你应该能用动量守恒定律分析本节开始时提出的问题了，那位同学为什么没有如她所想的那样跳上岸？

信息浏览



笛卡儿　(R. Descartes，1596—1650)，法国哲学家、数学家、物理学家。解析几何的奠基人之一。

动量守恒定律的发现历程

早在 17 世纪，法国科学家笛卡儿首先对运动守恒进行了探讨。他把物体的质量大小和速度的乘积定义为“运动量”。当时科学界还没有对质量的概念做出明确的定义，实际上他已经把动量作为运动的量度。1644 年，笛卡儿提出了运动量守恒的结论。他还具体地总结出了 7 条碰撞定律，但由于他不了解动量的矢量性，所以其中的 5 条是错误的。

荷兰物理学家惠更斯(C. Huygens)从 1652 年起对笛卡儿的碰撞定律产生了怀疑。他通过对碰撞的探索，明确指出了动量的矢量性，并于 1669 年提出了动量守恒定律的完整表述：“两个物体所具有的运动量在碰撞中都可以增多或减少，但是它们的量值在同一方向的总和却保持不变，如果减去反方向的运动量的话。”

家庭作业与活动

1. 一个质量为 60 kg 的人，以 5.0 m/s 的水平速度跳到一条静止在水面、质量为 120 kg 的小船上。小船将以多大的速度离岸而去(水的阻力忽略不计)?
2. 如图 1–19 所示，在水平桌面上有 A、B 两辆静止的小车，质量分别是 0.5 kg 和 0.2 kg。两车用细线拴在一起，中间有一被压缩的弹簧。剪断细线后，两车被弹开，小车 A 以 0.8 m/s 的速度向左运动，那么小车 B 的速度多大?方向如何？请你将此题改成一个验证动量守恒定律的实验，并把实验方案写出来，与同学交流。
3. 如图 1–20 所示，在风平浪静的水面上停着一条帆船，船尾有一台电风扇，正把风水平地吹向帆面。船能向前行驶吗？为什么？

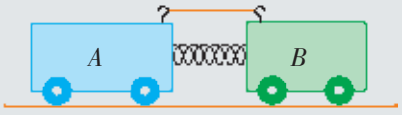


图 1–19



图 1–20

课题研究

估测子弹的射出速度

如图 1–21 所示，取一只乒乓球，在球上挖一个圆孔，向球内填进一些橡皮泥或碎泡沫塑料，放在桌子的边缘处。用玩具枪水平瞄准球的圆孔，扣动板机，让子弹射入孔中，与乒乓球一同水平抛出。只需测出球的质量 M、子弹的质量 m、桌面的高度 h 和乒乓球落地点离桌子边缘的水平距离 s，就可估算出玩具枪子弹的射出速度 v。你能推导出计算速度 v 的表达式吗？试着做一做这个实验。

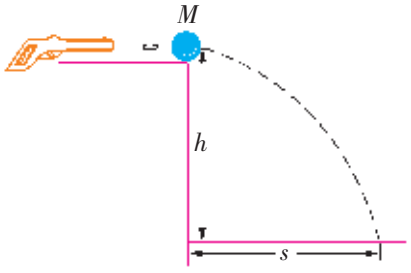


图 1–21

安全告诫：
实验中注意安全，不要把枪口对着人!



图 1–22　碰碰车

1.3 动量守恒定律的案例分析



图 1–23　缤纷的礼花

用动量守恒定律来研究碰撞、爆炸等问题时(图 1–22、图 1–23),只需考虑物体初、末状态的动量,因此往往比运用牛顿运动定律更为简便。下面来分析几个具体案例。

分析碰碰车的碰撞

案例　如图 1–24 所示,在游乐场上,两位同学各驾着一辆碰碰车迎面相撞,此后,两车以共同的速度运动。设甲同学和他的车的总质量为 150 kg,碰撞前向右运动,速度的大小为 4.5 m/s;乙同学和他的车的总质量为 200 kg,碰撞前向左运动,速度的大小为 3.9 m/s。求碰撞后两车共同的运动速度。

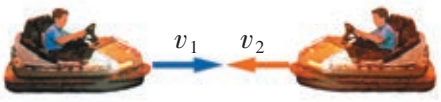


图 1–24　碰碰车的碰撞示意图

分析　本题的研究对象为两辆碰碰车（包括驾车的同学)组成的系统,在碰撞过程中此系统中的内力远远大于系统所受到的合外力,合外力可以忽略不计,满足动量守恒定律的适用条件。

设甲同学的车碰撞前的运动方向为正方向，他和车的质量 $m_1 = 150\ \text{kg}$，碰撞前的速度 $v_1 = 4.5\ \text{m/s}$；乙同学和车的质量 $m_2 = 200\ \text{kg}$,碰撞前的速度 $v_2 = -3.9\ \text{m/s}$。

设碰撞后两车的共同速度为 v,则系统碰撞前的总动量为

$$p = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

碰撞后的总动量为

$$p' = (m_1 + m_2)v$$

根据动量守恒定律可求得 v，v 的符号表示速度的方向。

请自行完成计算。

请思考：假如这两辆碰碰车碰撞后没有以共同的速度运动,而是各自朝着相反的方向运动,你打算怎样分析这种情况？你的依据是什么？

探究未知粒子的性质

为探究未知粒子的性质，物理学家常用加速后的带电粒子去轰击它们，这时常要运用动量守恒定律。

案例　一质子以 1.0×10^7 m/s 的速度向右与一个静止的未知核碰撞。已知质子的质量是 1.67×10^{-27} kg，碰撞后质子以 6.0×10^6 m/s 的速度反向弹回，未知核以 4.0×10^6 m/s 的速度向右运动（图 1–25）。试确定未知核的“身份”。

分析　以质子和未知核组成的系统作为研究对象。它们碰撞时，系统的动量守恒。设质子碰撞前的运动方向为正方向，则其碰撞前的速度 $v_1 = 1.0 \times 10^7$ m/s，碰撞后的速度 $v_1' = -6.0 \times 10^6$ m/s，质量 $m_1 = 1.67 \times 10^{-27}$ kg 。设未知核的质量为 m_2，碰撞前的速度 $v_2 = 0$，碰撞后的速度 $v_2' = 4.0 \times 10^6$ m/s 。



图 1–25　质子与未知核碰撞

解答　根据动量守恒定律

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

有
$$m_2 = \frac{m_1(v_1 - v_1')}{v_2' - v_2}$$

$$= \frac{1.67 \times 10^{-27} \times [1.0 \times 10^7 - (-6.0 \times 10^6)]}{4.0 \times 10^6 - 0} \text{ kg}$$

$$= 6.68 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

对照元素周期表，可知该未知核是氦核。

研究反冲现象

如图 1–26 所示，用一木夹夹住笔的尾部，轻敲笔的被夹部分，使两者突然分开，这时会看到木夹和笔各自向着相反的方向运动。

在物理学中，把物体系统的一部分向某方向运动，而其余部分向相反方向运动的现象叫做**反冲**（recoil）。研究反冲现象的重要依据就是动量守恒定律。喷气式飞机和火箭的飞行都属于反冲现象。图 1–27 所示的是使用液体燃料的火箭，这种火箭一般用液氢做燃料，用液氧做氧化剂。燃料和氧化剂在燃烧室内混合后点火燃烧，产生的高温高压燃气从尾喷管迅速向下喷出。由于反冲，火箭就向空中飞去。

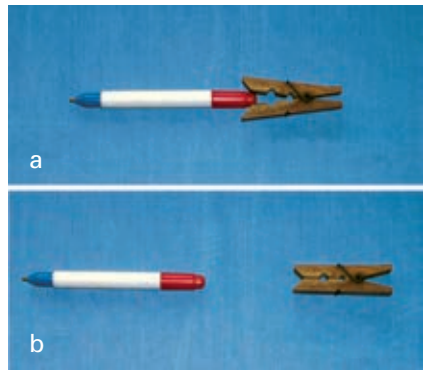


图 1–26　反冲现象

案例　一火箭喷气发动机每次喷出 $m = 200$ g 的气体，

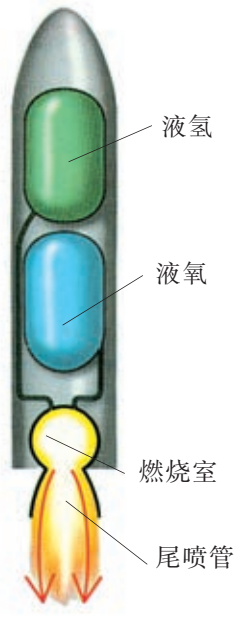


图 1–27　火箭

喷出的气体相对地面的速度 $v = 1000$ m/s。设此火箭初始质量 $M = 300$ kg，发动机每秒喷气 20 次，在不考虑地球引力及空气阻力作用的情况下，火箭发动机 1 s 末的速度是多大？

分析　在不考虑地球引力及空气阻力作用的情况下，火箭与气体组成的系统动量守恒。

以火箭和它在 1 s 内喷出的气体为研究对象。设火箭 1 s 末的速度为 v'，1 s 内共喷出质量为 20 m 的气体，以火箭前进的方向为正方向。

由动量守恒定律得

$$(M - 20\ m)v' - 20\ mv = 0$$

解得 $v' = \dfrac{20\ mv}{M - 20\ m} = \dfrac{20 \times 0.2 \times 1000}{300 - 20 \times 0.2}$ m/s = 13.5 m/s

即火箭发动机 1 s 末的速度大小是 13.5 m/s。

以上只是一种近似的处理方法，火箭的实际运动情况要复杂得多，有兴趣的同学可到图书馆或上网查找有关的资料。

讨论与思考

1. 节日的礼花在空中爆炸后，为什么会散开形成美丽的对称图案（图 1–23）？

2. 有位同学在学习了动量守恒定律后，归纳出运用动量守恒定律分析、解决问题的步骤如下：

（1）确定要研究的系统，判断该系统是否符合动量守恒的条件；

（2）设定正方向；

（3）确定系统在初状态和末状态时的总动量；

（4）运用动量守恒定律列出式子求解。

请你对他的归纳进行评价。

家庭作业与活动

1. 一位质量为 50 kg 的同学一路小跑，以 5 m/s 的速度跳上一块静止的滑板后，以 4 m/s 的速度站在滑板上向前运动。求滑板的质量。
2. 一颗质量为 35 g 的子弹，以 475 m/s 的速度水平射向静止在水平面上的、质量为 2.5 kg 的木块，子弹射穿木块后速度降为 275 m/s。求木块的运动速度。
3. 一个不稳定的原子核，质量为 M，处于静止状态。当它以速度 v 释放出一个质量为 m 的粒子后，原子核剩余部分的速度多大？

1.4 美妙的守恒定律

1666年，有人在英国皇家学会表演了如图 1–28 所示的实验：把 A、B 两个质量相等的硬木球并排挂在一起，然后把 A 球向左拉开，再松手，它向右摆动，到达原先的平衡位置时跟 B 球发生碰撞。碰撞后，A 球立即停止，B 球向右摆去，摆到与刚才 A 球开始摆动时差不多的高度，又向左摆动，跟 A 球相撞，这时 B 球立即停止，而 A 球向左摆去……如此往复。

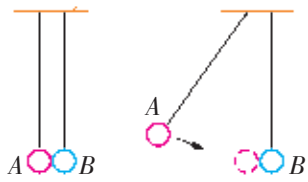


图 1–28　英国皇家学会的悬赏征答题

当时许多科学家对这一现象百思不得其解。1668 年，英国皇家学会正式悬赏征答，结果有 3 人提交了应征论文，其中荷兰物理学家惠更斯对这个现象做出了比较完整的分析。他在研究中发现，这两个球相撞时，除了动量守恒外，还有一个物理量也是守恒的。那么，这个守恒量又是什么呢？

原来，要解决碰撞问题，除了要考虑碰撞前后的动量外，还要考虑动能是否守恒的问题。

研究碰撞中的动能

分析论证

某同学在做 1.2 节的实验探究时，在其中两个项目（即第 12 页上的方案 3 和方案 1）的研究中分别得到了两组数据，如表 1 和表 2 所示。请根据实验数据，计算这两个项目中滑块碰撞前后的总动能，并进行比较。你有什么发现吗？

表 1　关于两块滑块碰撞后粘合在一起的实验记录

序号	m_1/kg	m_2/kg	碰撞前		碰撞后	
			m_1 的速度 v_1/m·s^{-1}	动能 E_{k1}/J	$(m_1 + m_2)$的速度 v/m·s^{-1}	动能 E_k/J
1	0.220	0.220	0.499		0.248	
2	0.240	0.220	0.271		0.140	

表 2　关于两块滑块碰撞后分开的实验记录

序号	m_1/kg	m_2/kg	碰撞前		碰撞后		
			m_1 的速度 v_1/m·s^{-1}	动能 E_{k1}/J	m_1 的速度 v_1'/m·s^{-1}	m_2 的速度 v_2'/m·s^{-1}	总动能 E_k'/J
1	0.220	0.220	0.354		0	0.351	
2	0.300	0.220	0.321		0.045	0.360	

你最好用自己的实验数据进行分析论证。

从表 1 的数据可以看出：两滑块碰撞前后的总动能并不相等。

而从表 2 的数据可以看出：在实验误差允许的范围内，两块滑块碰撞前后的总动能几乎相等。

由此可见，由两块滑块组成的系统在碰撞过程中动量总是守恒的，但动能却不一定守恒。

在物理学中，把动量和动能都守恒的碰撞，叫做**弹性碰撞**(elastic collision)，而把动能不守恒的碰撞叫做**非弹性碰撞**(inelastic collision)。

硬质木球、钢球等物体之间发生碰撞时，动能的损失很小，因此在通常情况下可以把它们当成弹性碰撞处理。真正的弹性碰撞只有在分子、原子以及更小的微观粒子之间才会发生。

通常情况下，发生非弹性碰撞时，物体的内部状态会发生变化，如物体发热、变形(不能恢复)或破裂等。这说明有一些机械能转化成了其他形式的能，因此碰撞前后的动能也就不守恒了。

有一种比较特殊的非弹性碰撞：两物体碰撞后“合”为一体，以同一速度运动，这种碰撞叫做**完全非弹性碰撞**(completely inelastic collision)，如两个橡皮泥小球的碰撞，人跳到运动中的车上等。

研究弹性碰撞

分析论证

如图 1–29，质量分别为 m_1、m_2 的 A、B 两钢球置于光滑水平面上，A 球的速度为 v_1，B 球的速度为零。设两球发生弹性碰撞。

在碰撞的第一阶段，两球接触后均被压缩而发生形变，由此产生弹力，使 A 球减速，使 B 球加速，直到两球速度相等(即相对速度为零)，这一阶段称为压缩阶段。在压缩阶段，系统的动能逐

渐减少，而弹性势能逐渐增加。当两球的速度相等时，系统的弹性势能达到最大，而动能减至最小。但是在整个过程的任一时刻，系统的机械能保持不变。

在碰撞的第二阶段，由于两球间的弹力作用，A 球继续减速，B 球继续加速，使 B 球的速度大于 A 球的速度，两球的形变逐渐减小。当两球即将分离的瞬间，形变完全消失。这一阶段称为恢复阶段。在恢复阶段，系统的弹性势能逐渐减少，动能逐渐增加。当形变完全消失时，系统的弹性势能为零，而动能重新达到最大。

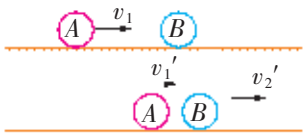


图 1–29　两球的碰撞

由上述分析可知：系统末态的总动能应等于初态的总动能，故有

$$\frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \tag{1}$$

由于系统所受合外力为零，系统的动量守恒，故可得

$$m_1 v_1' + m_2 v_2' = m_1 v_1 \tag{2}$$

由(1)、(2)两式解得

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

根据上面的式子，思考并讨论：

1. 在什么情况下，v_1'跟 v_1方向相同？

2. 在什么情况下，v_1'跟 v_1 方向相反？

3. 在什么情况下，碰撞后两球速度互换？（这正是英国皇家学会悬赏征答的问题。）

多学一点　研究斜碰问题

两球在碰撞前的相对速度不沿两球球心连线的碰撞叫做斜碰。

在台球比赛中，我们经常欣赏到精彩的斜碰事例（图 1–30）。研究斜碰问题时，运用正交分解法较为方便。斜碰也可分为弹性碰撞和非弹性碰撞两类。



图 1–30　台球中的斜碰事例

如图 1–31 所示，我们用红色球 A 撞击静止的蓝色球 B。把 A、B 两球看作一个系统，在斜碰中，动量守恒，在 v_1 的方向上和垂直于 v_1 的方向上，动量都应守恒，因而有

$$m_A v_1 = m_A v_A \cos\alpha + m_B v_B \cos\beta$$

$$m_A v_A \sin\alpha = m_B v_B \sin\beta$$

又因 A、B 两球的碰撞可视为弹性碰撞，故动能也守恒：

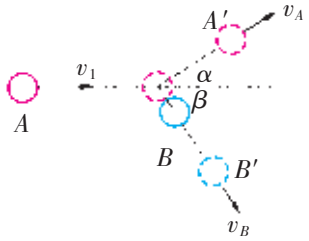


图 1–31　两球的斜碰

$$\frac{1}{2}m_A v_1^2 = \frac{1}{2}m_A v_A^2 + \frac{1}{2}m_B v_B^2$$

若 $m_A = m_B$，则 $v_1^2 = v_A^2 + v_B^2$，$\alpha + \beta = 90°$

即碰撞后两球沿着互成 90°角的方向运动。

用相同的方法，可以对其他斜碰问题进行分析。

自然之美——物理学中的守恒定律

自然界虽然千变万化，但总是遵循着一定的规律，守恒定律就是其中的一部分。在中学物理中，我们学过的守恒定律有：机械能守恒定律、动量守恒定律、电荷守恒定律、质量守恒定律、能量守恒定律等。随着学习的深入，我们对各种守恒定律的理解将更加深刻。

物理学中的守恒定律闪耀着自然美的光辉。

物理学的每一条守恒定律都用极其精炼的语言将内涵丰富的自然规律表述出来，表现出物理学的简洁美。

通过进一步的学习，你还将发现，物理学的每一条守恒定律都对应于自然界中的一种对称关系，反映着自然界的一种对称美。

物理学的每一条守恒定律中都有一个守恒量，这反映了各种运动形式间的联系和统一，表现出物理学的和谐统一美。

物理学中许多新事物的预言及新理论的建立，无不闪耀着守恒思想的光辉。例如，英国物理学家查德威克(J. Chadwick)运用动量守恒定律和能量守恒定律，成功地发现了中子；瑞士籍奥地利物理学家泡利(W. Pauli)以能量守恒定律为依据，预言了中微子的存在。

家庭作业与活动

1. 本章图 1–1a 所示的实验装置叫做“牛顿摇篮”。根据实验现象，你能判断出小球的碰撞是弹性碰撞，还是非弹性碰撞吗？为什么？
2. 现有甲、乙两滑块，质量分别是 $3m$ 和 m，以相同的速率 v 在光滑水平面上相向运动，发生了碰撞。已知碰撞后，甲滑块静止不动，那么这次碰撞是

A. 弹性碰撞
B. 非弹性碰撞
C. 完全非弹性碰撞
D. 条件不足，无法确定

3. 如图 1–32 所示，有一摆长为 L 的单摆，摆球 A 自水平位置摆下，在摆的平衡位置与置于光滑水平面上的 B 球发生弹性碰撞，导致后

者又跟置于同一水平面的 C 球发生完全非弹性碰撞。假设 A、B、C 球的质量均为 m，那么

(1) A、B 球碰撞后 A 球的速度为多大?

(2) B、C 球碰撞后它们的共同速度多大?

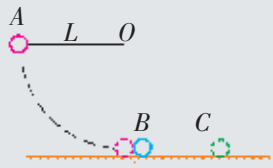


图 1–32

课题研究

有趣的碰撞

用两根光滑的钢棒(或较粗的铁丝)组装成水平轨道，架在两个凳子上，并固定起来。轨道上放置 A、B 两组质量相等的玻璃球，如图 1–33 所示。每次分别拨动 A 组的 1 个、2 个或 3 个球去碰撞 B 组的玻璃球。实验之前，你先猜想一下会出现什么现象。然后通过实验，看看实际现象与你的猜想是否一致，并运用所学的知识解释。

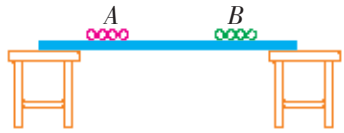


图 1–33

1.x

第 1 章家庭作业与活动

1. 跳远时，为什么跳在沙坑里比跳在混凝土路面上安全？钉钉子时，为什么要用铁锤而不用橡皮锤？
2. 一个质量为 0.2 kg、以 10 m/s 的速度飞来的网球被球拍击中，并以 20 m/s 的速度弹回，网球与球拍相接触的时间为 0.1 s，试求：

   (1) 网球动量的变化；

   (2) 球拍对网球的平均作用力。
3. 一位同学在用气垫导轨探究动量守恒定律时，测得滑块 A 的质量为 0.355 kg，它以 0.095 m/s 的速度水平向右撞上同向滑行的滑块 B，B 的质量为 0.710 kg，速度大小为 0.045 m/s，碰撞后滑块 A 以 0.045 m/s 的速度继续向前运动。求滑块 B 的滑行速度。
4. 质量分别为 m_1、m_2 的小球碰撞后在同一直线上运动，它们在碰撞前后的 s–t 图像如图 1–34 所示。若 $m_1 = 1$ kg，则 m_2 等于多少？
5. 图 1–35 所示的是一门旧式大炮，炮车和炮弹的质量分别是 M 和 m，炮筒与地面的夹角为 α，炮弹出口时相对于地面的速度为 v。不计炮车与地面的摩擦，求炮身向后反冲的速度 V。

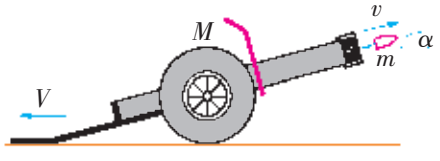


图 1–35

6. 如图 1–36 所示，把一辆质量为 0.5 kg 的电动玩具车放在质量为1 kg的小车上。当接通玩具车的电源，使它相对于小车以 0.5 m/s 的速度运动时，小车如何运动？

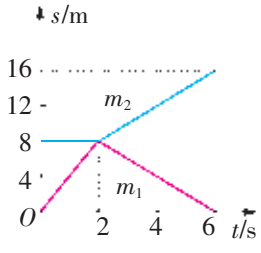


图 1–34

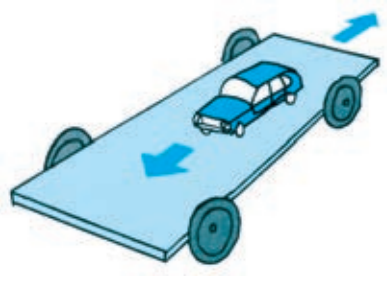


图 1–36

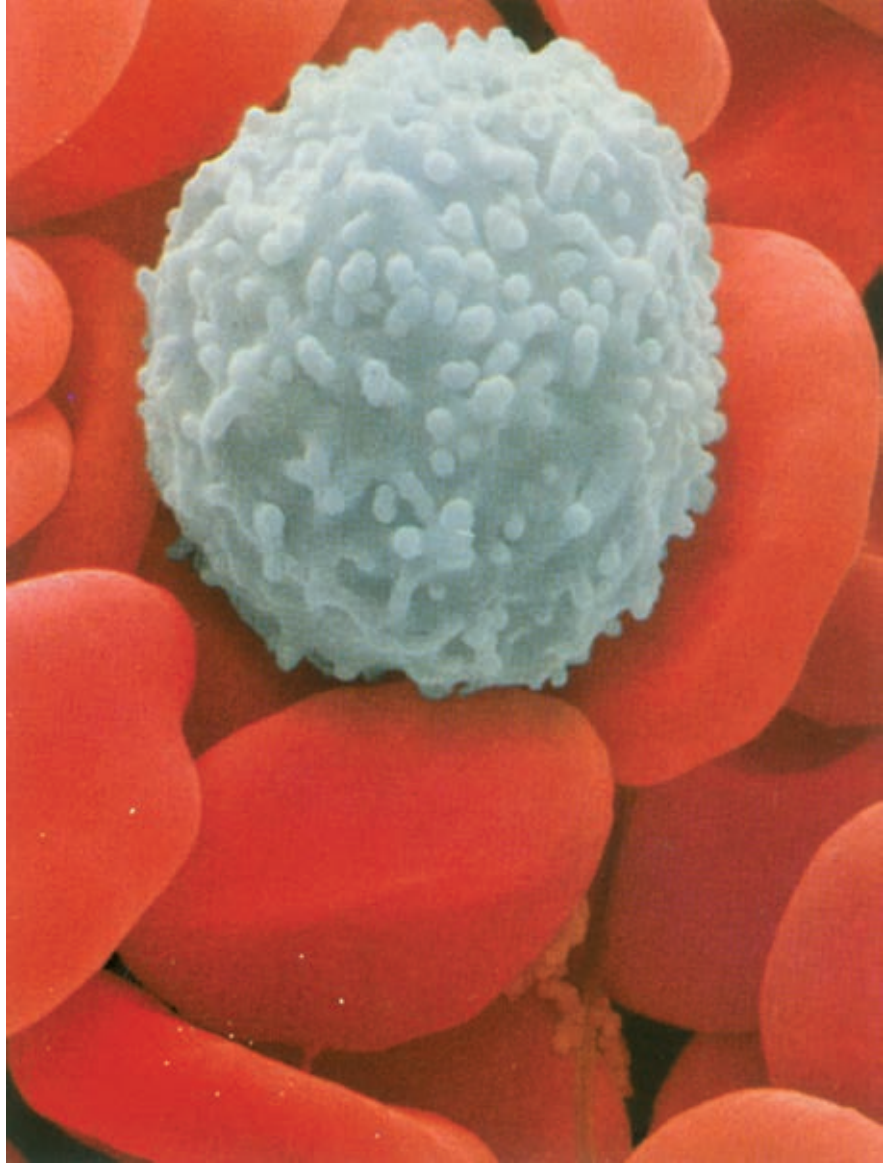


图 2–1　扫描电子显微镜下的血红细胞与白细胞

第 2 章
波和粒子

扫描电子显微镜(scanning electron microscope,简称 SEM)被生物学家广泛应用于观察细胞的表面,它可生成极其详细生动的三维图像。在图 2–1 所示的假彩色照片中,圆盘状的血红细胞和球状的白细胞可被清晰地分辨出来。扫描电子显微镜利用了电子的波动性,以电子束代替光束在微观世界中探幽入微,我们不禁要问:

电子究竟是粒子,还是波?

光会不会也具有粒子性?

本章将循着物理学家探索的足迹,追溯量子假设提出的缘由,认识光和电子等的波粒二象性,了解量子力学的基本观点。

2.1

拨开黑体辐射的疑云

到19世纪末,经典物理学历经300年的发展,已达到完善、成熟的阶段。不少物理学家都认为:辉煌的物理学大厦已经建成,剩下的只是进一步精细化的工作,如在一些细节上作些补充和修正,使各个物理学常量测得更精确一些。但这时,物理学晴朗的天空中飘着的两朵“乌云”影响了物理学家们的好心情。第一朵与以太的零漂移实验有关,相对论对此作出了圆满的回答。第二朵“乌云”是什么?物理学家又是怎样拨开它的呢?

第二朵“乌云”——“紫外灾难”

这朵“乌云”源于对热辐射的研究。

实验表明,物体在任何温度下,都会发射电磁波,温度不同,所发射的电磁波的频率、强度也不同。物理学中把这种现象叫做**热辐射**(heat radiation)。

当物体的温度较低时,热辐射的波长主要落在红外区域,如人体表面温度只有36 ℃左右,在黑暗中我们看不到前面的人,但可以用红外夜视仪或红外照相机观察到(图2-2);当物体的温度



图2-2 人体的红外照片



图2-3 燃烧的炭块

升高时，它辐射的可见光所占份额增大，如燃烧的炭块会发出醒目的红光（图 2–3）；温度很高的物体（如太阳）能发出炽热的白光。

请思考：如图 2–4 所示，当通过白炽灯灯丝的电流逐渐变大时，灯丝的颜色和亮度怎样变化？这说明灯丝辐射出的电磁波的波长、强度跟温度有怎样的关系？



图 2–4　通有不同大小电流的灯泡发光情况

辐射本领的意思是，在单位时间内，从黑体的单位面积上、波长 λ 附近单位波长范围内所辐射出的能量。

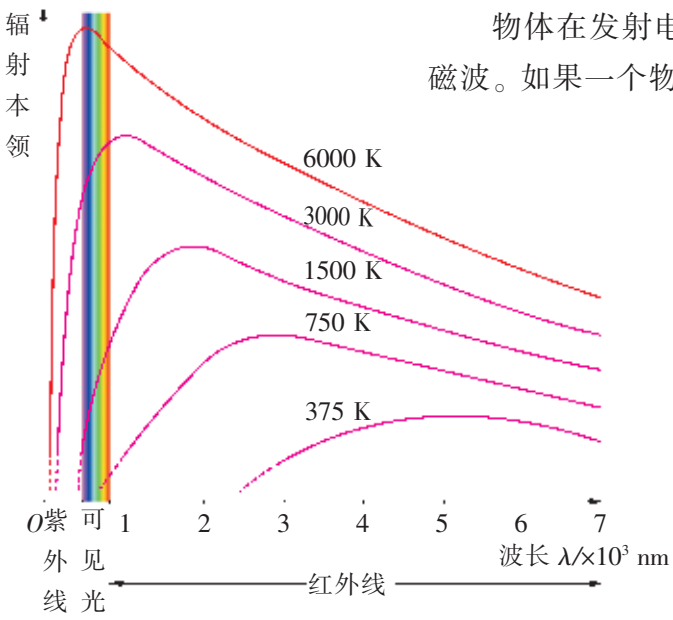


图 2–5　不同温度下黑体辐射本领与波长的关系

物体在发射电磁波的同时，还会吸收和反射外界射来的电磁波。如果一个物体能完全吸收投射到其表面的电磁波而不产生反射，我们称之为**绝对黑体**（ideal blackbody），简称黑体。它的热辐射规律最为简单，19 世纪末许多物理学家对此进行了大量研究。他们首先通过实验得到了黑体的辐射本领跟波长的关系，图 2–5 反映了这种关系在不同温度下的情况。该图表明：随着温度的升高，一方面黑体辐射各种波长电磁波的辐射本领都有所增大；另一方面辐射本领的最大值向波长较短的方向移动。

如何从理论上解释黑体辐射的实验规律呢？

1896 年，德国物理学家维恩（W. K. Wien）从热力学理论出发，得到了一个公式，但它只是在短波部分与实验相符，而在长波部分与实验存在明显的差异（如图 2–6 中的黑色虚线）。1900 年，英国物理学家瑞利（J. Rayleigh）从经典电磁理论出发推导出一个公式，其预测结果如图 2–6 中蓝线所示，在长波部分与实验吻合，在短波部分偏差较大，尤其在紫外线一端，当波长趋于零时，辐射本领将趋于无穷大，显然这是荒谬的，这种情况被人们称为“紫外灾难”。

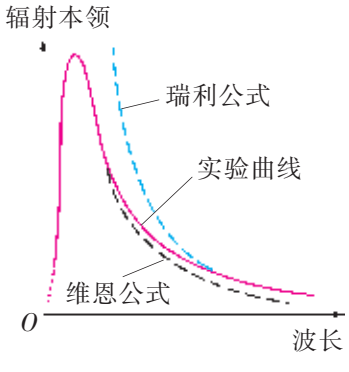


图 2–6　辐射本领与波长的关系

多学一点 什么样的物体可以看成黑体

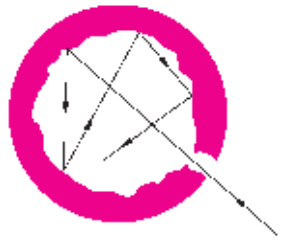
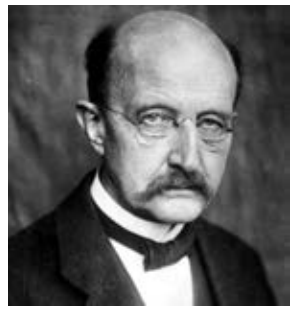


图 2–7 近似的黑体

如图 2–7 所示，在一个密闭空腔上开一小孔，外面的光线一旦从小孔射入，就会在空腔内壁来回反射，实际上没有机会再从小孔逃出来，即任何辐射都将有来无回，完全被吸收掉，因此可把这一空腔近似看成黑体。黑体看上去不一定是黑的，只有当自身辐射的可见光非常微弱时看上去才是这样。有些可看作黑体的物体由于有较强的辐射，看起来还会很明亮，如炼钢炉口上的小孔。一些发光的物体（如太阳、白炽灯灯丝）也被当作黑体来处理。

普朗克假设驱“乌云”



普朗克（M. Planck，1858—1947），德国物理学家。因为发现能量子而对物理学的发展做出杰出贡献，于 1918 年荣获诺贝尔物理学奖。

德国物理学家普朗克对黑体辐射问题进行了系统的理论研究，他结合有关实验证据，于 1900 年 10 月推导出了普朗克公式。德国实验物理学家鲁本斯（H. Rubens）把它与实验数据进行了比较，发现与实验结果“令人满意地相符”。

为了寻求这一公式的理论基础，普朗克提出了革命性的能量子假设。1900 年 12 月 14 日普朗克在德国物理学会会议上宣读了论文《关于正常光谱的能量分布定律的理论》，公布了自己的研究结果，这一天便成了量子论的诞生日。

普朗克设想，黑体的空腔壁是由大量振子组成的，其能量 E 只能是某一最小能量值 $h\nu$ 的整数倍，即 $E = nh\nu(n = 1,2,3,\cdots)$，式中 ν 为振子的频率，h 是一个常量，叫做**普朗克常量**（Planck constant），实验测得

$$h = 6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$$

普朗克指出：只有认为振子辐射或吸收的能量是不连续的，理论计算的结果才能与实验事实相符。这样的一份最小能量 $h\nu$ 叫做**能量子**（quantum of energy）。在微观世界中能量不能连续变化，只能取分立值，这种现象叫做**能量的量子化**（quantization of energy）。

> 我们采取这种看法……并且这是整个计算中最重要的一点……认为能量 E 是由一些完全确定的、有限而又相等的部分组成的。
>
> ——普朗克

请思考：量子论关于能量的观点与经典物理学的观点有什么不同？请结合图 2–8，与同学们交流体会。

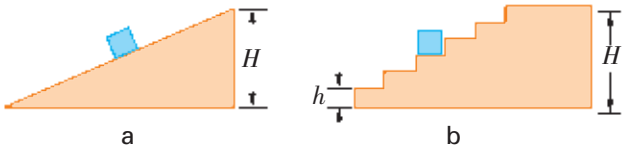


图 2–8 关于能量变化的两种观点

案例分析

案例　某红光的波长为 6.35×10^{-7} m，求其能量子的值。

分析

根据公式 $\nu = \frac{c}{\lambda}$ 和 $E = h\nu$，可求得能量子的值

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3.0 \times 10^{8}}{6.35 \times 10^{-7}}\ \text{J} = 3.13 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

能量子的值非常小，在宏观世界里一般观测不到能量子的效应，可认为能量是连续的，因此经典物理学能很好地解释宏观世界的运动规律。但当人们的视野深入到原子以下的微观世界时，就必须考虑能量的量子化。在后续几节的学习中，我们对此将有更深刻的体会。

普朗克的能量子假设，使人类对微观世界的本质有了全新的认识，对现代物理学的发展产生了革命性的影响。普朗克常量 h 是自然界最基本的常量之一，它体现了微观世界的基本特征。

这个发现将人类的观念，不仅是有关经典科学的观念，而且是有关通常思维方式的观念的基础砸得粉碎。

——玻尔

信息浏览

普朗克与量子论

由于普朗克的能量子假设与经典物理学理论格格不入，当时物理学界对普朗克的工作普遍认识不足。人们虽承认与实验相符的普朗克公式，却不能接受他的能量子假设。普朗克本人也对他的能量子假设惴惴不安，总想回到经典物理学理论的立场。

1911年，普朗克认为，能量仅在发射过程中才是量子化的，而吸收完全是连续进行的；1914年，他干脆取消了能量子假设，认为发射过程也是连续的。后来他回忆起这一段经历时，百感交集："企图使基本作用量子与经典理论调和起来的这种徒劳无益的打算，我持续了很多年（直到1915年），它使我付出了巨大的精力。我的许多同事认为这近乎是一个悲剧，但是我对此有不同的感觉，因为我由此而获得的透彻的启示是更有价值的。我现在知道了这个基本作用量子在物理学中的地位远比我最初所想象的要重要得多，并且承认这一点使我清楚地看到在处理原子问题时引入一套全新的分析方法和推理方法的必要性。"

家庭作业与活动

1. 炼钢工人通过观察炼钢炉内的颜色，就可以估计出炉内的温度，这是根据什么道理？
2. 对应于 3.4×10^{-19} J 的能量子，其电磁辐射的频率和波长各是多少？它是什么颜色的？
3. 人体表面辐射本领的最大值落在波长为940 μm处，它对应的是何种辐射？能量子的值为多大？

2.2

涅槃凤凰再飞翔

19 世纪 60 年代，麦克斯韦(J. C. Maxwell)提出电磁场理论，19世纪 80 年代赫兹(H. R. Hertz)用实验验证了这一理论，光的波动说取得了胜利。但同时赫兹还发现了用光的波动说无法解释的现象——光电效应。

光电效应

1887年，赫兹在做证实麦克斯韦理论的火花放电实验时意外地发现：当接收电磁波的电极受到紫外线的照射时，火花放电就更容易产生。他在《紫外光对放电的影响》一文中，对此现象做了如实记载。

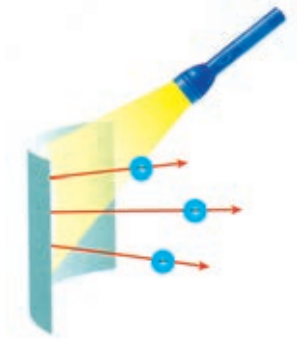


图 2–9　光电效应现象

该文发表后，许多物理学家对此进行了深入研究。英国物理学家 J·J·汤姆生(J. J. Thomson)、德国物理学家勒纳(P. Lenard)等人通过实验认识到：当光照射到金属表面上时，金属内部的自由电子会从表面逃逸出来(图 2–9)。

在光的照射下物体发射电子的现象叫做**光电效应**(photoelectric effect)，发射出来的电子叫做**光电子**(photoelectron)。

实验探究　探究光电效应产生的条件

如图 2–10 所示，取一块锌板，用砂纸将其一面擦一遍，去净表面的氧化层，连接在验电器上。设法给锌板带上负电，验电器的

锌板表面极易氧化，每次实验前都应该用砂纸擦一遍。

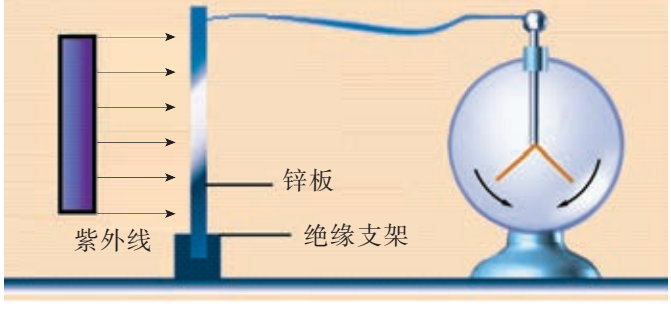


图 2–10　光电效应实验

箔片张开。

1. 用紫外线灯照射锌板擦净的一面，验电器的箔片张角有何变化？

2. 在紫外线灯和锌板间插入一块玻璃，验电器的箔片张角有何变化？

3. 用白炽灯照射锌板擦净的一面，验电器的箔片张角有何变化？设法增加白炽灯的亮度，情况有无改变？

从上述实验中，你能得到什么结论？

请思考并讨论：实验中为什么要给锌板带上负电？带正电行吗？如果不给锌板带电，怎样才能观察到光电效应现象？请试一试。

实验探究　研究光电效应的规律

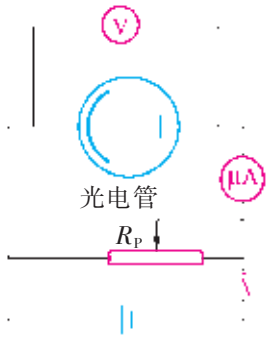


图 2–11　研究光电效应的规律

如图 2–11 配置实验装置，进一步研究光电效应的规律。

1. 加在光电管两极上的电压为零时，用紫光照射到用铯做成的阴极上，回路中有电流吗？

2. 在光电管两极加上反向电压，当电压由小逐渐增大的过程中，电流表指针怎样变化？引起变化的原因是什么？

表 1

颜色	绿	蓝	紫	
波长 / nm	546	480	410	
			强度较低	强度较高
反向电压 U/V	光电流 I /μA	光电流 I /μA	光电流 I /μA	光电流 I /μA
0.00	10.4	11.2	8.5	14.8
0.10	7.1	9.0	7.6	13.3
0.20	4.0	7.0	6.7	11.9
0.30	1.0	4.9	5.7	10.4
0.40	0	2.8	4.8	8.9
0.50	0	1.2	3.9	7.4
0.60		0.4	3.0	6.0
0.70		0	2.0	4.5
0.80		0	1.1	3.0
0.90			0.7	1.7
1.00			0.3	0.8
1.15			0	0

3. 当反向电压达到一定数值时，电流变为零，这时的电压叫做遏止电压。有同学认为，遏止电压 U 与光电子的最大动能 E_{km} 有关，其关系可由 $E_{km} = eU$ 表达。你同意吗？请说明理由。

4. 改变紫光的强度进行实验；改用绿光、蓝光再各做一次。有人通过实验得到了如表 1 所示的实验数据，请对表中的数据进行分析、处理，把结果填入表 2。你能得到什么结论？

表 2

颜色	波长 λ/nm	频率 ν/Hz	遏止电压 U/V	最大动能 E_{km}/eV
绿				
蓝				
紫(强度较低)				
紫(强度较高)				

勒纳等人通过实验得出如下结论：

1. 对于各种金属都存在着一个**极限频率**(threshold frequency)，当入射光的频率高于这个极限频率时(如右表)，才能产生光电效应；如果入射光的频率低于这个极限频率，无论光多么强，照射时间多长，都不会产生光电效应。

2. 光电子的最大动能随着入射光频率的增加而增加，与入射光的强度无关。

3. 当产生光电效应时，单位时间内从金属表面逸出的电子数与入射光的强度有关，光的强度越大，单位时间内逸出的电子数越多。

4. 入射光射到金属表面时，光电子的产生几乎是瞬时的，不超过 1×10^{-9} s。

有人认为，用经典物理学也能对光电效应做出解释。光是一种电磁波，其能量由光的强度决定，而光的强度又由光的振幅决定，与频率无关。当光射到金属表面时，金属中的自由电子会由于电磁场的作用而振动。只要光的强度足够大，照射的时间足够长，就可使自由电子获得足够的能量，飞出金属表面。

你认为这种说法能解释光电效应的实验结果吗？为什么？

若干金属的极限频率 ν_0 和逸出功 W

金属	ν_0 / Hz	W/eV
铯	4.55×10^{14}	1.9
钾	5.38×10^{14}	2.2
锌	8.07×10^{14}	3.3
银	11.5×10^{14}	4.8
铂	15.3×10^{14}	6.3

爱因斯坦的光子说

1905 年，26 岁的爱因斯坦(A. Einstein)发表了题为《关于光



图 2–12　年轻时代的爱因斯坦

的产生和转化的一个启发性观点》的论文，提出了光的量子理论，使光的粒子说这个“涅槃凤凰”重又翱翔在物理学的天空。

爱因斯坦提出光在空间传播时不是连续的，而是一份一份的，一份叫做一个光量子，简称**光子**(photon)。光子的能量 E 跟光的频率 ν 成正比，即

$$E = h\nu$$

式中 h 为普朗克常量。这个学说叫做光子说。

你能用光子说来解释光电效应的实验结果吗？

分析论证

光子说对光电效应作出了圆满的解释。当光照射到金属表面时，金属中的一个电子吸收一个光子，得到大小为 $h\nu$ 的能量。如果照射光的频率足够高，使得电子吸收光子后能量变得足够大，它就能从金属表面逃逸出来，成为光电子，产生光电效应。由于金属中电子吸收光子的能量时是一对一进行的，吸收过程十分迅速，因此光电子的产生几乎是瞬时的。

从点光源发射出来的光束的能量在传播中不是连续分布在越来越大的空间之中，而是由个数有限的、局限在空间各点的能量子所组成，这些能量子能够运动，但不能再分割，而只能整个地被吸收或产生出来。

——爱因斯坦

在产生光电效应时，电子脱离某种金属所做功的最小值，叫做这种金属的**逸出功**(work function)，用符号 W 表示。

不同金属的逸出功不同，上页表列出了几种金属的逸出功。

如果光子的能量 E 小于金属的逸出功 W，增加照射光的强度和照射时间，虽能提高射到金属表面上的光子数，但电子吸收了光子的能量后，却不能从金属中逃逸出来。这就是存在极限频率的缘故。

请思考并讨论：金属的极限频率与其逸出功有何关系？请举例说明。

如果金属中的电子从入射光子得到的能量 E 大于逸出功 W，那么光电子在脱离金属表面后具有一定的动能。如果一光电子在飞出金属表面的过程中所做功恰为逸出功 W，那么它具有最大动能 E_{km}。根据能量守恒定律，可以写出以下关系式：

$$h\nu = W + E_{km}$$

这就是爱因斯坦在其著名论文中写下的**光电效应方程**。爱因斯坦的光子说不仅可以解释当时有关光电效应的所有实验结果，还对光电子的最大动能与入射光频率、金属逸出功之间的定量关系作出了精确预测，体现了物理学理论的强大威力。

多学一点　光电效应的 $E_{km}-\nu$ 图像

对于一种金属，由于它的逸出功是一定的，h 又是一个常量，根据光电效应方程，光电子的最大动能与入射光频率呈一种线性关系，即 $E_{km}-\nu$ 图像是一条直线（图 2–13）。这条直线的斜率就是普朗克常量 $h=\dfrac{\Delta E_{km}}{\Delta\nu}$，这为普朗克常量的实验测定指明了方向。这条直线在 ν 轴上的截距就是这种金属的极限频率 ν_0，由此可求得逸出功 $W=h\nu_0$。

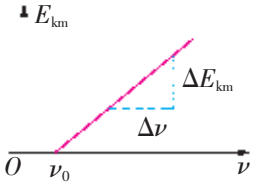


图 2–13　$E_{km}-\nu$ 图像

信息浏览

密立根违背初衷的验证

爱因斯坦提出光子说后，尽管他的论证清晰简明，但当时科学界的反应十分冷淡。量子论的创始人普朗克也责怪爱因斯坦的光子说“走得太远”。美国实验物理学家密立根将自己视为光的波动理论的捍卫者，并定下了工作目标：对爱因斯坦的光电效应方程进行彻底检验，以扼制这种“不可思议的”、“大胆的”和“轻率的”光子说。

密立根对光电效应进行了长期研究。在 1916 年发表的论文中，他公布了实验结果：光电子的最大动能与入射光频率的关系曲线，确实是一条直线，由直线斜率还精确测定了 h 的值。他写道：“尽管有时我认为我掌握了与该方程不相符合的证据，但我发现，研究的时间越长，误差消除得越干净，方程预见的结果就越发符合我观察到的结果。”但他仍然认为“引出该方程的物理理论似乎是完全站不住脚的”。从中我们可以见到，虽然密立根对光子说采取排斥态度，但他毕竟是一位科学家，具有实事求是的科学精神。密立根的实验结果促成爱因斯坦“因在数学物理方面的成就，尤其是发现了光电效应的规律”而荣获 1921 年的诺贝尔物理学奖，密立根也“因基本电荷及光电效应方面的工作”而荣获 1923 年的诺贝尔物理学奖。



密立根（R. Millikan，1868—1953），美国物理学家。第一位在美国本土出生的诺贝尔物理学奖获得者。

案例分析

案例　用频率为 1.00×10^{15} Hz 的紫外线照射钠的表面，释放出来的光电子的最大动能为 1.86 eV，求钠的光电效应极限频率。

分析　入射光中光子的能量

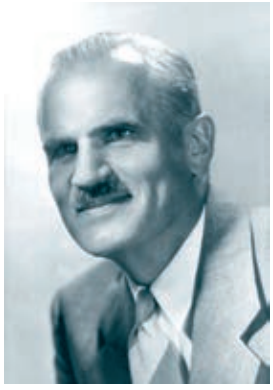
$$E=h\nu=6.63\times10^{-34}\times1.00\times10^{15}\ \text{J}=6.63\times10^{-19}\ \text{J}$$

释放出来的光电子的最大动能

$$E_{km}=1.86\times1.6\times10^{-19}\ \text{J}=2.98\times10^{-19}\ \text{J}$$

钠的逸出功与其极限频率的关系为 $W = h\nu_0$，根据光电效应方程可得到本案例的答案。

请自行完成解答。



康普顿（A. H. Compton，1892—1962），美国物理学家。因发现康普顿效应而与英国物理学家威尔逊（C. Wilson）分享 1927 年的诺贝尔物理学奖。

光子说的又一明证——康普顿效应

1916年，爱因斯坦进一步指出：光子不仅具有能量，而且像实物粒子一样具有动量，其大小为

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

其方向为光波的传播方向。康普顿效应为此提供了明证。

从 1920 年起，美国物理学家康普顿就开始研究 X 射线通过金属、石墨等物质的散射（图 2–14 a）。他通过观测发现：在散射线中，除有与入射线波长相同的射线外，还有波长比入射线波长更长的射线（图 2–14 b）。人们把这种波长变化的现象叫做**康普顿效应**（Compton effect）。

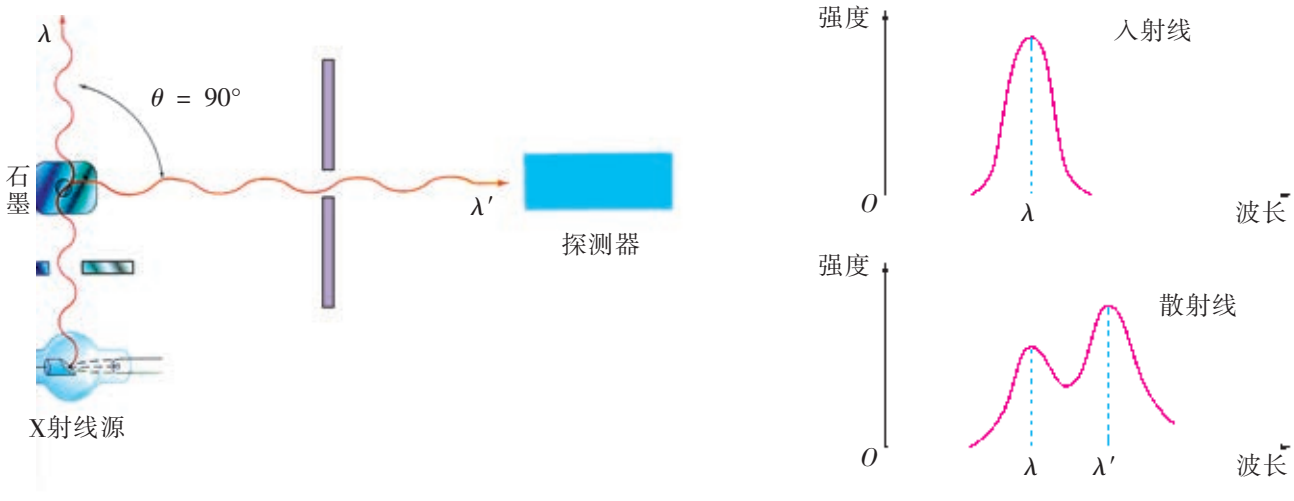


图 2–14　康普顿效应

几乎不再怀疑伦琴射线是一种量子现象。……验证理论的实验令人信服地表明，辐射量子不仅具有能量，而且具有一定方向的动量。

——康普顿

康普顿最初试图根据经典电磁理论对康普顿效应做出解释，但没有成功。1923 年，他终于将爱因斯坦的光子说应用到 X 射线的散射中。

假定 X 射线光子与电子发生完全弹性碰撞，这种碰撞跟台球比赛中的两球碰撞（图 2–15）很相似。按照爱因斯坦的光子说，一个 X 射线光子不仅具有能量 $E = h\nu$，而且还具有动量。如图 2–16



图 2–15　台球的碰撞(频闪照片)

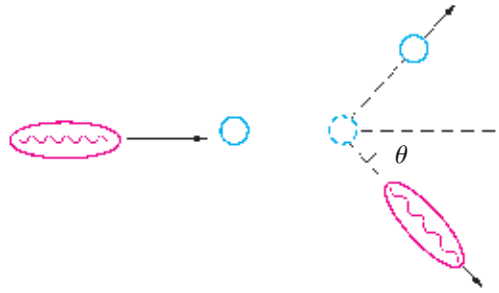


图 2–16　康普顿效应中的光子和电子的碰撞

所示,这个光子与静止的电子发生弹性斜碰,光子把部分能量转移给了电子,能量由 $h\nu$ 减小为 $h\nu'$,因此频率减小,波长增大。同时,光子还使电子获得一定的动量。这样就圆满地解释了康普顿效应。

我国著名物理学家吴有训当时在芝加哥大学师从康普顿,对康普顿效应进行了大量研究,并于 1925 年以题为《康普顿效应》的论文获得了博士学位。他以精确的实验和严密的分析,证明了康普顿效应的普遍性,发展了 X 射线的散射理论。

康普顿效应的实验发现和理论研究,进一步为光的粒子性提供了令人信服的证据。在这里,不仅考虑了能量守恒,还考虑了动量守恒,这促使物理学家们确认了光子图景的实在性。



吴有训(1897—1977),中国物理学家。在康普顿的指导下,用精湛的实验技术、精辟的理论分析,无可争议地证实了康普顿效应。

他发现了以他的名字命名的康普顿效应,它是我们对于辐射性质认识的里程碑。

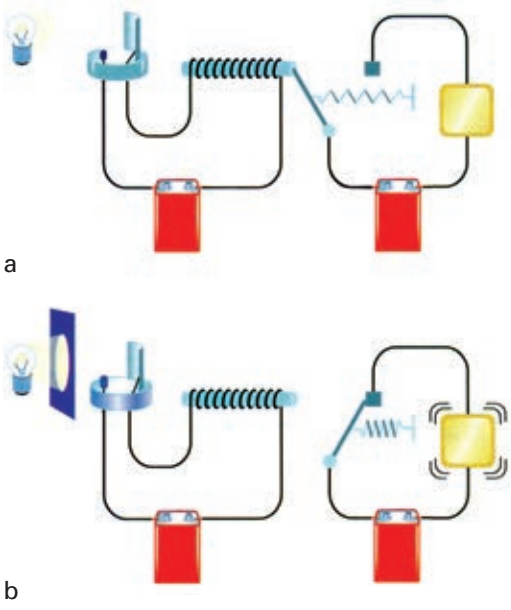
——爱因斯坦

STS

光电效应在我们身边

一个漆黑的夜晚,一条黑影窜入藏有宝物的博物馆内。突然间,铃声大作,保安人员闻声而动,窃贼束手就擒。这是影视作品中常会出现的场景。但这里的幕后“英雄”,往往是应用光电效应原理制成的警报器,这种警报器用到了光电管。当一束不为人眼所见的红外线或紫外线照射到由光敏材料制成的阴极上时,逸出的光电子在电路中产生电流,电流经放大后使电磁铁吸住铁条(如图 2–17 a);一旦有物体挡住光束,阴极上不再有光电子逸出,电磁铁失去磁性,弹簧把铁条拉回,接通警报器电路,于是铃声大作(图 2–17b)。自动门、烟雾探测器等也利用了相同的物理原理,不过现在光电管大多已为光电二极管所替代。

我们在观看电影时,能听到与画面配合一致的配音,也多亏了光电管。影片的音轨位于电影胶片的边缘,是一些宽窄不一的暗条纹。如图 2–18 所示,放映电影时,强度不变的光束通过音轨后,形成强度不断变化的光入射到光电管中,在电路中产生变化的电流,经放大后驱动扬声器发出声音。



a

b

图 2–17　警报器的工作原理

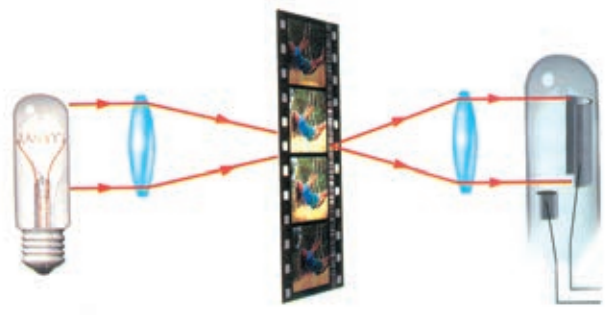


图 2–18　电影放映机中的光电管

家庭作业与活动

1. 求波长为 0.35 nm 的 X 射线光子的能量和动量大小。
2. 当用频率为 7.0×10^{14} Hz 的紫光分别照射铯、锌和银的表面时，能产生光电效应吗？为什么？若能产生光电效应，逸出的光电子的最大动能是多大？
3. 让波长为 350 nm 的光照射钾表面，产生的光电子的最大动能是1.3 eV，求钾的极限频率和逸出功。
4. 德国物理学家勒纳试图在经典电磁理论的框架内解释光电效应，于1902年提出了触发假说：在光电子的发射过程中，光只起触发作用。电子原本就以某一速度在金属原子内部运动，只要光的频率与电子本身的振动频率一致，就发生共振，电子就以自身的速度逸出；原子里电子的振动频率是特定的，只有频率合适的光才能起触发作用。你对此有何评论？

2.3

光是波还是粒子



图 2–19　光是什么

有一位记者曾向英国物理学家、诺贝尔奖获得者布拉格(W. H. Bragg)请教:光是波还是粒子?布拉格幽默地答道:“星期一、三、五它是一个波,星期二、四、六它是一个粒子,星期天物理学家休息。”

如果你是布拉格,将如何回答?

光的波粒二象性

光电效应和康普顿效应告诉我们:光具有粒子性,光子像其他粒子一样,有一定的能量和动量。光的干涉、衍射和偏振现象又向我们表明:光具有波动性。那么,光究竟是什么?

答案似乎取决于所观察到的现象。

让我们先来考察频率为 2.5 MHz 的无线电波。根据普朗克公式,可算得其光子的能量

$$E = h\nu = 6.63 \times 10^{-34} \times 2.5 \times 10^{6}\ \mathrm{J} = 1.7 \times 10^{-27}\ \mathrm{J}$$

从实验的角度看来,这个能量值太小了,因此很难对单个光子进行探测。要使一个灵敏的无线电接收天线探测到信号,每秒至少需要 10^{10} 个这样的光子到达天线,因此我们很难探测出到达天线的单个光子,信号表现为一个连续的波。

如果电磁辐射的频率很高,相应地波长很短,其光子能量、动量就很大,光的粒子性就能明显地表现出来。

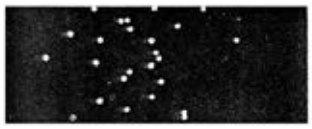
实验证实光(电磁辐射)具有波和粒子双重性质。

现代物理学对“光是什么”的回答是:光是波,同时也是粒子,光具有**波粒二象性**(wave-particle dualism)。

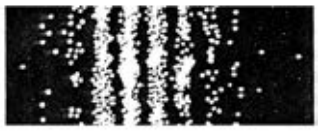
爱因斯坦首先提出“波粒二象性”的概念,他在 1909 年 9 月的一次讲演中指出:“理论物理学发展的随后一个阶段,将给我们带来这样一种光学理论,它可以认为是光的波动论和发射论的某种综合。”

光子的能量和动量的公式$E = h\nu$和$p = \frac{h}{\lambda}$对光同时具有粒子性和波动性做了生动的诠释。式中由普朗克常量h把描写光的粒子性的能量E、动量p，与描写光的波动性的频率ν、波长λ紧密联系了起来。

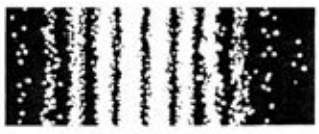
在宏观世界中，我们几乎看不到同时具有波动性和粒子性的现象。但在微观世界里，波粒二象性却是必须予以承认的现实。让我们在新的视野下，重新审视光的双缝干涉实验。



a　28 个光子



b　1000 个光子



c　10000 个光子

图 2–20　双缝干涉图样

再探光的双缝干涉实验

在《物理 3–4》中我们研究了光的双缝干涉实验，图 2–20 是双缝干涉的图样。

对此我们曾用光的波动说予以解释。那么，能不能用光的波粒二象性来解释呢？

图 2–20a 表示曝光时间很短的情况，在胶片上出现的是随机分布的光点。延长胶片曝光的时间，就会出现如图 2–20b 所示的图样。从图中可以看出，光子在某些条形区域出现的概率增大，这些区域是光波通过双缝后产生相干振动加强的区域；而落在其他一些条形区域的概率很小，这些区域是光波通过双缝后产生相干振动减弱的区域。曝光的时间越长，图样就越清晰（如图 2–20c）。这说明，可以用光子在空间各点出现的概率，来解释光的干涉图样，即认为光是一种**概率波**。

在双缝干涉实验中，如果我们挡住双缝中的一条缝，经过一段时间后，在胶片上会出现单缝衍射图样。你能不能用概率波的观念对此进行解释呢？

光既是波又是粒子的说法，常常使人感到困惑。其根源在于我们的思维方式：提到粒子时，我们会联想到小钢球；提到波时，我们会联想到荡漾的水波。

为了解释光的行为，我们应用了波和粒子的观念，而这两个观念似乎是相互抵触的。因为在日常经验中，找不到既是波、又是粒子的物体。随着人类的认识向着微观世界的扩展，未被认识的事物越来越多地出现在我们的面前。从日常经验看来，它们的行为难以理解，我们必须用新的观念予以解释。

我们应该准备……与我们迄今为止一直据以描述自然的概念做最后的决裂。

——玻尔

信息浏览

泰勒的光的衍射实验

1909年，英国青年物理学家泰勒(G. I. Taylor)设计了一个实验。他的实验装置如图 2–21 所示，灯泡发出的光线依次通过狭缝 1、多个滤光片、狭缝 2 后，照在一根针上，产生的衍射图样被记录在感光胶片上。他先不用滤光片，可直接观察到光通过针后的衍射图样。然后增加滤光片的数量，减小光强，最终他使通过狭缝 2 的光线非常微弱，曝光过程持续了 3 个月之久，他发现感光胶片上的衍射图样与用强光照射得到的图样一模一样。泰勒的计算表明，在如此微弱的光照下，光子基本上是一个一个地通过狭缝 2 的。他的实验说明可以用单个光子落在胶片的某一位置的概率来描述光子的行为，波动性是光子本身的属性。

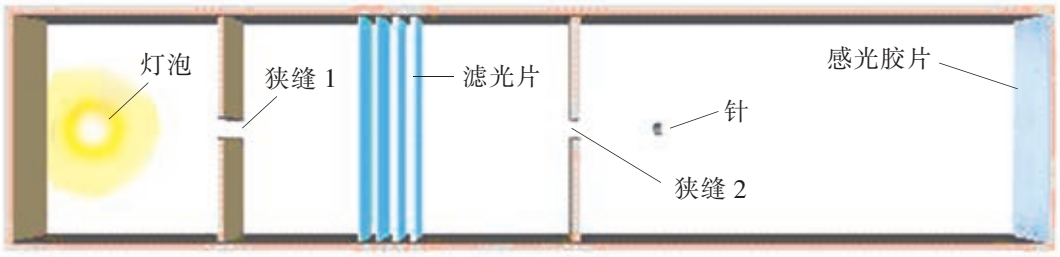
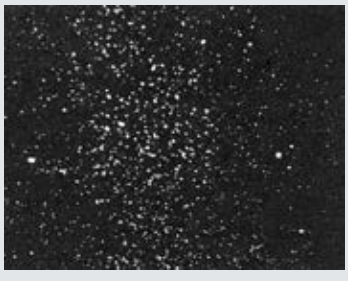


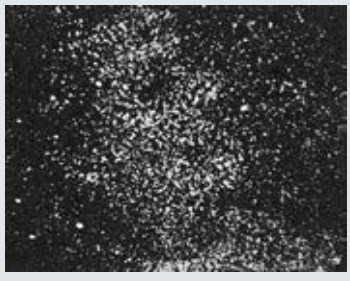
图 2–21　泰勒的光的衍射实验

家庭作业与活动

1. 在日常生活中，我们不会注意到光是由光子构成的，这是因为普朗克常量很小，每个光子的能量很小，而我们观察到的光学现象中涉及大量的光子。试估算 60 W 的白炽灯泡 1 s 内发出的光子数。
2. 在生活中我们会拍很多照片，通常我们都认为，这是由人和景物发出或反射的光波经过照相机的镜头聚焦在底片上形成的。实际上照片上的图像也是由光子撞击底片，使上面的感光材料发生化学反应形成的。图 2–22 是用不同曝光量洗印的照片，请你根据自己对光的理解做出说明。



a　2×10^3 个光子



b　1.2×10^4 个光子



c　9.3×10^4 个光子



d　7.5×10^5 个光子



e　3.5×10^6 个光子



f　2.8×10^7 个光子

图 2–22　用不同曝光量洗印的照片

2.4 实物是粒子还是波

光的波粒二象性理论告诉我们：光是电磁波，又是光子。这表明场和实物并非泾渭分明。那么，电子、质子、中子，甚至原子、分子是否也具有波动性？这就是法国物理学家德布罗意在 1923 年为自己提出的研究课题。

德布罗意波



德布罗意（L. de Broglie，1892—1987），法国物理学家。在其博士论文中提出物质波理论，1929 年因发现电子的波动性而获得诺贝尔物理学奖。

当时，德布罗意正在攻读理论物理博士学位。他对普朗克、爱因斯坦和玻尔（N. Bohr）三位量子论之父的思想进行了深入的学习和思考。他把玻尔原子理论中电子的行为与光的干涉、衍射现象进行类比，认为这两者都涉及整数关系，它们之间存在着微妙的相似之处。据此，德布罗意勇敢地打破传统观念，把光的波粒二象性推广到了所有的物体。他于 1924 年在题为《关于量子理论的研究》的博士论文中明确提出：任何一个运动着的物体，都有一种波与之相伴随，其波长

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

式中 p 是物体的动量，h 是普朗克常量。人们把这种波称为**物质波**（matter wave），也叫**德布罗意波**。物质波波长 λ 叫做**德布罗意波长**。

信息浏览

“满纸荒唐言”的机遇

在德布罗意准备论文答辩的过程中，出现了戏剧性的一幕。德布罗意的导师朗之万（P. Langevin）竟然不知道如何评价学生的论文，但他表现得相当豁达大度，认为德布罗意的思想虽然大胆得近乎荒唐，但表述十分优美和精巧。在甚感尴尬之余，他聪明地把德布罗意的博士论文副本寄给了爱因斯坦。爱因斯坦向来欣赏物理学中的对称之美，德布罗意理论体现了光子和实物粒子之间的对称性。爱因斯坦热情称赞德布罗意“已揭开了巨大帷幕的一角”。他的态度使得德布罗意以这篇似乎“满纸荒唐言”的论文，顺利获得了博士学位，并创下用学位论文赢得诺贝尔奖的历史纪录。

案例分析

案例　一只质量为 450 g 的足球以 10 m/s 的速度在空中飞行(图 2–23);一个初速度为零的电子,通过电压为 100 V 的加速电场。试分别计算它们的德布罗意波长。



图 2–23　运动的足球

解答　物体的动量 $p = mv$,其德布罗意波长 $\lambda = \dfrac{h}{p} = \dfrac{h}{mv}$。

足球的德布罗意波长

$$\lambda_1 = \frac{h}{m_1 v_1} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{450 \times 10^{-3} \times 10}\ \text{m} = 1.47 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

电子经电场加速后,速度增加为 v_2,根据动能定理

$$\frac{1}{2} m_2 v_2^2 = eU$$

$$p_2 = m_2 v_2 = \sqrt{2 m_2 eU}$$

该电子的德布罗意波长

$$\lambda_2 = \frac{h}{p_2} = \frac{h}{\sqrt{2 m_2 eU}}$$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 100}}\ \text{m} = 1.2 \times 10^{-10}\ \text{m}$$

我们知道,为了观察到可见光的明显的单缝衍射图样,要求缝宽不能比光的波长大得太多,实验中所用单缝的缝宽数量级是 10^{-4} m。若要探测到足球的波动性,所用狭缝宽度的数量级要达到 10^{-33} m,目前我们尚无能为力。

微观粒子的质量和动量都很小,其德布罗意波长比足球等宏观物体要长得多。上述案例中电子的德布罗意波长的数量级为 10^{-10} m,与晶体中晶格大小的数量级相当,把电子束照射到晶体上,就有可能观察到电子的波动性。早在 1923 年,德布罗意就预言:“从很小的孔穿过的电子束能够呈现衍射现象,这或许就是人们能借以寻找关于我们想法的实验证据的方向。”

请思考并讨论:德布罗意用来证实电子波动性的设想可行吗?

实验事故导致的重大发现

1925 年 4 月的一天,美国物理学家戴维孙(C. J. Davisson)和

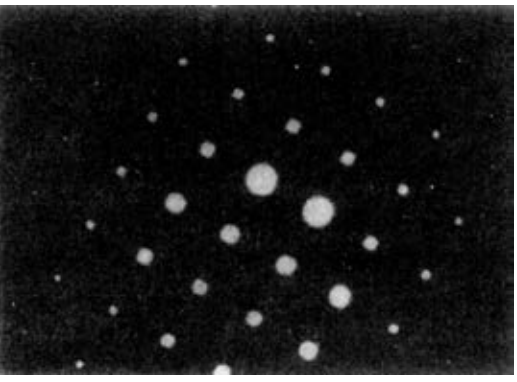


图 2–24　电子在单晶金上的衍射图样

他的合作者革末(L. Germer)在真空条件下用镍作为靶子研究电子的散射,结果发生了事故,镍靶被进入的空气严重氧化。他们经过长时间对镍靶加热、清理后,再重新实验,发现电子被散射后出现了类似光的衍射图样(图 2–24)。这是由于镍靶经过加热后,从多晶体变成了单晶体,这对电子而言,成了很好的衍射光栅。但他们并不知晓这一现象的本质就是电子衍射。1926 年夏,戴维孙在听取了英国物理学家玻恩(M. Born)的说明后,才认识到自己工作的意义。于是他们又重做实验,并于 1927 年公布实验结果,证实了德布罗意理论。

爱因斯坦曾说过:“只有理论才能决定我们可以观察到什么。”你对此有何看法?

就在 1927 年,英国物理学家 G. P. 汤姆生(G. P. Thomson)也完成了电子衍射实验。他是在德布罗意理论的启发下进行实验的,并采用了更为简单、明确的方法,即利用高能电子通过金属薄层做透射实验,很快就观察到了衍射环(图 2–25),并计算出相应的波长,从而令人信服地证明了德布罗意理论。戴维孙和 G. P. 汤姆生因此而分享了 1937 年的诺贝尔物理学奖。

请你想一想,物质波是什么样的波?

有趣的是 G·P·汤姆生为 J·J·汤姆生之子,父亲对阴极射线的实验研究表明电子是粒子,儿子的电子衍射实验表明电子也是波。



薛定谔　(E. Schrödinger,1887—1961),奥地利物理学家。因发现原子理论的新的有效的形式,与英国物理学家狄拉克(P. A. M. Dirac)分享了 1933 年的诺贝尔物理学奖。

物质波,又一种概率波

物质波与光波一样,也是概率波。如图 2–25 所示,电子落在“亮环”上的概率大,落在“暗环”上的概率小。

电子绝不是具有波动性的唯一粒子,物理学家还观察到了来自核反应堆的中子,甚至氢、氮等原子的衍射图样(图 2–26)。德布罗意理论是物理学史上又一次伟大的综合,它揭示了物质世界的



图 2–25　电子通过金箔的衍射图样

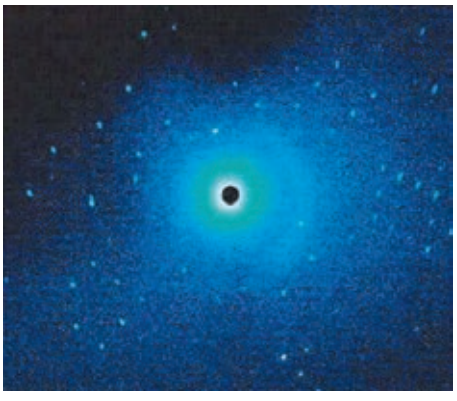


图 2–26　中子的衍射图样

普遍属性,启示人们在对电子这类微观粒子进行研究时,不能再局限在经典物理学的框架内,从而为量子力学的建立奠定了坚实的基础。

1926 年奥地利物理学家薛定锷接受并发展了德布罗意的思想,建立了波动力学。1925 年德国物理学家海森伯则发展了玻尔的原子理论,建立了矩阵力学。不久薛定锷证明矩阵力学和波动力学在数学上是等价的,人们将这两种理论通称为量子力学。

信息浏览

原子,请你排好队!

借助光学显微镜,人们可以观察到细胞、细菌和其他微生物,其分辨本领可达 2×10^{-4} mm。尽管从技术上来说,提高光学显微镜的放大倍数并不困难,但不管放大倍数有多大,比 2×10^{-4} mm 还小的物体,如大多数病毒,在光学显微镜下都不能看清楚。

要提高显微镜的分辨本领,必须改用波长比可见光短得多的射线。电子的德布罗意波长很短,因此用电子束代替光束成为上佳选择。1931 年德国物理学家鲁斯卡(E. Ruska)发明了世界上第一台电子显微镜。

1982 年,美国 IBM 公司的物理学家宾宁(G. Binning)和他的老师罗雷尔(H. Rohrer)发明了世界上第一台扫描隧穿显微镜 (scanning tunneling microscope,简称 STM),它应用了电子的量子隧道效应,能直接观测到单个原子的立体形貌。利用 STM,人类还实现了直接操纵和排布原子的奇迹 (图 2–27)。

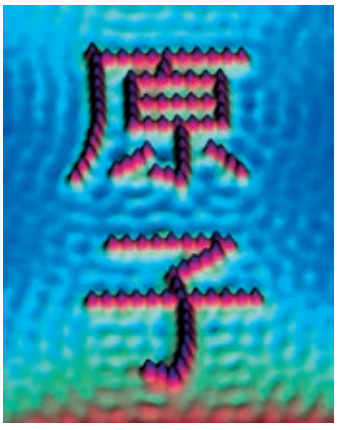


图 2–27 用 STM 把碳原子排布在铜表面上

不确定关系

在经典物理学中,我们常用物体的位置和速度来描述它的运动状态,用适当的仪器,我们可同时精确地测定这两个物理量。

在微观世界中,我们能否同时精确地测定粒子的位置和速度呢?

1927年,德国物理学家海森伯提出:在测定微观粒子的位置、动量这些物理量时,总是存在一种不确定性。如图 2–28 所示,以电子单缝衍射为例, 一束电子以速度 v 射向宽度为 d 的狭缝,屏上可观察到与光的单缝衍射相似的图样(图 2–29)。

对于电子来说, 我们不能确定它们是从缝中哪一点通过的,其位置沿 x 方向的不确定量 $\Delta x \approx d$。由于电子具有波动性,通过



海森伯 (W. Heisenberg, 1901—1976), 德国物理学家。创立了矩阵力学,提出了不确定关系, 荣获 1932 年的诺贝尔物理学奖。

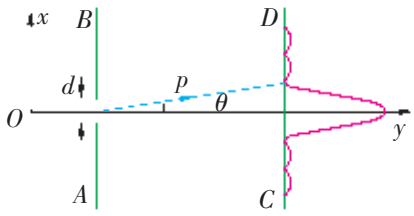
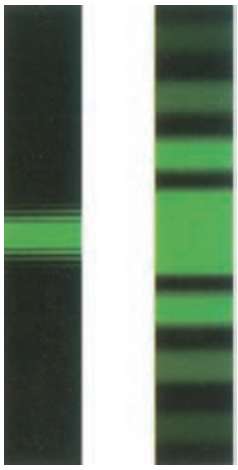


图 2-28　电子单缝衍射



d = 0.8 mm　d = 0.2 mm

图 2-29　绿光的单缝衍射

20 世纪物理学的精华就在于我们区别开来，什么是可测量的，什么是不可测量的……我们不能测量一个物理世界中的点的命运，因为物理的点只不过是一个区域，而一个小区域的命运是不可能精确地预测的。

——普里高津

狭缝后，会发生衍射，大部分落在中央“亮条”内。这些电子在到达狭缝前沿 y 方向运动，经过狭缝后，一些电子具有了 x 方向的动量。由于电子到达屏上的位置是不确定的，所以电子在 x 方向上的动量也具有不确定性，其不确定量由中央“亮条”的宽度决定，$\Delta p_x = p\sin\theta$。若我们减小狭缝的宽度，电子位置的不确定量会相应减小，这时屏上中央“亮条”变宽，即电子动量的不确定量相应增加了。

海森伯通过理论分析和数学推导，得出了著名的**不确定关系**：对于微观粒子的运动，如果以 Δx 表示粒子位置的不确定量，以 Δp_x 表示粒子在 x 方向动量的不确定量，那么

$$\Delta x\ \Delta p_x \geqslant \frac{h}{4\pi}$$

海森伯的不确定关系是量子力学的一条基本原理，是物质波粒二象性的生动体现。它表明：在对粒子位置和动量进行测量时，精确度存在一个基本极限，不可能同时准确地知道粒子的位置和动量。

在经典力学中，可以同时精确地测出物体的位置和动量。但是在量子力学中，不确定关系告诉我们，如果要更精确地确定粒子的位置（使 Δx 更小），那么对动量的测量一定会更不精确（Δp_x 更大），从而不能准确地把握粒子的运动状态，以后时刻的运动情况更无从谈起，因而也就不可能用“轨道”来描述粒子的运动。这就是用“电子云”来代替玻尔原子理论的“电子轨道”的原因所在。

家庭作业与活动

1. 世界上运动速度最快的球是羽毛球，你相信吗？根据测算，羽毛球离拍时的最大速度可达到 288 km/h，羽毛球的质量为 5.0 g，试求其德布罗意波长。我们能观察到羽毛球的波动性吗？
2. 一个细菌在培养皿中的移动速度为 3.5 μm/s，其德布罗意波长为 1.9×10^{-19} m，该细菌的质量多大？
3. 已知 $\frac{h}{4\pi} = 5.3 \times 10^{-35}$ J·s，试求下列情况中速度测定的不确定量，并根据计算结果，讨论在宏观和微观世界中进行测量的不同情况。
   （1）一个球的质量 m = 1.0 kg，测定其位置的不确定量为 10^{-6} m。
   （2）电子的质量 $m_e = 9.0 \times 10^{-31}$ kg，测定其位置的不确定量为 10^{-10} m（即在原子的数量级）。

课题研究

关于电子显微镜的研制和应用

到图书馆或上网查阅资料，了解电子显微镜研制和应用的动态，与同学进行交流。

2.x

第 2 章家庭作业与活动

1. 在演示光电效应的实验中，把某种金属板连在验电器上。第一次，用弧光灯直射金属板，验电器的箔片就张开一个角度。第二次，在弧光灯和金属板之间插入一块普通的玻璃板，再用弧光灯照射，验电器箔片不张开。由此可以判定，使金属板产生光电效应的弧光中有
   A. 可见光成分
   B. 紫外光成分
   C. 红外光成分
   D. 无线电波成分
2. 关于光电效应，下列陈述中正确的是
   A. 金属电子的逸出功与入射光的频率成正比
   B. 光电流的大小与入射光的强度无关
   C. 对于同种金属，用不可见光照射一定比用可见光照射产生的光电子的动能要大
   D. 对于任何一种金属都存在一个“最大波长”，入射光的波长必须小于这个波长，才能产生光电效应。
3. 观察电炉的电热丝接通电源后颜色的变化。你对电热丝单位时间内发射光子的数量和种类有何想法？
4. 已知铁的逸出功是 4.7 eV，试求：
   (1) 铁的光电效应极限频率；
   (2) 用波长为 150 nm 的光照在铁表面上时发射出的光电子的最大动能。
5. 在光的双缝干涉实验中，光子撞击屏幕的位置可以预言吗？
6. 如果你拍一张照片时用的快门速度是如此之快，使得只有 20 个光子进入镜头，那么你在照片上会看到什么？
7. 求以 0.1c 的速度打在电视机荧屏上的电子的德布罗意波长(c 为真空中的光速)。
8. 在演示光电效应的实验中，某金属被光照射后产生了光电效应现象，实验测出了光电子的最大动能 E_{km} 与入射光频率 ν 的关系，如图 2–30 所示。由 $E_{km}-\nu$ 图像可求出
   A. 该金属的逸出功
   B. 该金属的极限频率
   C. 单位时间内逸出的光电子数
   D. 普朗克常量

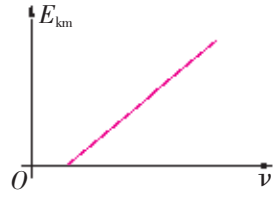


图 2–30

9. 某同学用两种不同的金属做光电效应实验。实验中他逐渐增大入射光频率，并测出光电子的最大动能。图 2–31 中哪一幅图像表达了他的实验结果？为什么？

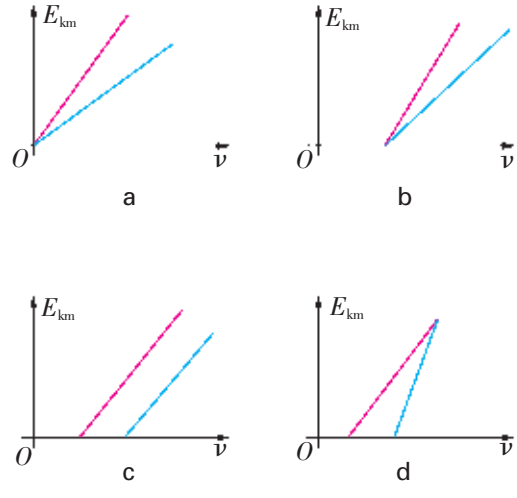


图 2–31