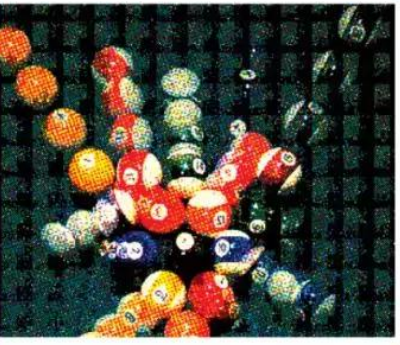
目 录



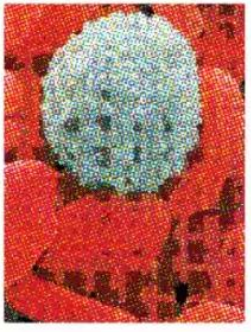
第 1 章 碰撞与动量守恒 6

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



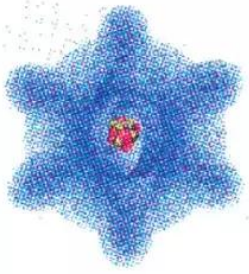
第 2 章 波和粒子 24

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

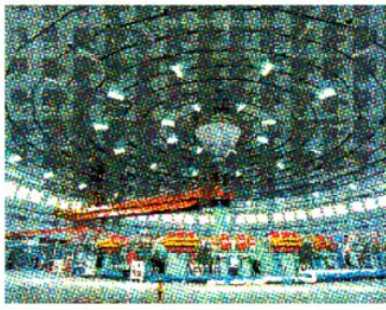
5.3 聚变与受控热核反应 100

5.4 核能利用与社会发展 104

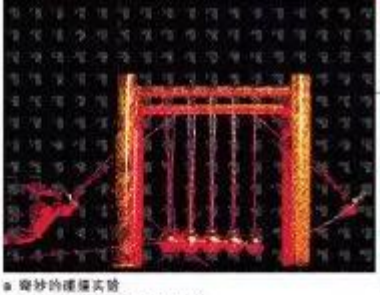
总结与评价 课题研究成果报告会 110

研究课题示例 110

评价表 111







a 做好的碰撞实验



b 台球的碰撞(频闪照片)

图 1-1 实验中和生活中的碰撞

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?其中有着怎样的规律?

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和统一,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



周南物理殷石峰

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”，要求设计一个保护装置，使鸡蛋从大约 13m 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。

让鸡蛋从约 1.5m 的高处自由落下，分别落在海绵垫上和塑料盘上。

你会看到什么现象？能猜想一下其中的物理原理吗？

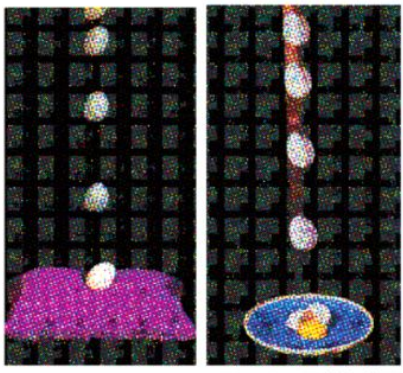


图 1–3　下落的鸡蛋

分析论证

先用牛顿第二定律，分析鸡蛋落到海绵垫上或塑料盘上时，它的运动变化情况。

如图 1–4 所示，设鸡蛋的质量为 m，它从某一高度落到海绵垫上或塑料盘上时，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，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。

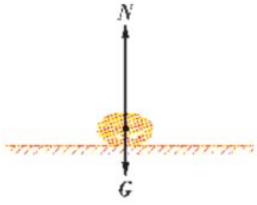


图 1–4　鸡蛋受到撞击时的受力示意图

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**(impulse–momentum theorem)。

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？

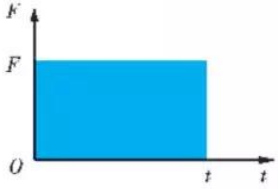


图 1–5　恒力 F 的冲量

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。

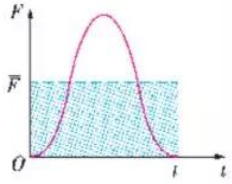


图 1–6　碰撞中的平均作用力

前面在分析鸡蛋的受力情况时，我们是把鸡蛋与接触面之间的作用力当作恒力处理的，实际上它们之间的作用力是变力，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。

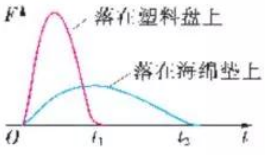


图 1–7　鸡蛋所受合力随时间的变化

案例分析

案例　蹦床运动是一项激动人心的运动项目。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 3.2m 的高处自由落下，着网后沿竖直方向蹦回到离水平网面 5m 的高处。若这位运动员与网接触的时间为 1.2s，求网对运动员的平均作用力的大小（取 $g = 10\text{m/s}^2$）。

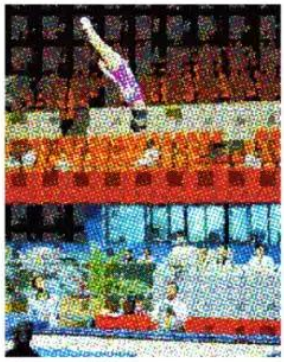


图 1–8　蹦床

分析　以运动员为研究对象，首先需分析运动员与网碰撞时的受力情况及碰撞前后的运动状态（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 $m = 50\text{kg}$，碰撞前的速度 $v_0 = -\sqrt{2gh}$，碰撞后的速度 $v_t = \sqrt{2gh'}$，所受合外力的冲量 $Ft = (N - G)t$，碰撞中的动量变化 $\Delta p = p_t - p_0 = mv_t - mv_0$。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。

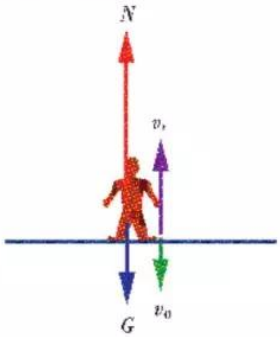


图 1–9　运动员与网碰撞时的受力情况及其前后的运动状态

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，铁锤的质量越大，打击钉子时的速度越大，作用时间越短，钉子受到的力就越大。



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，其实也是不自觉地用到了同样的原理（图 1–12）。

你还能举出一些生活中应用动量定理的例子吗？

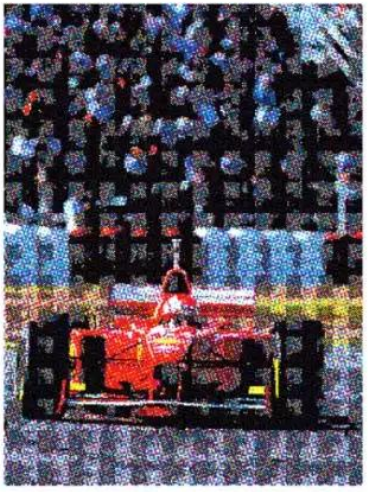


图 1–11　赛车赛道的防撞墙



图 1–12　从高处跳下的人

课堂作业与练习

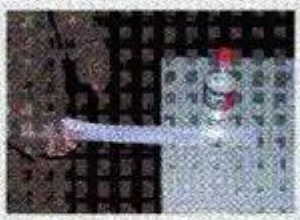
1. 一个质量为 5kg 的物体从离地面 20m 的高处自由向下落，不计空气阻力，试求在下落的这段时间内物体所受重力的冲量。

2. 质量为 5kg 的小球以 5m/s 的速度竖直落到地板上，随后以 3m/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

3. 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，可以将瓶子跟着移动起来。拉紧纸带，用指头向下使劲击打纸带，可以看到纸带从瓶底抽出，而饮料瓶却平稳地留在原处，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，着地后不会破坏。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方面考虑：

1. 实验的结果怎样；
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。

周南物理段石峰

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）。她为什么不能如她所想的那样跳到岸上呢？显然这里涉及到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？

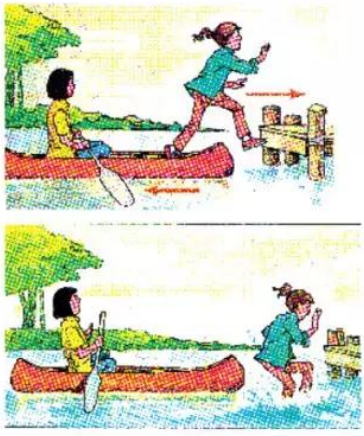


图 1–14　这位自信的同学为什么会掉到水里

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

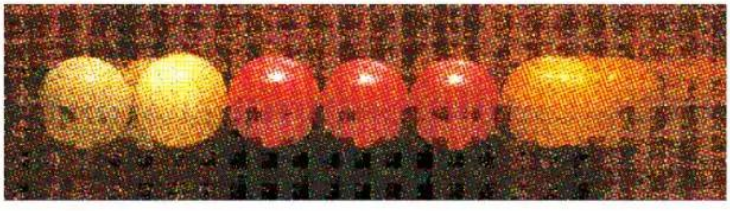


图 1–15　小球碰撞的频闪照片

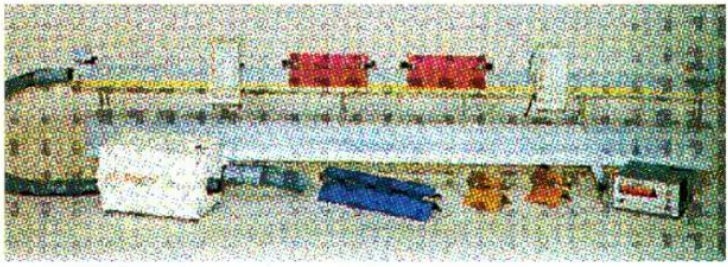


图 1-16　用气垫导轨研究物体间的碰撞

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方案，供你参考。

1. 使导轨上的一个滑块静止，推动另一个滑块去碰它（图 1-16），相碰后分开。

2. 使两个滑块相向运动，相碰后粘在一起。

3. 使一个滑块静止，推动另一个滑块去碰它，相碰后粘在一起。

你也可以根据自己制定的计划，选用 DIS 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？

实验误差产生的原因是什么？你们是如何减小误差的？

你认为如何改进，可使实验做得更好？

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，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'。

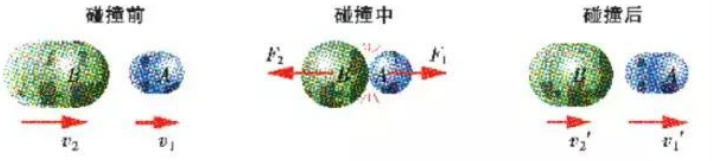


图 1–17　两球的碰撞过程

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 conversation 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

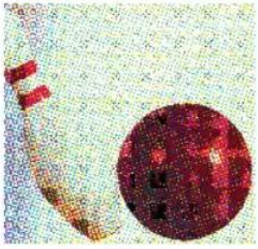


图 1-18　保龄球

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，它远大于它们所受的外力，因此外力可忽略不计，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 $p = m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1$。

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 $p' = m_1v_1' + m_2v_2'$。

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：那位同学为什么不能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。他把物体的大小和速度的乘积定义为“运动量”。当时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，笛卡尔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善表述：“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。”

课后作业与活动

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 的速度是多大?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。



图 1-19

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 1-20

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。

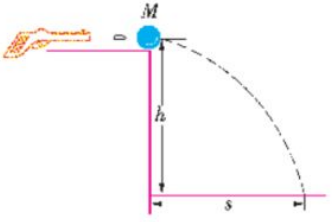


图 1-21

安全告诫：
实验中注意安全，不要把枪口对着人!

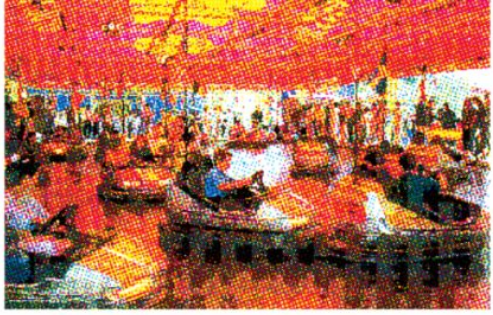


图 1-22　碰碰车

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，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，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 3.7 m/s。求碰撞后两车共同的运动速度。

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的内力远远大于所受的外力，外力可以忽略不计，满足动量守恒定律的适用条件。

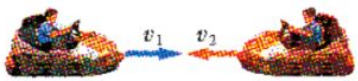


图 1-24　碰碰车的碰撞示意图

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 $v_2 = -3.7\ \text{m/s}$。

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。在这里，常要用到动量守恒定律。

案例　一质子以 1.0×10^7 m/s 的速度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利用了反冲现象。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。

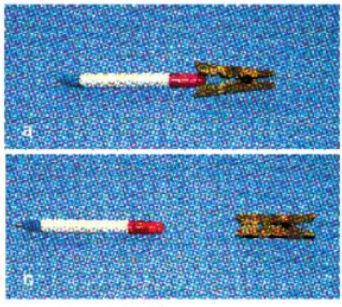


图 1–26　反冲现象

案例　一火箭喷气发动机每次喷出 $m = 200$ g 的气体，

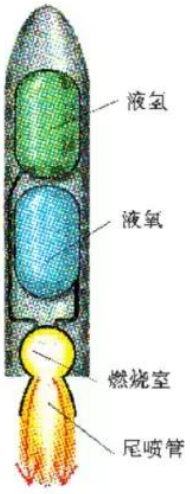


图 1-27　火箭

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

分析　在不考虑地球引力及空气阻力的情况下，火箭与气体组成的系统动量守恒。

以火箭和它在 1s 内喷出的气体为研究对象。设火箭 1s 末的速度为 v'，1s 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 $v' = \dfrac{20\ mv}{M - 20\ m} = \dfrac{20 \times 0.2 \times 1000}{300 - 20 \times 0.2}\ \text{m/s} = 13.5\ \text{m/s}$

即火箭发动机 1s 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，有兴趣的同学可从图书馆或互联网上查找有关的资料。

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为多大？

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，它向右回摆，到达原先的平衡位置时跟 B 球发生碰撞。碰撞后，A 球立即停下，B 球向右摆去，摆到与刚才 A 球开始回摆时差不多的高度，又向左回摆，跟 A 球相撞，这时 B 球立即停下，而 A 球向左摆去……如此往复。

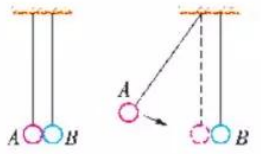


图 1-28　英国皇家学会的悬赏征答题

当时的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　关于两个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 m_1 的速度 (m/s)	碰撞前 动能 (J)	碰撞后 (m_1+m_2) 的速度 (m/s)	碰撞后 动能 (J)
1	0.220	0.220	0.499		0.248	
2	0.240	0.220	0.271		0.140	

表 2　关于两个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 (m/s)	动能 (J)	m_1 的速度 (m/s)	m_2 的速度 (m/s)	动能 (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 的数据可看出：在实验误差允许的范围内，两滑块碰撞前后的总动能几乎相等。

由此可见，物体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量，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 的速度为 v_1，B 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 减速，使 B 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，而弹性势能逐渐增大。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。但总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 继续减速，B 继续加速，使 B 的速度大于 A 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小，动能逐渐增大。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。

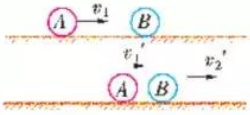


图 1–29　两球的碰撞

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

$$\frac{1}{2}m_1v_1'^2+\frac{1}{2}m_2v_2'^2=\frac{1}{2}m_1v_1^2 \tag{1}$$

由于系统所受合外力为零，系统的动量守恒，故可得

$$m_1v_1'+m_2v_2'=m_1v_1 \tag{2}$$

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。

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

$$m_Av_1=m_Av_A\cos\alpha+m_Bv_B\cos\beta$$

$$m_Av_A\sin\alpha=m_Bv_B\sin\beta$$

又因 A、B 两球的碰撞可视为弹性碰撞，故动能也守恒：



图 1–30　台球中的斜碰事例

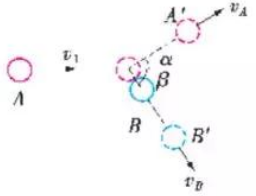


图 1–31　斜碰问题

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

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"牛顿的摇篮"。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 的质量均为 m，那么

(1) A、B 碰撞后 A 的速度为多大？

(2) B、C 碰撞后它们的共同速度多大？

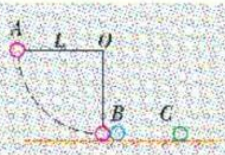


图 1-32

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，并用所学的知识去解释它。



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 20m/s 的速度弹回，网球与球拍相接触的时间为 0.1s，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 A 以 0.045m/s 的速度继续向前运动。求 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。

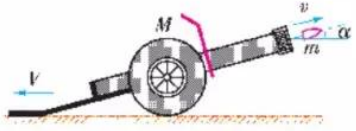


图 1-35

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 的带有光滑轮子的小车上。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？

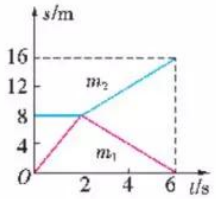


图 1-34

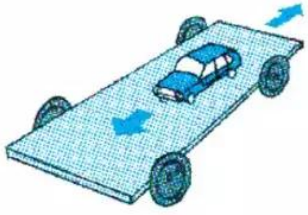


图 1-36

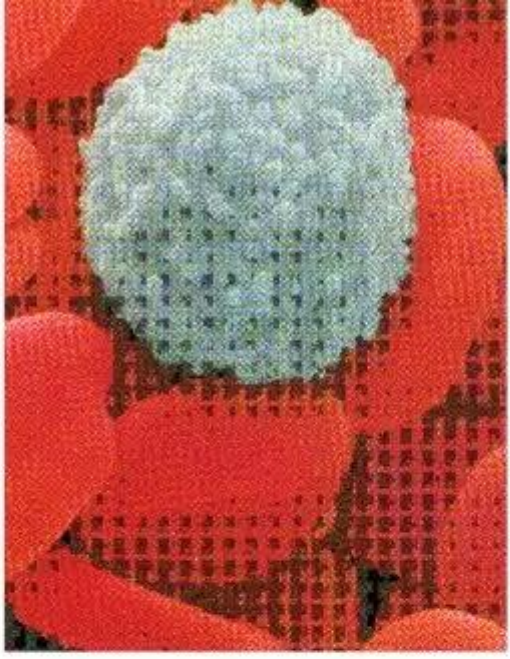


图 2-1 扫描电子显微镜下的血红细胞与白细胞

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？

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°C左右，在黑暗中我们看不到前面的人，但可用红外夜视仪或红外照相机观察到(图2-2)；当物体的温度升

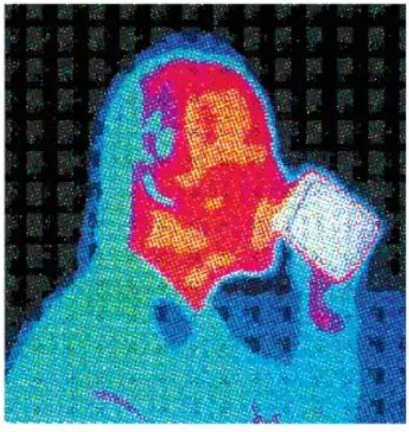


图2-2 人体的红外照片

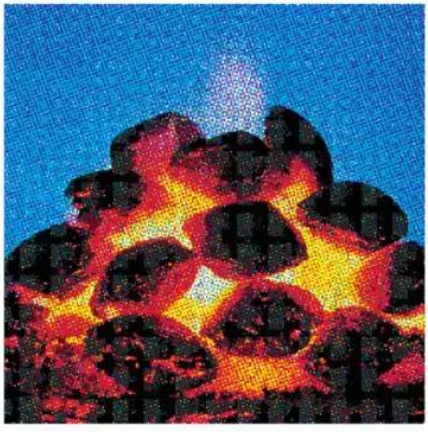


图2-3 燃烧的炭块

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？

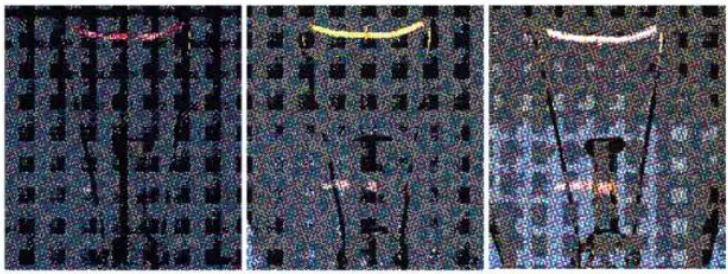


图 2-4　通有不同电流的灯泡发光情况

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。

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上的电磁波，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本领都有所增加；另一方面辐射本领的最大值向波长较短的方向移动。

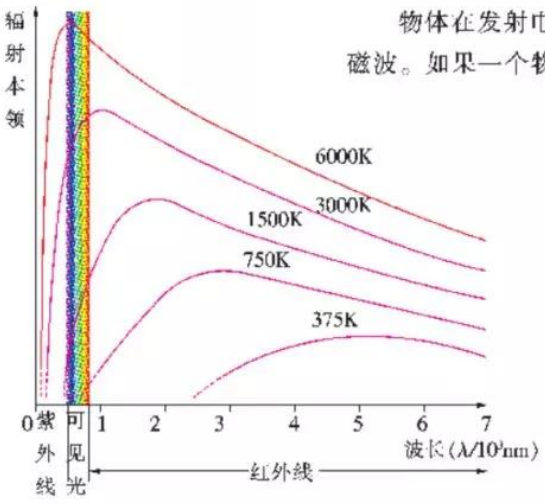


图 2-5　不同温度下黑体辐射本领与波长的关系

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 0 时，辐射本领将趋于无穷大。这种情况被人们称为“紫外灾难”。

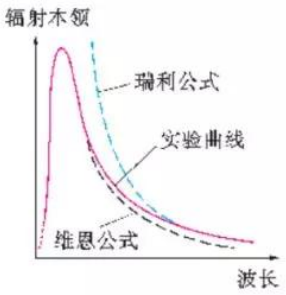


图 2-6　辐射本领与波长的关系

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”

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（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。

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's 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。

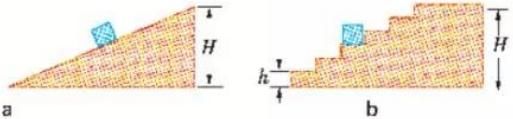


图 2-8 关于能量变化的两种观点

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 $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$ 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，百感交集："全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。"

实践作业与活动

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，对此做了如实记载。

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)。

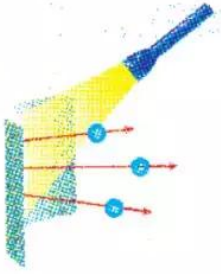


图2-9 光电效应现象

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。

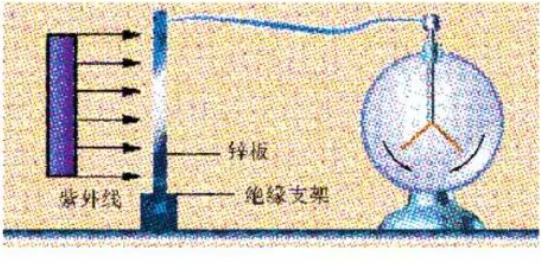


图2-10 光电效应实验

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

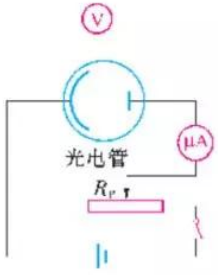


图 2-11　研究光电效应的规律

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 λ / 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. 对各种金属都存在着一个**极限频率**(threshold frequency)，入射光的频率高于这个极限频率(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. 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 10^{-9} s。

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

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？

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。



图 2-12　年轻时代的爱因斯坦

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

光子说对光电效应做出了圆满的解释。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。上页右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。

你能用光电效应方程解释有关光电子最大动能的实验结果吗？

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（如图 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 $W=h\nu_0$。

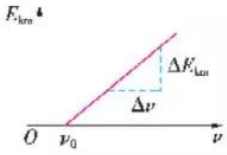


图 2-13 $E_{km}-\nu$ 图像

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，以揭制这种“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：“尽管有对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批判态度，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”而获获 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美国物理学家威尔逊（C. Wilson）分享1927年的诺贝尔物理学奖。

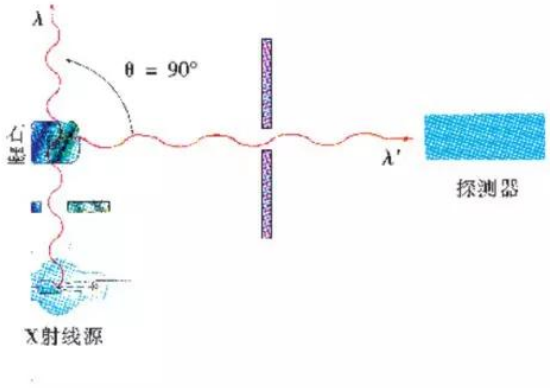
光子说的又一明证——康普顿效应

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

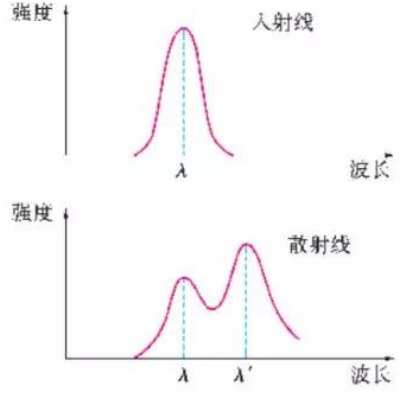
$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

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研究了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）。



a



b

图2-14 康普顿效应

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。

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

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

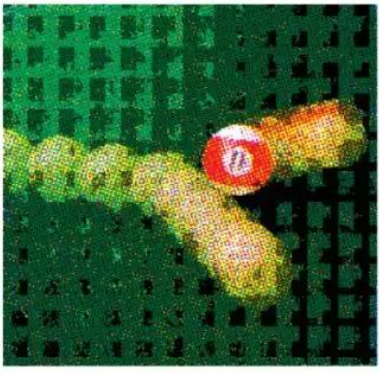


图 2-15 台球的碰撞(频闪照片)

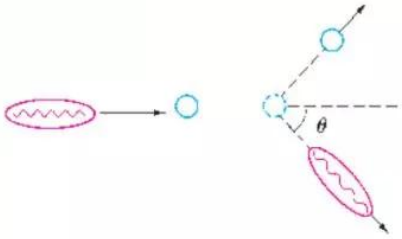


图 2-16 康普顿效应中的光子和电子的碰撞

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

光电效应在我身边

在一个漆黑的夜晚,一条黑影潜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。这是在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原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,这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。

我们在观赏电影时,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。

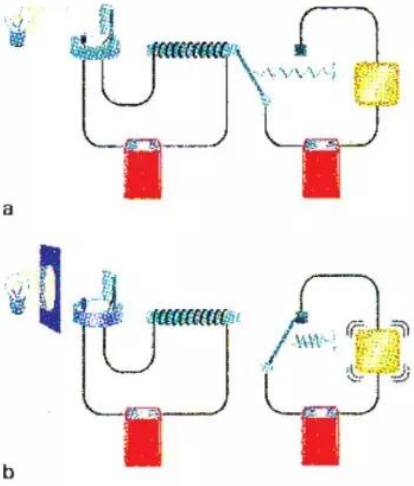


图 2-17　警报器的工作原理

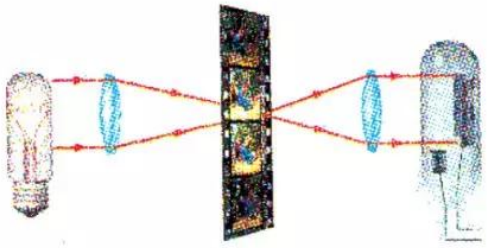


图 2-18　电影放映机中的光电管

课后作业与活动

1. 求波长为 0.35nm 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 的紫光分别照射到铯、锌和银的表面上时，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 的光照射到钾表面上，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:光是一种波。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。

事实上电磁辐射的所有行为都可用波动说和粒子说予以解释。由大量光子形成的光的干涉图样既可以用波动说解释,也可以用粒子说解释。

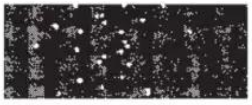
现代物理学对"光是什么"的回答是:光是波,同时也是粒子,光具有**波粒二象性**(wave-particle dualism)。

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

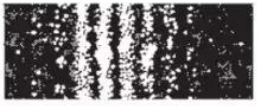
种综合。”

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和动量p，与描写光的波动性的频率ν和波长λ紧密联系了起来。

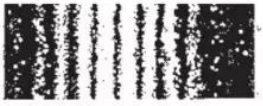
在宏观世界中，我们几乎看不到同时具有波动性和粒子性的现象。但在微观世界里，波粒二象性却是必须予以承认的现实。让我们在新的视野下，重新审视光的双缝干涉实验。



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

拓展阅读

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，照在一张针上，产生的衍射图样记录在感光底片上。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，最终使光通过狭缝2的光改为偶尔穿越，曝光过程持续了3个月之久，似乎感光胶片上的衍射图样与用强光源轻轻将孔的图样一模一样。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。

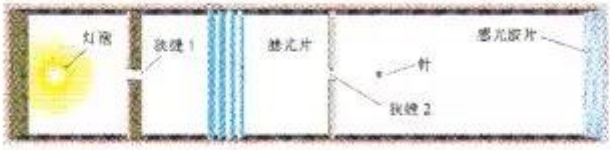


图2-21 泰勒的光的衍射实验

课后作业与活动

1. 在日常生活中，我们不会注意到光是由光子构成的，这是因为在研究常量很小、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的白炽灯在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被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。

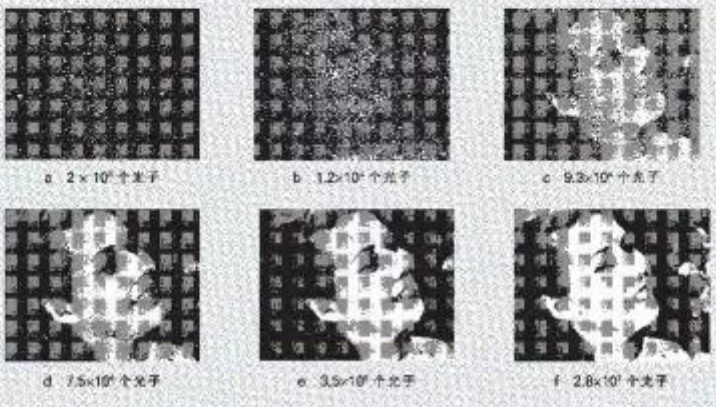


图2-22 用不同曝光量洗印的照片

周南物理段石峰

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跃迁与光的干涉、衍射现象中的波动性进行类比，他认为这两者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 waves），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。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 一质量为 450g 的足球以 10 m/s 的速度在空中飞行(如图 2-23);一个初速为零的电子,通过电压为 100V 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

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

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

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

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

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

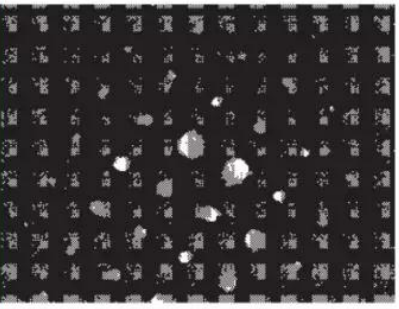


图 2-24　电子在单晶金上的衍射图样

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(如图 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。

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。

请你想一想，物质波是什么样的波？



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、氦等原子的衍射图样(如图 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

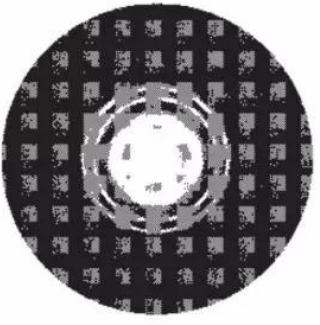


图 2-25　电子通过金箔的衍射图样

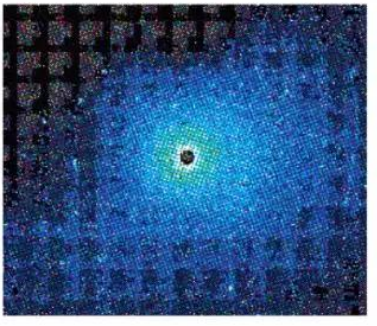


图 2-26　中子的衍射图样

的普遍属性，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谔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。不久薛定谔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。

拓展阅读

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道显微镜(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。

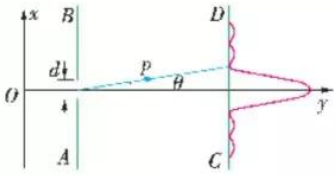


图 2-28　电子单缝衍射

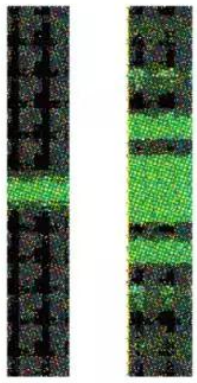


图 2-29　绿光的单缝衍射

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。

——普里戈金

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）。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 $\frac{h}{4\pi} = 5.3 \times 10^{-35}\ \mathrm{J \cdot s}$，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，看它接通电源后颜色的变化。你对它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 4.7eV，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

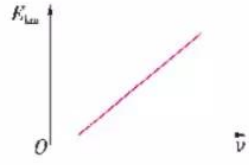


图 2–30

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？

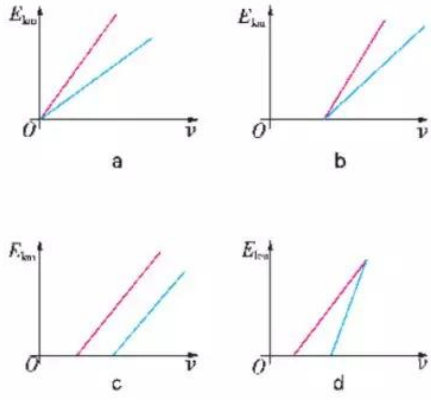


图 2–31

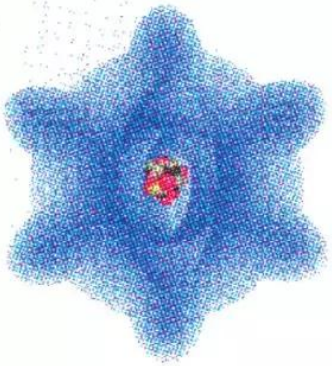


图 3-1　氟原子

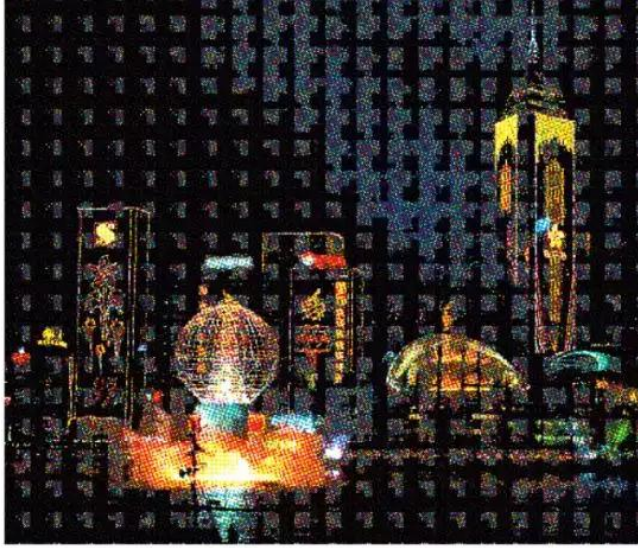


图 3-2　绚丽璀璨的霓虹灯

第 3 章
原子世界探秘

原子这个层次十分重要，在原子内有个极其复杂而神秘的微观世界，诱使人们去了解，去揭示……

我们已经知道，物体是由原子组成的。那么，原子是构成物质的最小微粒吗？原子内部有复杂的结构吗？这些问题诱使科学家们试图敲开原子的大门。为此他们进行了一系列激动人心的探索活动。研究物质的原子结构是意义极其重大的探索。这不但有助于人们对物质微观结构的认识，而且能极大地推动现代科学技术的发展。

人类是怎样发现原子内部有复杂结构的？

探索原子的结构经历了怎样的漫长过程？

迄今人们对原子结构的认识进入到一个什么样的层次？

神秘莫测的光又是怎样从物质中产生的？

本章以人类探索原子结构的历程为线索，从电子的发现开始，展示科学家探索原子结构的过程及有关的经典实验；让你体会人类在探究微观世界过程中的研究方法及其在现代科学发展中的作用和价值，认识在量子力学视野下的原子结构图景；最后通过对氢原子光谱的分析，让你了解原子的能级结构，以及光谱分析在科学技术中的应用。

3.1 电子的发现及其重大意义

长期以来，人类对于原子的认识，一直停留在哲学思辨的阶段。1808年，英国化学家道尔顿(J. Dalton)根据化学实验的结果，发表了“原子论”，说明物体是由原子组成的，同时他又断定：原子就像一个实心球，是不能再分割的。

原子真的不能再分了吗？19世纪末电子的发现，揭开了探索原子内部结构的序幕。

那么，电子是怎样发现的呢？电子的发现对人类探索原子结构有何重大意义呢？

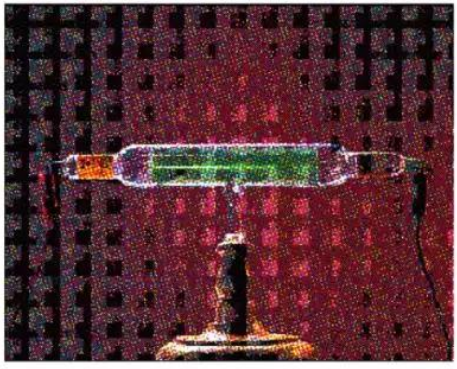
关于阴极射线的争论

19世纪中期，随着电学研究的进展和真空技术的提高，物理学家在研究稀薄气体放电现象中发现：将阴极射线管的阴极和阳极接上电源后，用真空泵逐渐抽去管内的空气，管内就会产生气体放电现象，并发出光来；当气压降得很低时，管内变暗，不再发光，但此时由阴极发射出的射线，能使荧光物质发光(图3-3)。

阴极射线究竟是什么？是光，还是原子？它带电吗？

这些问题引起了物理学家们的极大兴趣。对阴极射线的不同看法形成了两派：一派以英国的克鲁克斯(W. Crookes)为首，认为阴极射线是带电的粒子流；另一派以德国的赫兹为首，认为这些射线是一种类似紫外辐射的波长很短的电磁波。

图3-3 阴极射线管



物理学家纷纷走进实验室，试图探明阴极射线的性质。对阴极射线的研究，引发了19世纪末的三大发现：1895年伦琴(W. K. Röntgen)发现了X射线；1896年贝克勒尔(A. H. Becquerel)发现了放射性；1897年J·J·汤姆生发现了电子。

你能像物理学家那样，也设计一个实验，来探究阴极射线的性质吗？



图 3-4　研究阴极射线的装置

实验探究　研究阴极射线的带电性质

在《物理 3-1》中，你已经用阴极射线管来研究过洛仑兹力了。

如图 3-4 所示，给阴极射线管加上高压，将磁铁靠近阴极射线管，你观察到什么现象？

请思考：根据观察到的现象，你认为阴极射线是中性的，还是带电的？如果是带电的，带了哪种电？

汤姆生的发现



J·J·汤姆生（J. J. Thomson，1856—1940），英国物理学家。1897 年发现电子，于 1906 年获诺贝尔物理学奖。

阴极射线之争引起了英国物理学家 J·J·汤姆生的极大关注，他认为阴极射线是一种动能很大的带电粒子流。

为了研究阴极射线的带电性质，他设计了如图 3-5 所示的装置。从阴极发出的阴极射线，经过与阳极相连的小孔，射到管壁上，产生荧光斑点；用磁铁使射线偏转，进入集电圆筒；用静电计检测的结果表明，收集到的是负电荷。

为了进一步弄清这种带负电粒子的性质，必须称量出阴极射线中一个带电粒子的质量，但这种粒子的质量太小，显然无法直接称量。汤姆生采用的是测比荷的方法。这种方法是通过实验测出粒子的比荷 $\frac{e}{m}$ 和电荷 e，从而求得粒子的质量 m。

比荷是粒子所带电荷 q 跟粒子质量 m 的比值 $\frac{q}{m}$

汤姆生用如图 3-6 的装置测定了这种粒子的比荷。

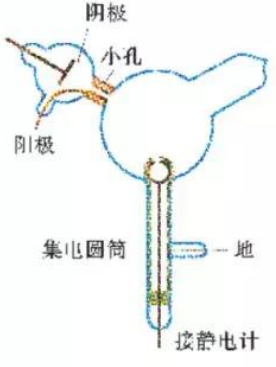


图 3-5　检测阴极射线带电性质的装置

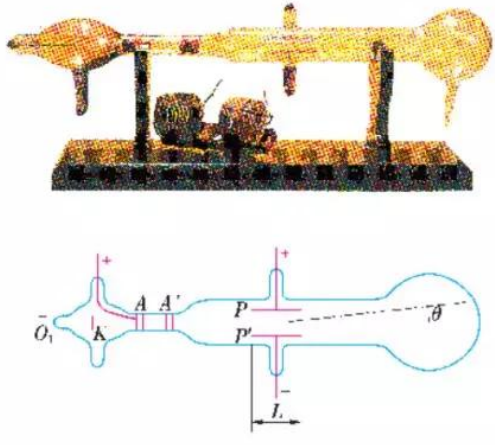


图 3-6　测定阴极射线粒子比荷的装置

从阴极 K 发出的阴极射线通过一对平行金属板 P、P' 间的匀强电场，发生偏转，偏转角 θ 与电场强度 E、极板长度 L 以及带电粒子的速度 v 的关系为：

$$\tan\theta = \frac{EeL}{mv^2} \tag{1}$$

请你用学过的知识证明上式。

然后再加一垂直于电场方向的匀强磁场，使粒子所受到的电场力与磁场力平衡，不发生偏转，由此可得：

$$v = \frac{E}{B} \tag{2}$$

将(2)式代入(1)式，并代入实验数据，求得这种粒子的比荷为

$$\frac{e}{m} \approx 10^{11}\ \mathrm{C/kg}$$

汤姆生通过进一步的实验，发现当改变阴极材料时，测得的比荷都相同，表明这种粒子是各种材料的共有成分。1898 年，汤姆生测出这种粒子所带电荷与氢离子的电荷数值接近，从而证明这种粒子的质量约是氢离子的千分之一。至此，这种粒子的“身份”已经明确：它是一种带负电的质量很小的粒子。物理学家把这种粒子叫做**电子**(electron)。

现在测得的电子比荷为 $e/m = 1.75880 \times 10^{11}\ \mathrm{C/kg}$，电子电量为 $e = 1.60219 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$，从而算出电子的质量是 $9.10953 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$，电子质量约为氢原子质量的 $\frac{1}{1837}$。

实验探究 **用洛仑兹力实验仪测定阴极射线的比荷**

图 3-7 是在《物理 3-1》中使用过的洛仑兹力实验仪。

你能用这个仪器测出阴极射线中电子的比荷吗？

实验中需测量哪些物理量？

怎样测量这些物理量？

怎样根据测量结果计算电子的比荷？

请进行实验，并将测量结果与同学们交流。

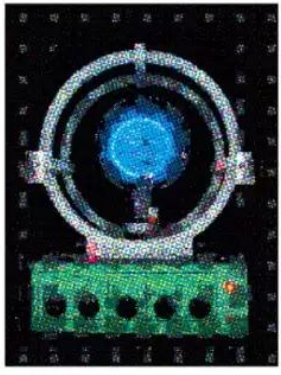


图 3-7 洛仑兹力实验仪

电子发现的重大意义

电子是人类发现的第一个比原子小的粒子。电子的发现，打破了原子不可再分的传统观念，使人们认识到原子不是组成物质的最小微粒，原子本身也有内部结构。从此，原子物理学飞速发展，人们对物质结构的认识进入了一个新时代。

家庭作业与活动

1. J·J·汤姆生是通过怎样的实验和推理过程发现电子的？
2. 你认为电子的发现，对人类探索物质微观世界有什么重大意义？
3. 图 3-8 所示为汤姆生用来测定电子比荷的装置。当极板 P 和 P' 间不加偏转电压时，电子束打在荧光屏的中心 O 点处，形成一个亮点；加上偏转电压 U 后，亮点偏离到 O' 点，O' 到 O 点的竖直距离为 d，水平距离可忽略不计；此时在 P 与 P' 之间的区域里再加上一个方向垂直于纸面向里的匀强磁场，调节磁感应强度，当其大小为 B 时，亮点重新回到 O 点。已知极板水平方向长度为 L_1，极板间距为 b，极板右端到荧光屏的距离为 L_2。

(1) 求打在荧光屏 O 点的电子速度的大小。

(2) 推导出电子比荷的表达式。

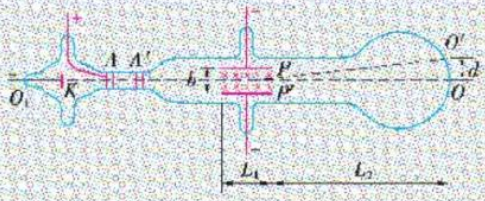


图 3-8

3.2

原子模型的提出

电子的发现，激发了人们探索原子内部结构的热情。

原子内部除了电子外，还有些什么？原子内部的结构又是怎样的？

在19世纪末和20世纪初，科学家还无法通过实验手段来揭示原子的内部结构，于是利用假设的方法，构思出一个个原子结构的模型，再通过实验验证和理论分析，一步步接近原子结构的真实图景。

人类追求科学真理和探索宇宙奥秘的强烈欲望，始终是科学发展的永恒动力。

汤姆生模型

20世纪初，科学家们提出了几种原子模型，其中最有影响的是J·J·汤姆生于1904年提出来的模型。汤姆生在发现电子后，便投入了对原子内部结构的探索，他运用丰富的想象，提出了原子枣糕模型(图3-9)。在这个模型里，汤姆生把原子看作一个球体，正电荷均匀地分布在整个球内，电子像枣糕上的枣子一样嵌在球中，被正电荷吸引着。原子内正、负电荷相等，因此原子的整体呈中性。汤姆生的模型是第一个有一定科学依据的原子结构模型，而不是哲学思辨的产物。

汤姆生的原子模型在一段较长的时间内得到科学家们的普遍接受。在此期间，一些科学家还提出了其他的一些原子结构模型。这些模型的提出与研究，使人们对原子结构的探索空前活跃。

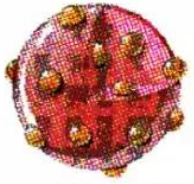


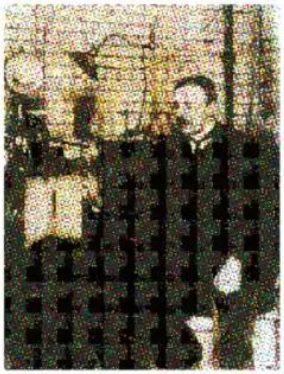
图3-9 汤姆生的原子枣糕模型

思考与讨论

1. 科学的原子模型与哲学上的思辨有何不同？

2. 一位科学家要提出科学的原子模型，你认为他必须具备一些什么条件？

出人意料的结果



卢瑟福（E. Rutherford，1871—1937），英国物理学家，20世纪最著名的实验物理学家之一。他在研究放射性现象和原子结构等方面都作出了重大的贡献。1908年获诺贝尔化学奖。

1909年，英国物理学家卢瑟福为了检验汤姆生模型的正确性，指导他的助手盖革（H. W. Geiger）和马斯登（E. Marsden）设计了一个引人注目的实验。

实验装置如图3-10所示。在一个小铅盒里放有少量的放射性元素钋，它发出的α粒子从铅盒的小孔射出，形成很细的一束射线射到金箔上。α粒子穿过金箔后，打到荧光屏上产生一个个闪光点。整个装置放在一个抽成真空的容器里。荧光屏和观察闪光的显微镜能够围绕金箔在一个圆周上运动。

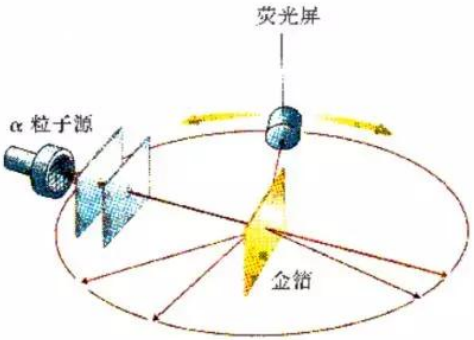


图3-10 α粒子散射实验示意图

实验表明，绝大多数α粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进，但是有少数α粒子却发生了较大的偏转，有的α粒子偏转角超过90°，极少数α粒子甚至被反弹回来。

α粒子的大角度散射现象是出人意料的。卢瑟福对实验的结果感到十分惊奇，他说："这是我一生中从未有的最难以置信的事，它好比你对一张纸发射出一发炮弹，结果被反弹回来而打到自己身上……"

讨论与思考

1. 如果汤姆生的原子模型是正确的，那么上述实验中，α粒子穿过金箔后的方向和分布应是怎样的？

2. 你对卢瑟福的上述说法是怎样理解的？

卢瑟福的原子核式结构模型

卢瑟福对他的实验结果进行了分析和计算，得出的结论是：除非原子的几乎全部质量和正电荷都集中在原子中心的一个很小的核上，否则，α粒子的大角度散射是不可能的。卢瑟福在这个实验的基础上，于1911年提出了他的原子核式结构模型。

在原子的中心有一个很小的核，叫做原子核(nucleus)，原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核上，带负电的电子在核外空间里绕着核旋转。

按照这个模型，原子内大部分的空间是空的，α粒子很容易穿过。当α粒子离原子核较远时，受到的库仑斥力很小，运动方向改变很小；只有当α粒子与核十分接近时，才会受到很大的库仑斥力，发生大角度的偏转。由于原子核很小，所以只有极少数α粒子发生大角度的偏转(图3-11)。

卢瑟福的原子核式结构模型，能很好地解释α粒子散射实验的结果，自然就取代了J·J·汤姆生的枣糕模型。

1911年，卢瑟福引起了自德谟克里特时代以来，我们物质观念上的最大变化。

——爱丁顿

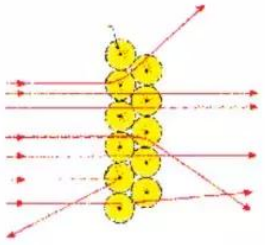


图3-11 用原子核式结构模型解释α粒子散射实验

讨论与思考

1. 卢瑟福说："我知道了！原子到底是什么样的，……可以将它想像成一个小的太阳系。"你是怎样理解这段话的？

2. 卢瑟福的原子核式结构模型与汤姆生的枣糕模型相比较，有什么不同？这个模型的建立，你认为在人类探索原子结构的进程中有怎样的重大意义？

原子核的电荷和大小

根据卢瑟福的原子核式结构模型，可以推导出α粒子的散射公式，利用这个公式和对不同元素进行α粒子散射实验所得的数据，就可以计算出各种元素原子核的电荷。当时得到碳核的电荷为6 e，铝核为13 e或14 e，金核为78 e或79 e，其中e是电子的电荷。这些元素的原子核电荷数非常接近于它们的原子序数，这为理解元素周期表提供了重要的线索，它说明元素周期表是按原子中的电子数来排列的。

原子核的电荷是研究原子的重要资料。原子是电中性的，知道了某种元素的原子核电荷数，就可以推算出这种原子内含有的电子数。

卢瑟福提出的原子核式结构模型，几乎改变了当时所有学科的基础，被认为是划时代的发现。

讨论与思考

1. 你从原子模型的提出与演进过程中得到了哪些启示？

2. 在科学家探索原子结构奥秘的过程中，哪些事例最使你感动？为什么？

课后作业与活动

1. J·J·汤姆生发现了电子，从而证明原子内部有带负电的电子。但原子是中性的，所以必定还有带正电的部分，这些正电荷具有什么性质？它们是怎样分布的？正、负电荷之间如何相互作用？原子内究竟有多少电子？电子的数目如何决定？怎样才能保持原子的稳定状态？面对这些问题，物理学家们根据自己的实践和见解从不同的角度提出了各种不同的模型。经过实践的检验，有的成功，有的失败。

   请你查阅文献，选取一些有代表性的例子来说明原子模型的历史演变过程。

2. 卢瑟福是怎样提出原子核式结构模型的？

3. 原子的直径约为 10^{-10} m，氢原子核的直径约为 3×10^{-15} m，若把氢原子放大，使核的直径为 1 mm，则电子离核的距离为多大？

4. α 粒子的质量大约是电子质量的 7300 倍。如果 α 粒子以速度 v 跟电子发生弹性正碰（假定电子原来是静止的），则碰撞后 α 粒子的速度变化了多少？

3.3

量子论视野下的原子模型

卢瑟福的原子结构模型很好地解释了α粒子的散射实验，初步建立了原子结构的图景。但是这个模型也存在一个致命的弱点。按照经典电磁理论，电子在围绕原子核高速旋转时，必然要向外辐射电磁波，辐射能量后的电子，将因原子核的引力作用而沿螺旋线运动，最终落到原子核上。这样，原子也将“塌方”，不再成为原子了。但事实上，原子的结构相当稳定。

这是怎么回事？怎样解决这个矛盾？



玻尔（N. Bohr，1885—1962）丹麦物理学家。于1913年把量子论与原子核式结构模型结合起来，提出了原子结构假说，因而获1922年的诺贝尔物理奖。

把量子论引入原子模型

1913年，丹麦物理学家玻尔为了解决上述矛盾，在卢瑟福模型的基础上，把普朗克的量子论引入了原子系统，建立了玻尔原子模型。玻尔理论的主要假设是：

（1）原子只能处于一系列不连续的能量状态中，在这些状态中的原子是稳定的，这些状态叫做定态。处于定态的原子并不对外辐射能量，只有当原子在两个定态之间跃迁时，才产生电磁辐射。

（2）原子从能量为E_m的定态跃迁到能量为E_n的定态时，辐射（或吸收）一定频率的光子，光子的能量由两个定态的能量差决定，即

$$h\nu = E_m - E_n$$

式中h为普朗克常量，ν为光子的频率。

玻尔在上述假设的基础上，还计算出氢原子的电子轨道半径（叫做玻尔半径）与电子在各条轨道上运动时氢原子的能量

$$r_n = n^2 r_1,\quad E_n = \frac{1}{n^2} E_1 \quad (n = 1, 2, 3, \cdots)$$

式中r_1表示第一条（即离核最近的）可能轨道的玻尔半径，E_1表示电子在这一轨道上运动时氢原子的能量；r_n表示第n条可能轨道的玻尔半径，E_n表示电子在这一轨道上运动时氢原子的能量。由此可见，电子围绕原子核运动的轨道半径是不连续的，只能

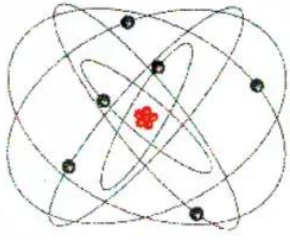


图 3-12 玻尔的原子模型

是一些分立的数值。

玻尔计算出了 r_1 和 E_1 的数值：

$r_1 = 0.53 \times 10^{-10}$ m，$E_1 = -13.6$ eV。

讨论与思考

玻尔的观点与经典物理学的观点有很大的不同：

1. 玻尔认为，处于定态的原子并不对外辐射能量。经典物理学的观点是怎样的？

2. 玻尔认为，电子只能在一些半径取分立值的轨道上运动，如氢原子中电子运动轨道的最小半径是 0.53×10^{-10} m，其他的玻尔半径只能是 2.12×10^{-10} m、4.77×10^{-10} m 等，玻尔半径不可能是介于这些数值之间的中间值。经典物理学的观点是怎样的？

能级　原子光谱

在玻尔模型中，原子的能量状态是不连续的，因而各定态对应的能量也是不连续的，我们把原子在各定态的能量值叫做原子的**能级**(energy level)。图 3–13 是氢原子的能级图。

在正常状态下，原子处于能量最低的状态，这时电子在离核最近的轨道上运动，这一定态叫做**基态**(ground state)。电子在其他轨道上运动时的定态叫做**激发态**(excited state)。基态和各激发态的能量分别用 E_1、E_2、E_3……表示。

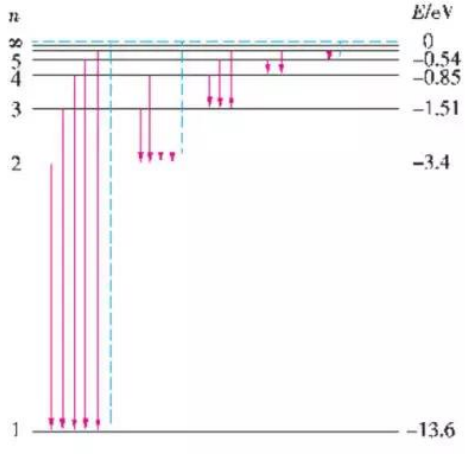


图 3–13　氢原子的能级



图 3-14 氢原子的光谱

原子处于基态时最稳定，处于较高能级的激发态时会自发地向较低能级的激发态或基态跃迁。原子从基态或较低能级的激发态向较高能级的激发态跃迁的过程是吸收能量的过程。给物体加热或用光照射物体时，物体中某些原子能够通过和互碰撞或从入射光子中吸收一定的能量，从基态或较低能级的激发态跃迁到较高能级的激发态。原子从较高能级的激发态向较低能级的激发态或基态跃迁的过程，是辐射能量的过程。在这一过程中，能量以光子的形式辐射出去，这就是原子的发光现象。原子吸收或辐射的能量，等于发生相应跃迁的两个能级的能量差。

各种物质的原子结构不同，能级分布也就各不相同。它们可能发射的光的频率也不同，每种元素的原子发出的光都有自己的特征，因而具有自己的原子光谱，图 3-14 显示了氢的几条谱线。

玻尔理论很好地解释了氢原子的光谱。由于原子的能级是不连续的，所以辐射的光子的能量也是不连续的。从光谱上看，原子辐射光波的频率只有若干分立的值。按照玻尔理论计算得到的氢原子光谱跟实验观察的结果符合得很好，而且还预言了一些新的谱线。

案例分析

案例 计算氢原子从 $n = 4$ 能级跃迁到基态时辐射光波的波长。

解答 根据玻尔理论，由 $h\nu = E_m - E_n$ 得到氢原子跃迁时辐射的光波频率为

$$\nu = \frac{E_4 - E_1}{h}$$

代入图 3-13 中的数据，再根据 $c = \lambda\nu$，即可计算出辐射光波的波长

$$\lambda = 9.75 \times 10^{-8}\ \mathrm{m}$$

玻尔理论的成就和局限

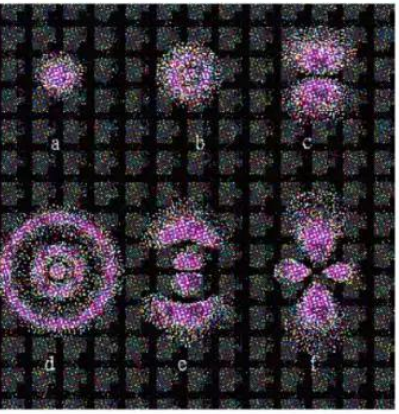


图 3-15　氢原子在各种定态时的电子云示意图

卢瑟福的原子核式结构模型发表后，几乎没有引起多少反响。玻尔将量子论引入原子结构理论后，科学界才予以重视，并将卢瑟福和玻尔的原子模型称为“卢瑟福–玻尔模型”。

玻尔理论在解释氢原子光谱上获得了很大成功，但在解释比较复杂的原子时遇到了困难，例如，有两个外层电子的原子光谱，用理论推导出来的结果跟实验事实出入很大。后来玻尔和其他物理学家研究了这些问题，终于明白这个理论成功之处在于它引入了量子观念，不足之处在于它保留了轨道的概念，没有彻底脱离经典物理学的框架，是“普朗克的量子观念与经典力学的混合模型”。但正是这种“混合”，打破了经典物理学一统天下的局面，为建立描述微观世界运动规律的量子力学奠定了基础。

量子力学表明，原子中电子的运动并没有确定的轨道，而是可以出现在原子内的整个核外空间，只是在不同的地方出现的概率不同。如果用疏密不同的点表示电子在各处出现的概率，画出图来，就像云雾一样（图 3-15）。因此人们把它叫做**电子云**（electron cloud）。对于氢原子，计算表明，玻尔原子理论中的电子轨道正是电子出现概率最大的地方。

家庭作业与活动

1. 根据玻尔理论，某原子的电子从能量为 E 的轨道跃迁到能量为 E' 的轨道，辐射出波长为 λ 的光，以 h 表示普朗克常量，c 表示真空中的光速，那么 E' 等于

A. $E-h\dfrac{\lambda}{c}$　　B. $E+h\dfrac{\lambda}{c}$

C. $E-h\dfrac{c}{\lambda}$　　D. $E+h\dfrac{c}{\lambda}$

2. 关于氢原子能级的跃迁，下列叙述中正确的是

A. 用波长为 60nm 的 X 射线照射，可使处于基态的氢原子电离出自由电子

B. 用能量为 10.2eV 的光子照射，可使处于基态的原子跃迁到激发态

C. 用能量为 11.0eV 的光子照射，可使处于基态的氢原子跃迁到激发态

D. 用能量为 12.5eV 的光子照射，可使处于基态的氢原子跃迁到激发态

3. 要使处于基态的氢原子电离，它所吸收的光子的频率至少是多大？

课题研究

观看有关的科普电影

观看有关介绍原子结构的科普影片，写一篇观后感。

3.4 光谱分析在科学技术中的应用

早在17世纪，牛顿就发现了日光通过三棱镜后的色散现象，并把实验中得到的彩色光带叫做光谱。1814年，德国物理学家夫琅和费(J. von Fraunhofer)对太阳光谱进行了细心的检验，并向慕尼黑科学院展示了自己编绘的太阳光谱图(图3-16)。这个光谱图内有多条黑线，夫琅和费对其中8根重要的黑线标以A至H等字母。这些黑线(称为夫琅和费线)后来就成为比较不同玻璃材料折射率的标准，并为光谱精确测量提供了基础。此后，许多科学家对光谱进行了实验研究，认识到光谱与物质的化学成分有关，从而促进了光谱分析技术的应用。



图3-16 太阳光谱

发射光谱和吸收光谱

根据光谱的形成条件，光谱可分为发射光谱和吸收光谱两类。

发射光谱

物体发光直接产生的光谱叫做**发射光谱**(emission spectrum)。发射光谱又有两种：连续光谱和明线光谱。

炽热的固体、液体以及高压气体的光谱，是由连续分布的包含有一切波长的光组成的，这种光谱叫做**连续光谱**(continuous spectrum，图3-17)，例如白炽灯丝、烛焰、炽热的钢水等发出的光都是连续光谱。

稀薄气体的光谱是由一些不连续的亮线组成的，这种光谱叫做**明线光谱**(line spectrum)。可以使用光谱管观察稀薄气体的光谱。当光谱管中的稀薄气体发光时，可用分光镜观察到这种气体的明线光谱(图3-18)。



图3-17 连续光谱

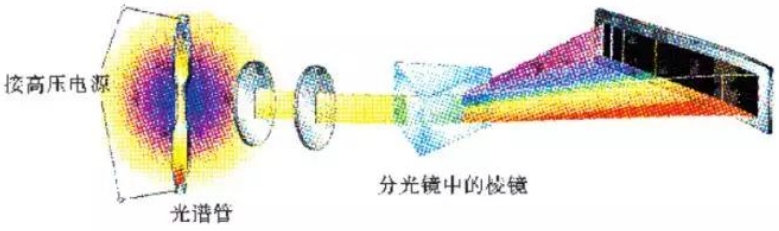


图 3-18　观察气体的明线光谱

把固态或液态物质放到煤气灯的火焰或电弧中加热，这些物质气化后发光，也可用分光镜观察到它们的明线光谱。

我们知道，每种元素的原子都有各自的发射光谱，这些光谱一般是明线光谱，即由一系列不连续的具有特定波长的谱线组成，这种谱线叫做元素的**特征谱线**(characteristic spectrum)。图 3-14、图 3-19 分别表示了氢和钠在可见光区域的特征谱线。



图 3-19　钠的特征谱线

吸收光谱

物体发出的白光，通过温度较低的物质时，某些波长的光被该物质吸收后形成的光谱叫做**吸收光谱**(absorption spectrum)。对于某些物质，用分光镜可观察到其吸收光谱是在连续光谱的背景上出现若干条暗线。例如，让炽热固体发出的白光通过温度较低的钠蒸气，就会观察到在连续光谱的背景上出现靠得很近的两条暗线(图 3-20)，这两条暗线的波长恰好跟钠蒸气发射光谱中的两条黄色亮线的波长相同。实验表明，各种原子的吸收光谱中的每一条暗线都跟这种原子的发射光谱中的一条亮线相对应。

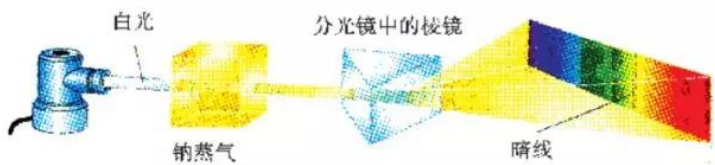


图 3-20　观察钠的吸收光谱

实验探究 观察原子光谱

如图 3-21 所示，光谱管是一支中间较细的封闭玻璃管，里面装有低压气体，管的两端有两个电极，电极连接在高压电源上。气体放电时，用分光镜（图 3-22）观察这种气体的光谱。

你通过分光镜观察到什么现象？

你能解释所看到的光谱的形成原因吗？

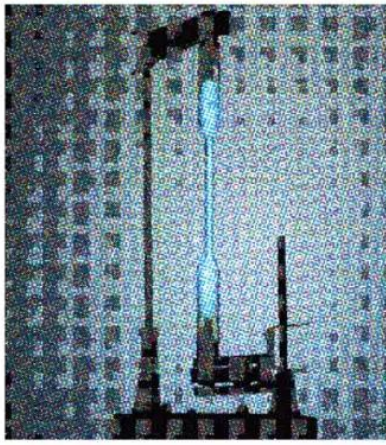


图 3-21 光谱管

光谱分析的应用

由于每种元素都有自己的特征谱线，因此可以根据光谱来鉴别物质和确定它们的化学组成，这种方法叫做光谱分析。在进行光谱分析时，可以利用发射光谱，也可以利用吸收光谱。光谱分析的优点是非常灵敏而且迅速。某种元素在样品中的含量只要有 10^{-10} g，就可以从光谱中发现它的特征谱线，从而把它检测出来。

光谱分析在科学技术中有着广泛的应用。例如，在检测半导体材料硅和锗是不是达到高纯度要求时，就要用到光谱分析。

历史上，光谱分析还帮助人们发现了许多新元素。例如，铯和铷就是人们通过分析光谱中的特征谱线而发现的。

利用光谱分析可以研究天体的物质成分。19 世纪初在研究太阳光谱时，人们发现它的连续光谱中有许多暗线。通过仔细分析这些暗线，并把它们跟各种原子的特征谱线对照，人们知道了太阳大气层中含有氢、氦、氮、碳、氧、铁、镁、硅、钙、钠等几十种元素。

光谱分析还能鉴定食品的优劣。例如，通过分析茶叶的近红外光谱，测定其各种化学成分的含量，就可以鉴定茶叶的优劣、级别、真假以及品种等。

用光谱分析还可以鉴定文物。例如，1978 年在新石器时代遗址浙江省余姚县河姆渡村，人们挖掘出一件木质漆碗，器壁外涂有一层朱红色的涂料，且微有光泽。借助光谱分析，鉴定出这种涂料与马王堆出土的漆皮类似，因此漆工艺的历史可追溯至 7000 年前。



图 3-22 分光镜



图 3-23 出土文物——木质漆碗

STS

氦：最先在太阳大气中发现的元素

1868年8月18日，印度发生日全食，法国天文学家让桑(P. Janssen)决定借这次日全食的机会，用分光镜研究一下太阳上的突出物——日珥的光谱。结果，他发现在日珥的D1、D2钠线旁边，还有一条黄色的明线。“它会不会是钠的另一条谱线D3呢？如果不是，那又是什么呢？”让桑这样想。为了探究这条新发现的谱线是否确实存在，他决定做进一步的观测研究，可是这次日全食已经结束了。第二天拂晓，让桑登上了一座高高的塔顶，当太阳刚从地平线下钻出来时，让桑把分光镜对准了太阳的最边缘。结果，前一天他所观测到的那条谱线又出现了。让桑立即写了一封信，向法国科学院报告这一重要发现。

有趣的是，法国科学院在同一天收到了两封信，一封来自让桑，另一封来自英国天文学家洛克耶(J. Lockyer)。洛克耶在不知道让桑观测结果的情况下，得到了同样的发现。

让桑和洛克耶在日珥光谱中发现的那条橙黄色明线(D3)是从哪儿来的呢？

1869年，洛克耶用实验进行了仔细的检查，但在当时已知元素的光谱中，找不到与D3线相对应的谱线。于是他认为，这是地球上所没有的太阳大气中元素产生的谱线。洛克耶把这种元素命名为Helium，原义为“太阳”。这就是我们现在所称的“氦”。历史上有一段时间，人们把氦称为“太阳元素”。

地球上真的没有氦吗？在D3线发现后的27年，一位名叫拉姆塞(W. Ramsay)的英国化学家终于在地球上也找到了氦。

家庭作业与活动

1. 月亮的光通过分光镜所得到的光谱是
   A. 连续光谱
   B. 吸收光谱
   C. 明线光谱
   D. 原子光谱
2. 下列说法中正确的是
   A. 炽热的固体、液体和高压气体发出的光形成连续光谱
   B. 各种原子的明线光谱中的明线和它吸收光谱中的暗线必定一一对应
   C. 气体发出的光只能产生明线光谱
   D. 甲物质发出的白光通过乙物质的蒸气形成了甲物质的吸收光谱
3. 下列说法中正确的是
   A. 进行光谱分析，可以用连续光谱，也可以用吸收光谱
   B. 光谱分析的优点是非常灵敏而且迅速
   C. 使一种物质发出的白光通过另一种物质的低温蒸气，取得吸收光谱，就可以对前者的化学组成进行分析
   D. 摄下月球的光谱，可以分析出月球是由哪些元素组成的

课题研究

调查光谱分析在产品成分测定中的应用

访问技术质量鉴定机构，了解利用光谱分析进行产品成分测定的方法。写一篇调查报告，并与同学们交流。

3.x

第3章家庭作业与活动

1. 在α粒子散射实验中，没有考虑α粒子跟电子的碰撞，其原因是
   A. α粒子不跟电子发生相互作用
   B. α粒子跟电子相碰时，损失的能量极少，可忽略
   C. 电子的体积很小，α粒子不会跟电子相碰
   D. 由于电子是均匀分布的，α粒子所受电子作用的合力为零
2. 在α粒子散射实验中，如果两个具有相同能量的α粒子以不同的角度散射出来，则散射角度大的这个α粒子
   A. 更接近原子核
   B. 更远离原子核
   C. 受到一个以上的原子核作用
   D. 受到原子核较大的冲量作用
3. 处于基态的氢原子在某单色光照射下，只能发出频率分别为ν_1、ν_2、ν_3的三种光，且$\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$，则该照射光的光子能量为
   A. $h\nu_1$
   B. $h\nu_2$
   C. $h\nu_3$
   D. $h(\nu_1 + \nu_2 + \nu_3)$
4. 用分光镜观察酒有食盐的酒精灯火焰的光谱，会看到什么现象？
5. 要使处于$n = 2$的激发态的氢原子电离，它需吸收的能量为多大？
6. 氢原子处于$n = 3$的激发态时，可能放出几种能量的光子？它们分别是什么类型的光？
7. 你用什么方法来判定太阳大气中有没有氧元素？

课题研究

关于人类探索原子结构的历史

去图书馆或上网查阅资料，了解人类探索原子结构的历史及有关经典实验，写出报告，与同学们交流。

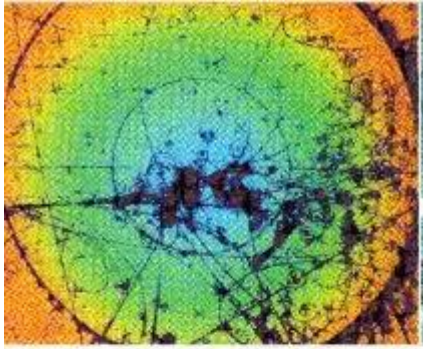


图 4-1　云室中的粒子径迹



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，并把理论探索紧密结合，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。

原子核是什么？它是由什么组成的？

原子核能不能再分裂？

浩瀚的宇宙跟微小的粒子之间有什么联系？

恒星的演化和微观粒子的变化存在着怎样的奥秘？

……

在本章中，我们将追随物理学家的足迹，首先认识原子核的结构；进而了解核的衰变，研究放射线的性质及其应用；最后，我们的眼光将向物质世界的两极延伸，了解恒星的演化过程及其与微观粒子变化的关系。

4.1 原子核结构探秘

中世纪的炼金术士们曾孜孜以求地追寻“点铁成金”的梦想，由于当时条件的限制，这个梦想只能是一个无法实现的幻想。

“点金术”梦想成真

从1917年起，卢瑟福就开始进行α射线轰击氮原子核的实验，他的实验装置如图4-3所示。若罐中充入氮气，当放射源与荧光屏的距离超过α粒子的射程很多时，仍能观察到屏上有明亮的辉光；但罐中充入氧气后，却观察不到任何闪光。经过三年的反复研究，卢瑟福终于弄明白：氮原子核在α粒子的轰击下发生了核反应，释放出了氢核，辉光是氢核引起的。

卢瑟福实验研究的特点是，不以猜想取代事实，只有用实验将各种因素一一排除，才能将事实的本质揭示出来。在打破原子核的研究上就是如此。

这个实验是历史上第一次人工核反应，炼金术士“点铁成金”的梦想终于成真。这个实验表明，可以用人工的方法改变原子核，把一种元素变成另一种元素。继卢瑟福的发现后，人们对多种物质进行了类似的实验，发现硼、氟、钠、铝、磷等原子核在受到轰击时，也会发射出氢核。于是，人们借用“原始”(prot)之义把氢核叫做**质子**(proton)，并认为质子是原子核的组成部分。

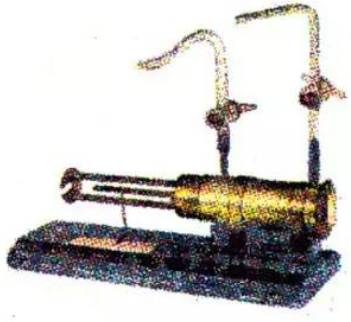


图4-3 卢瑟福用α射线轰击氮核的实验装置

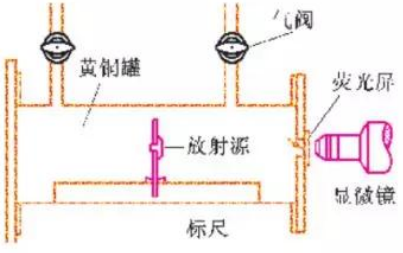


图4-4 第一次实现人工核反应的实验装置示意图

发现中子的艰难历程

卢瑟福的猜想

1920年，人们用质谱仪发现：在忽略电子质量的情况下，原子质量都是氢原子质量的整数倍，也就是说，原子核的质量是质子质量的整数倍。于是，人们认为原子核是由质子和电子组成的。但是困难马上就出现了：如果原子核是由质子和电子组成的，它的电荷数就应该与质量数基本相等，然而大量事实表明，多数原子核的电荷数只是质量数的一半或者还少一些，怎么解释这个现象呢？同年，卢瑟福在一次演讲中，提出了一个大胆的猜想：原子核内除了质子外，还存在一种质量与质子的质量大体相等但不带电的粒子，并认为这种不带电的中性粒子是由电子进入质子后形成的。在这之后，许多科学家开始用实验来探索这种不带电的中性粒子。

信息链接

布莱克特大海捞针——40多万条与8条

卢瑟福实验中发现的质子，是α粒子从氮核中打出的，还是α粒子打进氮核后形成的复核放出的？为了进一步弄清这个问题，1925年，英国物理学家布莱克特(P. M. S. Blackett)又在充氮的云室里做了这个实验。

实验设想是：如果质子是α粒子直接从氮核中打出的，那么在云室里就会看到4条径迹：入射α粒子的径迹、碰撞后α粒子的径迹、质子p的径迹、被击出质子后的核的反冲径迹（图4-5a）；如果是α粒子打进氮核后形成的复核放出的，那么在云室里就只能看到3条径迹：入射α粒子的径迹、质子p的径迹、核的反冲径迹(图4-5b)。

实验中，布莱克特拍摄了2万多张云室照片，终于从照片上的40多万条α粒子径迹中，发现有8条产生了分叉(图4-6)。分叉的情况表明，上述的第二种设想是正确的。从质量数守恒和电荷数守恒可以知道，这个人工核反应产生的新核是质量数等于17的氧核。

在云室的照片中，分叉后细而长的是质子的径迹，短而粗的是反冲氧核的径迹。

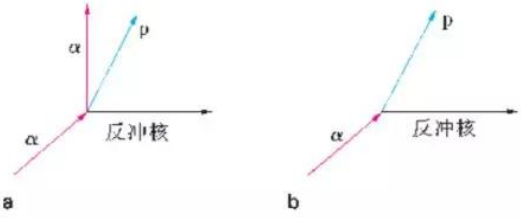


图4-5 布莱克特实验的两种可能结果

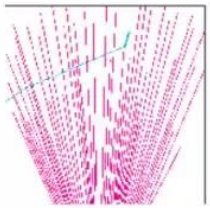


图4-6 α粒子打进氮原子核的示意图

小居里夫妇与中子失之交臂

1930年，德国物理学家博特(W. Bothe)和他的学生贝克(H. Becker)利用α粒子轰击铍时，发现了一种穿透力极强的射线，他们认为这是一种γ射线。1931年，居里夫人(M. S. Curie)的女儿、女婿约里奥-居里夫妇(F. Joliot-Curie and I. Joliot-Curie)对这种射线进行研究，他们除得到与博特、贝克相同的结果外，还发现这种高能量射线能使含氢物质放出质子。虽然他们在论文中指出，很难想象从原子核里会发射如此高能量的γ射线，但由于没能摆脱旧观念的束缚，仍把这种射线归为γ射线一类。

机遇偏爱有准备的头脑

英国实验物理学家查德威克对原子核内可能存在中性粒子早有思想准备。1932年，他在得知约里奥-居里夫妇的实验结果后，便用如图4-7所示的装置进行了更仔细的实验研究。



查德威克(J. Chadwick, 1891—1974)，英国物理学家。因发现中子获得1935年的诺贝尔物理学奖。

在实验中，查德威克发现这种射线在磁场中不发生偏转，可见它是中性粒子流。他又测出这种射线的速度不到光速的十分之一，这样就排除了它是γ射线的可能。他还用这种射线轰击氢原子和氮原子，打出了一些氢核和氮核。通过测量被打出的氢核和氮核的速度，推算出组成这种射线的粒子的质量跟氢核的质量差不多。查德威克进一步用其他物质来代替氢和氮反复做这个实验，得到的结论都是：这种未知粒子的质量和氢核的质量差不多。

这样，查德威克就验证了他的老师卢瑟福12年前的预言，原子核中确实存在着中性的、质量几乎与质子相同的粒子，并把它叫做**中子**(neutron)。

在这之后，查德威克通过实验，发现从各种元素的原子核里都能打出中子来，可见中子也是原子核的组成部分。

中子的发现是原子核物理学发展史上的一座里程碑。

请你查阅资料，谈一谈为什么这样评价中子的发现？

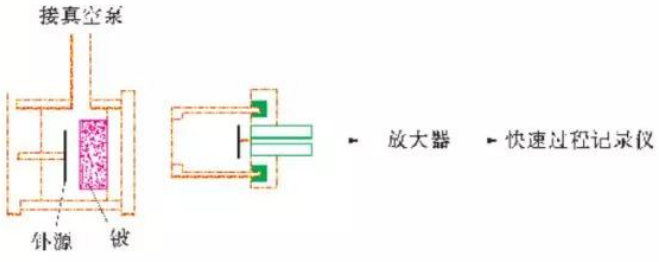


图4-7 查德威克发现中子的装置示意图

原子核的组成

在相继发现质子、中子的基础上，苏联物理学家伊万年科(Д. Д. Иваненко)和德国物理学家海森伯(W. Heisenberg)相继提出，原子核是由质子和中子组成的。

质子和中子统称为核子。质子带一个单位的正电荷，中子不带电。质子和中子的质量几乎相等，都等于一个质量单位，所以原子核的电荷数就等于它的质子数，原子核的质量数就等于它的质子数与中子数的和，即核子数。如原子序数(即核电荷数)为 Z、质量数是 A 的原子的核 X，有 Z 个质子和 $N(N = A - Z)$ 个中子。原子核用符号表示为 ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$。

例如，${}^{207}_{82}\mathrm{Pb}$ 表示原子序数是 82 的铅原子核，它的质量数是 207，它的核中有 82 个质子，有 $207 - 82 = 125$ 个中子。

为了表述方便，人们将中子表示为 ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$，它的质量数是 1，电荷数是 0；电子表示为 ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$，它的质量数是 0，电荷数是 -1。

原子核的符号有时可以省去下标，简写为 ${}^{207}\mathrm{Pb}$，还可以写成铅-207 或 Pb207。

具有相同质子数的原子，它们核外的电子数也相等，因而有相同的化学性质，属于同一元素。但它们的中子数可以是不同的，这些具有相同的质子数和不同的中子数的原子核，互称同位素(isotope)。

想一想：互为同位素的原子核，质量数是否相等？为什么？

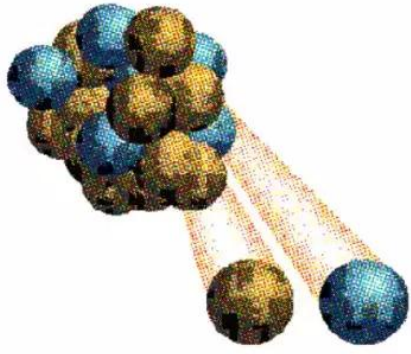


图 4-8　质子和中子组成原子核

核反应方程

在核反应中，参与反应的原子核内的核子（质子和中子）将重新排列或发生转化。用原子核的符号来表示核反应前后各原子核变化情况的式子称为核反应方程。核反应遵从电荷守恒定律和质量守恒定律，即核反应方程两边的质量数和质子数均是守恒的。

案例 卢瑟福发现质子的人工核反应如下图所示：



用核反应方程可表示为

$$^4_2He + ^{14}_7N \rightarrow ^{17}_8O + ^1_1H$$

请你检查方程两边的质量数和质子数（电荷数）是否守恒？

请分析：发现中子的实验是用 α 粒子轰击铍核（^9_4Be），核反应的产物是中子和另一个原子核。那么，另一个原子核是什么元素的原子核？写出核反应方程。

家庭作业与活动

1. 请分别用符号表示质子、α粒子、氦原子核、氧原子核。
2. 有 J、K、L 三种原子核，已知J、K的核子数相同，K、L的质子数相同，试完成下列表格。

原子核	原子序数	质量数	质子数	中子数
J	9	18		
K	Z	A		
L	10	19		

3. 铀-238 的核里有多少个质子，多少个中子？铜-63的核里有多少个质子，多少个中子？
4. 完成下列核反应方程：

$^{10}_5B + ^4_2He \rightarrow (\quad) + ^1_1H$

$^9_4Be + ^1_1H \rightarrow ^4_2He + (\quad)$

$^{27}_{13}Al + ^1_0n \rightarrow ^{28}_{13}Al + (\quad)$

$^{24}_{12}Mg + ^1_0n \rightarrow (\quad) + ^1_1H$

4.2 原子核的衰变

关于核结构的实验研究，实际上从19世纪末就已经开始了。这就是贝克勒尔关于天然放射性的发现，以及居里夫妇和卢瑟福对射线的研究。

天然放射性的发现

天然放射性是怎么发现的？这些射线的本质是什么？它们是从哪儿来的？

贝克勒尔的偶然发现

1896年，法国物理学家贝克勒尔在研究荧光和X射线之间关系时，准备把铀盐和一张用黑纸包得密不透光的照相底片一起放到太阳光下照射，不料一连几天都是阴雨，于是他只好把铀盐和照相底片一起锁进了抽屉。几天后，他惊奇地发现，放在抽屉里的底片竟感光了。



图4-9 第一张由铀盐射线感光的照片

经过反复探索，他发现只要照相底片放在铀盐附近，不管在多么黑暗的地方，底片上都会产生铀盐的阴影。贝克勒尔意识到，这个现象说明铀及其化合物放出了一种不同于X射线的新射线，这种射线可以穿透黑纸使照相底片感光。

物理学中把这种能自发地放出射线的现象叫做**天然放射现象**（natural radioactivity）；物质放出射线的性质叫做**放射性**（radioactivity）；具有放射性的元素叫做**放射性元素**（radioactive element）。

放射性元素普查

放射性是个别元素特有的，还是物质普遍具有的呢？

在贝克勒尔偶然发现的基础上，居里夫人首先深入研究了铀的放射现象，认识到放射现象是铀元素的一种特性。然后她对所有当时已经知道的化学元素进行了“普查”，结果发现钍也有放射性。

放射性并不是少数几种元素才有的，实际上原子序数大于83的所有天然存在的元素都具有放射性。原子序数小于83的元素，有的也有放射性。

在发现一块沥青铀矿能产生强烈的放射现象后，居里夫人和她的丈夫皮埃尔·居里(P. Curie)凭着惊人的毅力，进行了艰苦深入的探索，终于发现了放射性比铀强400倍的新元素“钋”和放射性比铀强200多万倍的新元素“镭”。

你知道居里夫人提炼和研究镭的经历吗？请查阅有关资料，并谈谈你对她的科学精神的体会。

天然放射线中的“三剑客”

“三剑客”姓甚名谁

放射性元素每时每刻都在放出射线，这些看不见的射线到底是什么东西呢？

科学家们经过努力，发现各种放射性元素所放出的射线有三种，真好比是“三剑客”：一种射线带正电，在磁场作用下发生偏转，偏转角度小，叫做α射线；另一种射线带负电，在磁场作用下与α射线“分道扬镳”，朝另一个方向偏转，偏转角度大，叫做β射线；还有一种射线不带电，在磁场中不偏转，叫做γ射线(图4-10)。

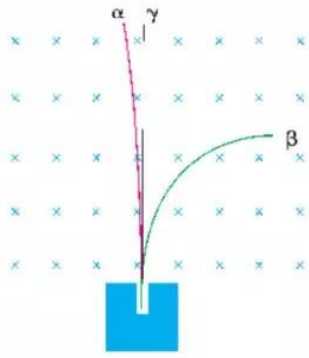


图4-10 “三剑客”

实验证明，这些射线是从原子核内发射出来的。α射线是α粒子流，α粒子就是氦原子核，带2个单位正电荷，质量数为4；β射线是高速运动的电子流；γ射线是波长很短的电磁波。

“三剑客”的本领

令人惊讶的是这“三剑客”都有“穿墙破壁”的本领。

α粒子射出时的速度大约是光速的十分之一，穿透物质的本领很小。能量为2MeV的α粒子，在空气中只能飞行1.7cm，一张薄锡箔或一张薄纸就能把它挡住。但它有很强的电离作用，很容易使空气电离，使照相底片感光。

β射线的速度几乎与光速相等，对物质的穿透本领比α射线约强100倍。能量为0.5MeV的β粒子，可以穿透1.6m的空气层，甚至穿透几毫米厚的铝板，但它的电离作用比较弱。

γ射线的穿透本领比β射线更强。能量为1MeV的γ射线，在空气中经过100m的路程，强度才减弱一半。它甚至能穿透几厘米厚的铅板，

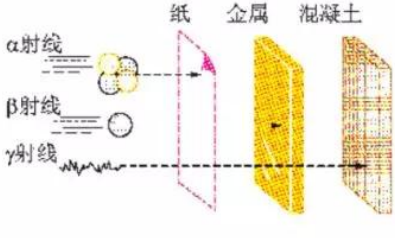


图4-11 α、β、γ射线穿透本领示意图

但它的电离作用很小。

请讨论：放射性元素放出射线后，它们的原子核还是原来的吗？

放射性元素的衰变

放射性的研究已经深深地修改了古老的原子观念，并且为几乎 30 种新型物质带来光明……同时，它已经给我们提供了一个很直接的方法，显示出作为物质结构中一个确实的物理和化学单位而单个存在的原子的有力方法。

——卢瑟福

原子核放出一个 α 粒子后，就变成了新的原子核。原子核由于放出某种粒子而转变成新核的变化，叫做原子核的**衰变**(decay)。

那么，原子核衰变的情况怎样呢？

正像在化学反应中原子数是守恒的一样，在核的衰变中电荷数和质量数都是守恒的。$^{238}_{92}U$ 核的衰变可用下面的方程来表示：

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He$$

这种放出 α 粒子的衰变叫做 α 衰变。它的规律是：新核的质量数比原来核的质量数减少 4，电荷数减少 2，因此新核在元素周期表中的位置要向前移两位。

在 β 衰变中，还会放出一个反电子中微子。

新核 $^{234}_{90}Th$（钍）也具有放射性，它能放出一个 β 粒子而变成 $^{234}_{91}Pa$(镤)。由于 β 粒子就是电子，电子的质量比核的质量小得多，可以认为它的质量数为零，因此一个原子核放出一个 β 粒子后，质量数不变。放出 β 粒子的衰变叫做 β 衰变。

请你仿照 $^{238}_{92}U$ 的衰变方程，写出 $^{234}_{90}Th$ 的衰变方程。

想一想：发生 β 衰变时，新核的电荷数变化多少？新核在元素周期表中的位置怎样变化？

放射性元素的原子核在发生 α 衰变或 β 衰变时，产生的新核往往处于高能量状态，这时它要向低能量状态跃迁，辐射出光子，产生 γ 射线。原子核放出 γ 射线时不再变成其他核。

你能从学过的物理知识中举一个原子核放出能量后从高能量状态变成低能量状态的例子吗？试比较一下放出能量前后的两个状态的稳定程度。

信息浏览

卢瑟福与α粒子

英国物理学家卢瑟福被人们称为“放射性之父”。1897年,26岁的卢瑟福着手对放射性元素铀进行研究。他发现铀放射出两种穿透性不同的射线,他给穿透性弱的一种取名α射线,给穿透性强的一种取名β射线。后来他又观察到由法国物理学家维拉尔(P. U. Villard)发现的穿透力更强的射线,卢瑟福给它取名γ射线。

卢瑟福和英国化学家索迪(F. Soddy)把观察到的放射性现象放在一起反复思考,于1903年得出了对放射性本质的理解。卢瑟福认为,放射性物质发出的α、β、γ这三种射线只是放射性物质衰变时出现的物理现象。这项工作使他赢得了1908年的诺贝尔化学奖。

卢瑟福的研究为人类迅速揭开了原子王国内部的秘密,开拓了原子物理学和原子核物理学的新领域。

放射性元素的半衰期

放射性元素的衰变规律是怎样的呢?它的寿命有多长呢?

对于单个原子核而言,它发生衰变的时刻是不确定的。但实验发现,一定量的放射性物质中发生放射性核衰变的量的变化却是有规律的。例如,1 g铋-210,由于β衰变,经过5天,就会有一半变成钋-210;再经过5天,剩下的0.5 g铋-210又会有一半衰变成钋-210。这就是说,放射性元素每经过一段时间,就有一半的核发生衰变,这段时间叫做放射性元素的**半衰期**(half life)。半衰期反映的是大量原子核的平均衰变速率。例如,一块矿石中的某些铀-238核可能立即发生衰变,而它们旁边的另一些核却可以平静地度过几十亿年仍不发生衰变,但每经过一个半衰期,总有一半的铀-238核发生了衰变。

每一种放射性元素都有一定的半衰期;不同的放射性元素有不同的半衰期,而且不同元素的半衰期可以相差很大。例如,铀-238的半衰期是4.5×10^9年,氡-222的半衰期是3.8天,而钋-214的半衰期只有1.64×10^{-4}秒。

放射性元素的半衰期是由其原子核本身决定的。一种放射性元素,不论它是以单质的形式存在,还是和其他元素形成化合物,也不论所处环境如何,它的半衰期都不会改变。

案例分析

案例1 图4-12反映了放射性原子核衰变过程中,剩余原子

核数 n 和衰变时间 t 的关系。

分析 可以看出，经过第一个半衰期 T，未衰变核数是 $n/2$，有 $n/2$ 的核发生了衰变。

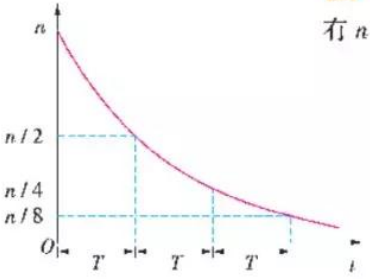


图 4-12 放射性原子核衰变规律

看图并回答：

1. 经过前两个半衰期（共经历 $2T$ 时间），发生衰变的原子核数是不是 n？

2. 第二个半衰期中发生衰变的原子核数是多少？未发生衰变的原子核数是多少？

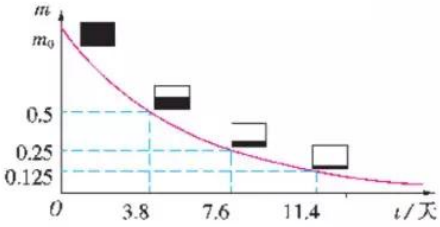


图 4-13 氡-222 的衰变规律

案例 2 图 4-13 表示氡-222 的衰变规律。m_0 为衰变前氡-222 的质量，m 为 t 时刻氡-222 的质量。

请讨论：

1. 图 4-13 的纵坐标表示什么？

2. 图 4-12 中的 n 和图 4-13 中的 m 有什么不同？有什么关系？

3. 氡-222 的半衰期是多少？经过 7.6 天和 11.4 天，分别有多少氡-222 发生了衰变？

部分放射性元素的半衰期

原子核	半衰期
$^{14}_{6}C$	5730 年
$^{24}_{11}Na$	15 小时
$^{60}_{27}Co$	5.27 年
$^{131}_{53}I$	8.04 天

信息浏览

大自然的“时钟”——碳-14

一座古墓被发掘出来了，科学家们从其中的一块木片就可以大致断定这座古墓是在多少年前建造的。你想知道其中的原因吗？

原来在地球的大气中，含有一定比例的碳-14，它是有放射性的。活的动植物从空气中吸收的碳中，既有不带放射性的碳-12，也有一定比例的碳-14。动植物死后，不能再吸收空气中的碳-14，于是动植物体中的碳-14 将通过衰变而逐渐减少。

碳-14 的半衰期是 5730 年。经实验测定，活的动植物体中 1g 碳的衰变率大约是 16 次/分。所以，如果一个被鉴定的样品，其中的每克碳的衰变率是 8 次/分，就知道它已经过了 5730 年之久，衰变率是 4 次/分，就是经过了 11460 年之久，以此类推。

这里用的方法叫做碳-14 测年法。现在利用先进的加速器质谱计，让碳-14 离子在加速器中获得

较高能量后，进入粒子探测器，通过直接测量被选定样品中碳-14的原子数来断定文物样品的年代。这种方法使考古年代可推至数十万年前，误差仅为数十年，测量精度非常高。



图4-14 考古工作者在用碳-14测年法鉴定出土文物的年代

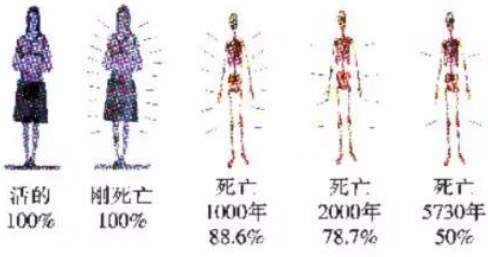


图4-15 碳-14测年法示意图：古生物遗骸中所含的碳-14经半衰期5730年减为一半

家庭作业与活动

1. 镭-226发生α衰变后变成什么？写出衰变方程。
2. 铀-238经过多少次α衰变和β衰变，变成铅-206？
3. 镭-226发生四次α衰变和四次β衰变，变成什么？
4. 已知钋-210的半衰期是5.0天，1 g钋-210经20天后还剩下多少？
5. 1 kg铀-238经过4.5×10^9年后剩下0.5 kg，其余的都衰变成了铅-206，求铅-206的质量和铀铅的质量比。

课题研究

碳-14测年法在考古工作中的应用

查找有关介绍碳-14测年法在考古工作中应用的资料，结合本节学习内容，就碳-14测年法在考古工作中的某项具体应用，发表自己的见解。

4.3

让射线造福人类

前面研究了天然放射性的衰变规律。那么，能否用人工的方法使元素放出射线呢？用怎样的仪器和方法进行探测呢？怎样驾驭它为人类服务呢？

正电子是美国物理学家安德森(C. D. Anderson)在1932年发现的，它的质量跟电子的相同，电量也相同，但符号相反，是正电荷，通常用 $^{0}_{1}e$ 表示。

人工放射性元素的发现

错失良机后的重大发现

1934年，约里奥-居里夫妇在用α粒子轰击铝箔时，除探测到了预料中的中子，还意外地探测到了正电子。他们把α放射源拿走后，仍能测到正电子。物质放射正电子的性能也随时间衰减，有一定的半衰期。原来，铝箔经α粒子轰击后，产生了一种具有放射性的新元素，是这种新元素在不断地放射出正电子。核反应过程可表示如下：

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{27}_{13}\mathrm{Al} \rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{0}_{1}\mathrm{e} + \nu_e$$

ν_e 叫电子中微子。

$^{30}_{15}\mathrm{P}$ 与天然磷比较，具有相同的质子数，但中子数不同。$^{30}_{15}\mathrm{P}$ 有放射性，衰变时放出正电子。

他们的这一重大发现，为发现更多的放射性元素开辟了全新的途径，开拓了放射性研究中的一个崭新的领域。

请讨论：了解了居里一家对科学的贡献后，我们可学到什么精神？

信息河流

“放射世家”

居里夫妇和他们的女儿、女婿约里奥-居里夫妇都因研究放射性而获得了诺贝尔奖。

1903年，因为在发现和研究天然放射性方面的开创性工作，居里夫妇和贝克勒尔分享了当年的诺贝尔物理学奖；1911年，因为分离出镭，居里夫人第二次获得诺贝尔奖，这一次是诺贝尔化学奖。虽然这项工作是自居里夫妇俩共同完成的，但这时居里夫人的丈夫皮埃尔·居里已经去世，而诺贝尔奖只颁发给在世的科学家，所以只有居里夫人一人获



图 4-16 居里夫妇在实验室



图 4-17 约里奥-居里夫妇在实验室

奖。居里夫人是第一位获得诺贝尔奖的女性，也是迄今为止世界上获得两次诺贝尔奖的极少数科学家中唯一的女性。

1935年，约里奥-居里夫妇因发现人工放射性同位素而荣获当年的诺贝尔化学奖。居里一家有五人次因研究放射性，获得了世界科学的最高奖——诺贝尔奖，真可称得上是一个"放射性家"。

放射性同位素知多少

天然放射性同位素只有几十种。1934年后，人们用质子、氘核、中子和γ射线来轰击各种原子核，得到了多种放射性同位素。现在，人们利用原子反应堆和加速器生产的放射性同位素，已达2000多种。

常用的几种放射性同位素

名称	符号	半衰期	生产方法及核反应方程
氚	${}_{1}^{3}\mathrm{H}$	12.3年	中子辐照，${}_{3}^{6}\mathrm{Li} + {}_{0}^{1}\mathrm{n} \rightarrow {}_{1}^{3}\mathrm{H} + {}_{2}^{4}\mathrm{He}$
钴-60	${}_{27}^{60}\mathrm{Co}$	5.3年	中子辐照，${}_{27}^{59}\mathrm{Co} + {}_{0}^{1}\mathrm{n} \rightarrow {}_{27}^{60}\mathrm{Co} + \gamma$
碘-131	${}_{53}^{131}\mathrm{I}$	8天	由裂变产物中提取
镭-226	${}_{88}^{226}\mathrm{Ra}$	1620年	天然放射性元素

探测射线的仪器和方法

放射性射线实际上都是微观粒子流，用肉眼是看不见的，那么怎样对它们进行探测呢？

人们根据射线的性能和所产生的效应，设计制造了专门的仪器来进行探测。下面介绍几种常用的探测仪器和探测方法。

计数器

计数器的主要部分是计数管，其结构如图4-18所示。它是一支玻璃管，里面有一个铜圆筒（或在管壁上涂有一层导电薄膜），这是阴极，穿过圆筒轴心的钨丝是阳极。管内充有低压惰性气体，工作时在两极间加上的电压通常略低于管内气体的击穿电压。

一个带电粒子或一个γ粒子（光子）射进管内，会使管内气体

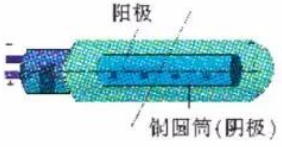


图 4-18 计数器结构示意图

发生电离。电离产生的电子和正离子在强电场作用下分别向阳极和阴极加速运动，跟管内的气体分子发生碰撞，产生新的电子和正离子。在极短时间内这个过程会发生很多次，于是产生大量电子，使计数管电路中出现一次相当强的电流。

这个电流经放大器放大，由计数器记下，表明有一个粒子进入了计数管。高级的计数器每秒钟能计数 1 万次以上。

云室

计数器只能记录粒子进入计数管的次数，而利用云室就可以显现出粒子的径迹。

云室的主要结构如图 4-19 所示。圆筒形容器的下底是一个可在小范围活动的活塞；上盖是透明的，通过它可观察室内发生的现象或进行照相。放射源可放在室内侧壁附近，也可放在室外侧壁的窗口。

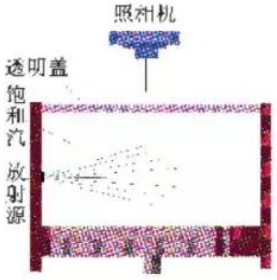


图 4-19　云室结构示意图

实验时，在云室内加一些酒精，使室内充满饱和汽。然后使活塞迅速向下移动一段距离，室内气体由于突然膨胀而温度降低，使酒精的饱和汽处于过饱和状态。这时如果有能量较高的粒子从室内气体中飞过，就会使沿途的气体分子电离产生离子，过饱和汽便以这些离子为核心凝结成一条雾迹。

各种粒子的电离本领不同，因此它们在云室中的径迹也不同。

请思考：为什么云室中 α 粒子径迹粗而直，β 粒子径迹细而弯，γ 粒子径迹细而碎？

乳胶照相

利用高速运动的带电粒子能使照相底片感光的特性，可以直接用照相底片来得到粒子的径迹。

高速粒子从底片的乳胶层中通过时，会使其中的溴化银晶粒电离形成潜像。经显影和定影，便可显出粒子的径迹。乳胶照相的优点是可以连续记录，并可得到完整的径迹，便于判断粒子的性质和行为。图 4-20 是粒子在乳胶中碎裂的径迹。

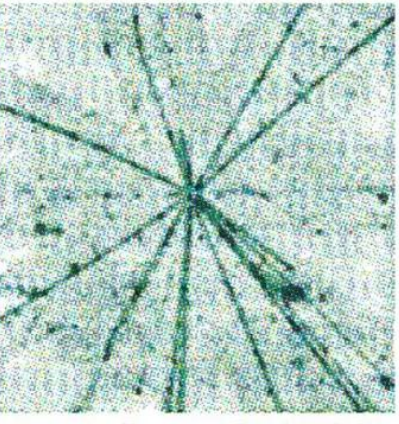


图 4-20　粒子在乳胶中碎裂的径迹

射线是把双刃剑

射线有益也有害，我们怎样扬其长、避其短呢？

射线的应用

作为射线源 放射性同位素在工农业生产、医疗卫生和科学研究各个方面已有广泛应用。

在检查物体内部情况的时候，用同位素放射源比用X射线方便得多，不需要用复杂的X射线机，只用很少量的放射性元素就可以了。常用的放射源是钴-60，它能放出很强的γ射线。检查的时候，可以"透视"或照相，也可以用计数器来探测透过被检查部件的射线的强度。

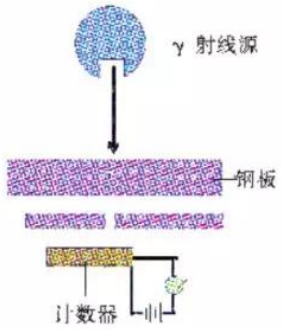


图 4-21 无损探伤的示意图

由于透过物体的射线的强度跟物体的密度和厚度有关，因此可以用射线来检查产品的厚度、密封容器中液面的高度等。这种检查可自动地进行，并可根据检查的结果控制生产过程或发出必要的报警信号。

利用射线的生物效应，可以消灭害虫，杀菌消毒，治疗癌症，保藏肉类、水产、谷物和水果，抑制马铃薯发芽，改良种子等。

利用射线的化学效应，可以促进高分子化合物的聚合反应，以制造各种塑料或改善塑料的性能。此外，还可以利用射线使石油裂解，增加汽油的产量。

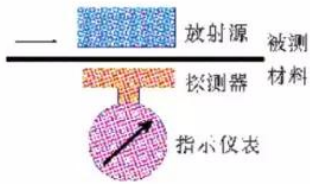


图 4-22 用射线监测产品厚度的示意图

作为示踪原子 我们知道，一种元素的各种同位素具有相同的化学性质，因此用放射性同位素制成的化合物，在经历各种过程时会不断地放出射线。由此可以掌握它的踪迹，研究它所经历的变化。这种用途的放射性同位素，通常叫做示踪原子。

例如，在内燃机的活塞上装以有放射性同位素铁-59的活塞环时，通过测量润滑油中的放射性就可以弄清楚活塞跟汽缸壁的磨损情况，不必拆开内燃机去检查。

在农业施肥中，在肥料中加一些放射性同位素，就会知道哪种农作物在什么季节最能吸收含有哪种元素的肥料。

在医学中，利用放射性同位素可以了解病人的血液循环情况和食物消化情况，以及诊断某些疾病的病变情况。

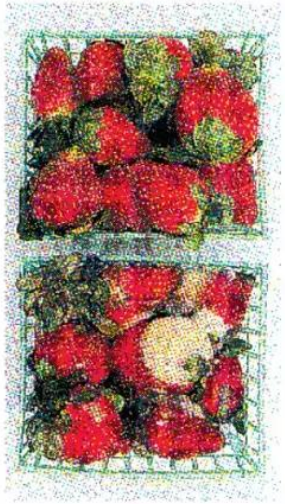


图 4-23 上图的草莓是用射线照射过的，仍保持新鲜；下图的草莓没有经射线照射，开始腐烂

放射性污染及其防护

随着核工业的出现和发展，人们将越来越多地利用核能和放射性同位素。但放射性对人体是有危害的，而且会污染环境，因此我们应懂得如何防护。

人类从来就生活在自然辐射的环境中。我们周围的空气、水和各种食物，都有一定的放射性。人体中也有一些放射性物质，如钾-40和碳-14等。它们在体内也放出射线，对人体产生内辐射。通常这种自然条件下的内外辐射都很弱，并没有发现对人体的健

康有什么影响。

但是，过强的辐射，无论哪种射线（包括电磁辐射），都会对生物体造成危害。科学的发展已使我们掌握了安全生产和使用放射性物质的方法。在使用放射性物质时必须严格遵守操作规程，不准用手接触；废弃不用的，也不能随便丢掉，应交有关部门处理，或者在指定地点深埋于地下，并要远离水源。特别要注意防止放射性物质对空气、水源和食品的污染。只要我们对防射性有清醒的认识，防止它对人体不利的一面，利用它能为人类服务的一面，就会使它在我国的现代化建设中发挥出应有的作用。

STS

利用放射性同位素检查甲状腺功能

图 4-24 是用碘-131 检查人体甲状腺功能的示意图。正常人甲状腺吸收碘的数量是一定的，如果患有甲状腺功能亢进（简称甲亢），碘就在甲状腺里聚集得又多又快；反过来，如果甲状腺功能低下（简称甲低），碘在甲状腺里聚集的数量就显著下降。

给病人口服含有极微量的碘-131 的药剂，经过一定时间，用探测器在甲状腺部分附近探测放出的 γ 射线的强度，就可以诊断出甲状腺的功能。



图 4-24　用碘-131 检查人体甲状腺的功能

课后作业与活动

1. 医学上作射线治疗用的放射性元素，应选半衰期长的还是短的？为什么？
2. 为什么说射线是把双刃剑？请查阅资料加以说明。
3. 简述探测射线的主要方法。

课题研究

调查住房装修材料的放射性

查找有关装修材料在放射性方面的标准；了解如何检测装修好的住房中的放射性；讨论如何减少装修住房带来的放射性。

4.4 粒子物理与宇宙的起源

物质结构的更深层次

粒子世界

在知道原子核是由质子和中子组成的之后，人们以为电子、质子、中子等是组成物质的最基本的粒子，曾把它们叫做“基本粒子”。用这种观点能成功地解释各种原子核的一些性质和核反应的一些规律。但是，还有一些现象不能解释。如核里并不存在电子，那么β射线是怎样产生的？于是人们怀疑，“基本粒子”是否基本？它们是否有着更深层次的结构？

1912年，奥地利物理学家赫斯(V. F. Hess)通过气球上进行的高空观测，证实有射线从宇宙空间射来。之后，许多物理学家长年坚持对宇宙射线进行观测，从中发现了一些新的粒子。

宇宙射线中粒子的能量很高，但数量很少。人们用高能加速器进行实验，发现了更多的新粒子。如1932年发现了正电子，1937年发现了μ子，1947年发现了K子和π子，此后不久又发现了Λ子。

现在已发现的粒子总数达400多种，难道它们都是“基本”的吗？特别是参与强相互作用的粒子(称为强子)，形形色色，种类繁多，他们会不会有内部结构呢？

夸克

在许多科学家工作的基础上，美国物理学家盖尔曼(M. Gell-mann)于1964年提出了强子的夸克模型，认为强子是由夸克构成的。

今天，一系列的实验证实了夸克的存在。在夸克模型中，人们最初预言的三种夸克是上夸克(u)、下夸克(d)和奇异夸克(s)。后来又相继发现第四种夸克——粲夸克(c)、第五种夸克——底夸克(b)。最后在1994年，由美国费米实验室发现了第六种夸克——顶夸克(t)。

有趣的是，夸克所带的电荷是分数电荷，例如上夸克的电荷



图 4-25　中子包含两个具有 $-e/3$ 电荷的下夸克和一个具有 $+2e/3$ 电荷的上夸克，总电荷为零

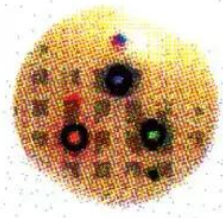


图 4-26　质子包含两个具有 $+2e/3$ 电荷的上夸克和一个具有 $-e/3$ 电荷的下夸克

为 $+2e/3$，下夸克的电荷为 $-e/3$。不过需要强调的是，至今人们仍不能将夸克从强子中打出来，即无法获得自由的夸克，夸克始终被“禁闭”着，这是一个尚未解开的谜。

夸克是当今粒子物理学研究的第一个粒子家族。第二个家族是轻子，它们不参与强相互作用。轻子包括电子、μ 子、τ 子以及与它们相联系的三种中微子。第三个粒子家族是传递相互作用的粒子，目前包括传递电磁作用的光子、传递弱相互作用的中间玻色子 $W^{\pm}$、Z^0，以及传递强相互作用的胶子。

多学一点　反物质

1932年，美国物理学家安德森在对宇宙射线的研究中，利用云室观察到了人们预言过的电子的反粒子，即正电子。

正电子是人们发现的第一个反粒子。此后，一些反粒子相继被人们发现：1955 年，发现反质子；1957 年，发现反中子；1959 年，我国物理学家王淦昌等发现反西格玛负超子。随着反粒子的不断发现，科学家开始设想：如果用反质子和反中子代替原子核中的质子和中子，就可以得到一个反原子核，再配上相应的正电子，就可得到一个反原子，我们可用反原子构成反分子，而反原子和反分子则构成反物质。



图 4-27　你和“反你”可别握手，一旦握手，将会同时消失

反粒子（反物质）最显著的特点是：当它们与相应的正粒子（物质）相遇时，会发生“湮灭”，即同时消失而转化成别的粒子。

加速器和粒子物理

粒子物理学研究的工具是高能加速器和粒子探测器。在粒子物理学中，通常称 1×10^8eV 以下为低能（原子弹爆炸时平均每个核子释放的能量只在 10^6 eV 的量级），$1 \times 10^8 — 3 \times 10^9$ eV 为中

能，3×10^9 eV 以上为高能。高能加速器是指粒子能量在 3×10^9 eV 以上的加速器。粒子束流能量越高，波长越短，越能深入到粒子内部去获得更多的信息。

20世纪 60 年代的高能加速器使用固定靶，只加速一种粒子，有效能量不高。后来发展的对撞机同时加速两种粒子，使它们沿相反方向加速运动并相撞，有效能量高。我国在 1989 年建成的北京正负电子对撞机，能量为 5.6×10^9 eV。能量虽然较低，但对撞亮度高，工作在粲夸克和 ψ 粒子的研究领域。西欧核子研究中心的大型正负电子对撞机（Large Eletron Positron Collider，简称 LEP）是目前能量最高的正负电子对撞机，能量为 1×10^{11} eV，主要加速器周长 27km。



图 4-28 中国科学院高能物理研究所 3.5×10^9eV 质子直线加速器的加速腔

自然界两极的奇妙汇合

暴胀的宇宙

20 世纪 40 年代，在大量天文学观测的基础上，物理学家提出了宇宙演化的大爆炸假说。它的主要观点是，宇宙是由一个超高温、超高密度的“原始火球”发生大爆炸而开始的。然后经历了从热到冷的演化，在这个时期里，宇宙不断地膨胀（也称暴胀），宇宙物质从密到稀。当温度下降到几千度时，宇宙间主要是气态物质。后来气体逐渐凝聚成气云，并且进一步收缩形成各种各样的恒星

信息浏览

丁肇中的实验研究

1974年 12 月，美籍华裔物理学家丁肇中教授领导的一个小组发现了一种新粒子，他把它命名为 J 粒子。几乎同时，美国物理学家里克特（B. Richter）领导的一个实验小组也找到了这种粒子，但把它命名为 ψ，所以现在这种粒子叫做 J/ψ 粒子。

J/ψ 粒子的质量是质子的 3 倍多，寿命比同类粒子（重光子）长 3 个数量级，因此丁肇中风趣地说他“发现了享年一万岁的新人种”。为了解释 J/ψ 粒子的这种特性，需要引入当时已知的三种夸克之外的一种新夸克，这种夸克称为粲夸克，J/ψ 粒子是由粲夸克 c 和它的反粒子 $\bar{c}$ 所组成的。自此，强子的夸克模型便扩展到四夸克理论。

丁肇中主要从事实验粒子物理学的研究工作，在电子和 μ 子物理学、量子电动力学、重光子性质等方面都有深刻研究。由于发现 J/ψ 粒子，他荣获了 1976 年的诺贝尔物理学奖。



丁肇中（1936— ），美籍华裔物理学家。1976 年因发现 J/ψ 粒子而荣获诺贝尔物理学奖。

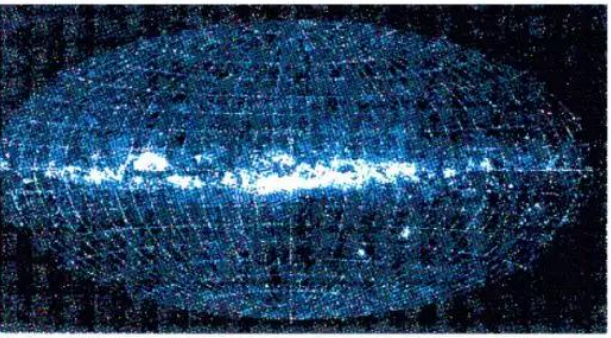


图 4-29　银河系全景图

体系，成为我们今天看到的宇宙天体。

宇宙未来是继续像现在这样永远膨胀下去？还是有一天会收缩？还是膨胀收缩交替进行？这又是一个有待人们探索的课题。

恒星的演化

新陈代谢是宇宙的普遍规律，恒星也不可避免地有它的诞生、演化和消亡的过程。恒星的演化是天体演化的重要部分。

浩瀚的宇宙空间，弥漫着大量密度很低的星际物质，它们逐渐凝聚成团块，这种团块称为星云。大块的星云由于引力作用而收缩，逐渐凝成原恒星。

原恒星继续收缩，在收缩过程中，温度不断升高。当其中心温度达到 7×10^6 K 时，氢聚变成氦的热核反应成了恒星的主要能源。当热核反应产生的斥力与引力作用达到平衡时，恒星不再收缩，进入相对稳定阶段，恒星的大小及其温度都没有太大的变化。这是恒星一生中时间最长的“中年”时期。迄今发现的恒星中 90% 处在这一阶段。这一阶段的具体长短取决于恒星质量的大小，太阳在这一阶段已停留了 50 亿年，估计还要停留 50 亿年左右。

随着核聚变的进行，恒星中心的氦核越来越多，氢核周围的氢越来越少。当氦核质量占到恒星质量的 10%—15%时，由于核反应的能量供应不足，恒星的稳定状态遭到破坏，引力作用又开始大于斥力，星体又开始收缩，温度又随之上升。当中心收缩到使温度达到 1×10^8 K 时，就产生了一个新的热核反应——“氦燃烧”，即由氦核聚变为碳。此时，恒星发光能力增强，光度增加。另



图 4-30　哈勃空间望远镜拍摄到的正在尘埃和气体云中诞生的新恒星。右上的小图是修理中的哈勃空间望远镜

外一部分能量则使其外部膨胀，表面积增大，但表面温度并不高，看上去呈红色。这时，恒星便演化为红巨星。

恒星核能耗尽后，就进入末期。恒星的末期形态主要有三种：白矮星、中子星和黑洞。

小粒子与大宇宙

宇观世界和微观世界之间存在着巨大的差异。从空间范围来讲，宇观世界现已扩展到现代天文学观测手段所能探及的约10^{27}m之远的宇宙深处；微观世界则已深入到约10^{-19} m之微的夸克和轻子。从时间范围来讲，宇观世界的“寿命”至少不少于150亿年；微观世界中的粒子寿命有的长达10亿年，而有的却短到仅10^{-23} s。这两个在空间上和时间上有“天壤之别”的世界之间，却存在着千丝万缕的联系。

要真正理解我们的宇宙，就必须从研究极微小的粒子开始，看看那里都发生了些什么情况，然后再来遥望整个宇宙，因为宇观世界的许多基本问题往往可在对微观世界的研究中得到解决。其实，任何关于其中一个世界的新知识，都可以促进人们对另一个世界的了解。

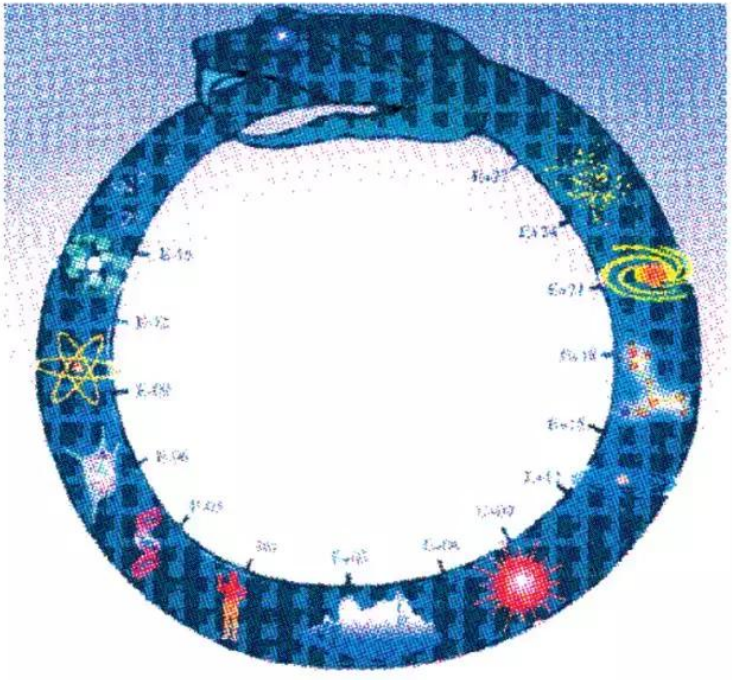


图4-31 宇观世界与微观世界紧密联系

1979年诺贝尔物理学奖获得者格拉肖(S. Glashow)曾经非常形象地把大至宇观世界小至微观世界的"链条"比喻成一条咬住自己尾巴的大蛇(图 4-31),蛇首对应于整个宇宙,中间有星团、星系、脉冲星、恒星,直到分子、原子、原子核、夸克,而蛇尾就是目前所知的质量最小的中微子。极端相通,宏观世界和微观世界紧密联系在一起!

物理学家的追求——统一场论

尽管人们对宇观世界和微观世界的研究离既定目标都还相当遥远,但是,物理学家已经把自然界多得数不胜数的力,归结为强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、引力相互作用这四种作用。物理学家的进一步追求,就是把这四种各有特色的相互作用再综合在一个统一的理论体系中。追求统一的理想,鼓舞着科学家们不断努力,探索奥秘,造福人类。

课后作业与活动

1. 粒子是如何分类的?
2. 夸克有几种?目前找到自由夸克了吗?
3. 你对物质的层次结构有什么见解?

课题研究

关于向自然界两极进军的最新进展

查阅资料,就人类在向自然界两极进军的最新进展进行交流。

4.x

第 4 章家庭作业与活动

1. 什么是放射性元素？α 射线、β 射线和 γ 射线的本质是什么？三种射线的性质有什么异同？在 α 衰变和 β 衰变过程中，原子核的变化有什么规律？各举一例说明，怎样表示放射性元素衰变的快慢？
2. 下面是四种元素的同位素的原子核：

$$^{18}_{8}X,\ ^{3}_{2}X,\ ^{50}_{22}X,\ ^{197}_{79}X$$

请将 X 改为具体的元素符号，并说明每个原子核中的中子数。

3. 放射现象是怎么产生的？为什么原子序数大的元素容易有放射性？
4. 用 α 粒子轰击氩-40 时，产生一个中子和一个新的核。这个新核是什么？写出核反应方程。
5. 用 α 粒子轰击硼-10，产生一个中子和一个具有放射性的核，这个核是什么？这个核能放出正电子，它衰变后变成什么？写出核反应方程。
6. 用中子轰击氮-14，产生碳-14，碳-14 具有 β 放射性。它放出一个 β 粒子后衰变成什么？写出核反应方程。
7. 用中子轰击铝-27，产生钠-24，写出核反应方程。钠-24是具有放射性的，衰变后变成镁-24，写出核反应方程。
8. 铀-238 衰变为镭-226 的过程如下：

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th \rightarrow ^{234}_{91}Pa \rightarrow ^{234}_{92}U \rightarrow ^{230}_{90}Th \rightarrow ^{226}_{88}Ra$$

各次衰变放出的粒子是什么？请标在箭头的下面。

9. 锶-82 的半衰期是 25 天，如果有 140 g 锶-82，那么经过多少天剩下17.5g？再经过多少天剩下的量不足 1g？
10. 铀-238 的半衰期是 4.5×10^9 年。假设一块矿石中含有 1 kg 的铀-238，经过 4.5×10^9 年（相当于地球的年龄）以后，还剩有多少铀-238？假设发生衰变的铀-238 都变成了铅-206，矿石中会有多少铅？这时铀铅的比例是多少？再经过 4.5×10^9 年，矿石中的铀铅比例将变成多少？根据这种铀铅比例能不能判断出矿石的年龄？
11. 钍-230 是 α 放射性的，它放出一个 α 粒子后变成了什么？写出衰变方程。
12. 钫-223 是 β 放射性的，它放出一个 β 粒子后变成了什么？写出衰变方程。
13. 铋-210 的半衰期是 5 天。10 g 铋-210 经过 20 天后还剩下多少？
14. 带电的验电器在射线照射下电荷会很快消失。请说明其中的原因。
15. 用 α 粒子轰击氮核使它发生核反应。为什么可以确定云室照片上那细而长的径迹是质子的，粗而短的径迹是反冲氧核的？

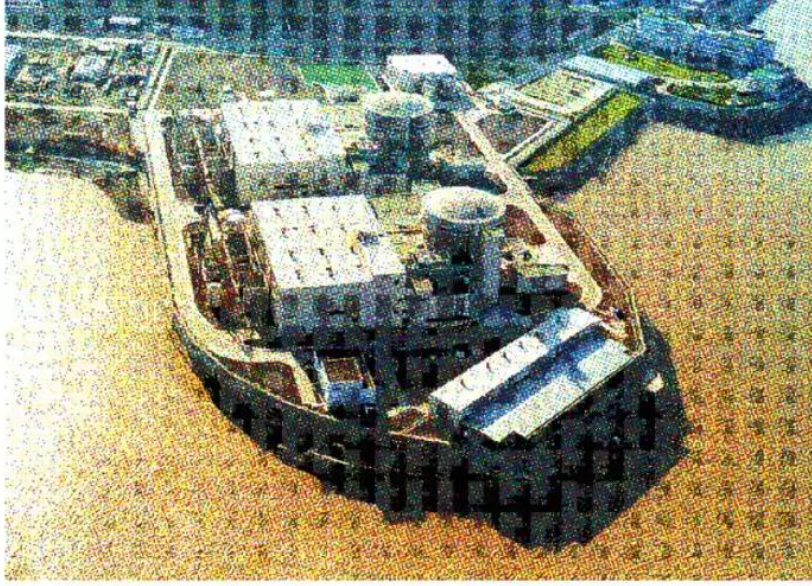


图 5-1　秦山核电站全景

第 5 章
核能与社会

纵观历史，每一次在能源利用上的里程碑式发展，都伴随着社会与生产的巨大飞跃：火的使用，使远古人类茹毛饮血的年代一去不复返；18 世纪蒸汽机的发明，导致了第一次工业革命；19 世纪电能的使用，再一次极大地改变了人们的生活。进入 20 世纪以后，全世界对能源的需求急剧上升，能源问题日趋严峻，煤、石油、天然气等化石燃料逐渐枯竭，因此，寻找可持续的替代能源显得尤为急迫。目前，核能已成为新能源家族中重要的一员。

神秘的核能从何而来？

怎样获取核能？

利用核能的途径有哪些？

核能的应用及研究的进展如何？

核能是否安全？

本章首先介绍核力，阐述核能的由来；然后讨论获取核能的两种具体途径——裂变与聚变，并概述核能在应用领域的研究进展；最后简要回顾核能的应用史，对其所发挥的作用进行反思。

5.1 核能来自何方

20世纪初，爱因斯坦质能方程的发现，使一些科学家敏锐地认识到，核反应伴随着巨大的能量。一个小小的原子核，居然是一个能量宝库，这是什么原因呢？

强大的核力

我们知道，原子核很小，结构却十分复杂，除氢核外，其他各种元素的原子核中既有带正电的质子，又有不带电的中子。如铀-235的核内有92个质子，143个中子。因此，人们不禁要问：

质子间的静电斥力为什么没有把它们驱散开来？

中子不带电，为什么同样能聚集在一起？

这么多的核子（质子和中子）挤在半径小于10^{-14} m的核内，为什么能形成稳定的结构呢？

在前面学习原子核的组成时，你是否想过这些问题？你曾有过什么猜想？

科学研究发现，组成原子核的每个核子之间存在着一种特殊的力，这种力叫做**核力**（nuclear force）。实验表明，核力有着完全不同于万有引力和静电力的一些性质。

核力是一种强相互作用力（简称强力）。如果把核力的作用强度规定为1，则核内电磁力的强度在10^{-2}的数量级，万有引力的强度仅在10^{-38}的数量级。核力是目前已知的各种力中最强的力，它存在于质子与质子间、质子与中子间、中子与中子间。因此，在研究核子之间相互作用及核的稳定性等问题时，核力起着决定性的作用。

核力是一种短程力，它的作用距离只有10^{-15} m的数量级。因此，每个核子只能对跟它邻近的少数核子（一般不超过3个）发生显著的相互作用。超过了作用距离，核力会迅速减小到零。万有引力和静电力都是长程力，当物体（带电体）间相距甚远时，仍有这些力的作用，而且，一个物体可以同时对众多的其他物体产生万有引力或静电力的作用。

科学家告诉我们，正是核子间存在着这么强大的核力，才使小小的原子核蕴藏着巨大的能量。

什么叫结合能

研究氢原子的能级时已经知道，由于原子核跟核外电子间存在着静电力的作用，把一个氢原子的核外电子从基态移送到无穷远处（也就是使一个处于基态的氢原子电离），必须克服库仑力做功，这需要吸收 13.6 eV 的能量。从对称性的角度思考，使相距无穷远的一个电子和一个质子结合成一个处于基态的氢原子时，由于静电力做功，会放出 13.6 eV 的能量。

同样道理，由于核子间强大的核力，把原子核拆散成核子，必须克服核力做巨大的功，即需要提供巨大的能量。反过来，核子结合成原子核时，由于核力做功，会放出同样多的能量。

在物理学上，把核子结合成原子核时放出的能量，或原子核分解成核子时吸收的能量，都叫做原子核的结合能。

研究表明，用光子照射氘核（${}_1^2\mathrm{H}$），只有当光子的能量等于或大于 2.2MeV 时，才能使它分解为质子和中子。核反应方程为

$$\gamma + {}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_1^1\mathrm{H} + {}_0^1\mathrm{n}$$

反过来，使一个质子和一个中子结合成氘核，会放出 2.2MeV 的能量。因此，氘核的结合能为 2.2MeV。

如何计算结合能

爱因斯坦的质能方程指出，物体的质量跟它的能量有一定的联系。如果物体质量增加（或减少）了 Δm，物体的能量相应会增加（或减少）ΔE，它们的关系是

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

实验发现，核子组成原子核时，仿佛会变“轻”一些，原子核的质量总是小于其全部核子的质量之和。我们把组成原子核的核子的总质量与原子核的质量之差，叫做核的**质量亏损**（mass defect）。核子组成原子核时所亏损的这部分质量，实际上体现为辐射能量的形式。

所以，只要知道了核反应中的质量变化，利用质能方程很容易算出所释放或吸收的能量。

讨论与思考

1. 有人说，质量亏损就是核子变少了；也有人说，质量亏损，意味着质量消失了。这两种说法对不对？为什么？

2. 有人认为，公式 $\Delta E = \Delta mc^2$ 中的 Δm，既是原子核的质量亏损，也是原子的质量亏损，两者是一回事。对不对？

案例分析

案例 1 已知中子质量 $m_n = 1.6749 \times 10^{-27}$ kg，质子质量 $m_p = 1.6726 \times 10^{-27}$ kg，氘核质量 $m_D = 3.3436 \times 10^{-27}$ kg，试计算一个中子和一个质子结合成氘核时释放的能量。

解答 中子和质子结合成氘核的核反应方程为

$$_0^1\mathrm{n} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_1^2\mathrm{H}$$

核反应中的质量亏损

$$\Delta m = (m_n + m_p) - m_D$$
$$= (1.6749 + 1.6726) \times 10^{-27}\ \mathrm{kg} - 3.3436 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$
$$= 0.0039 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

所以，释放的核能

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.0039 \times 10^{-27} \times (2.9979 \times 10^8)^2\ \mathrm{J}$$
$$= 3.5051 \times 10^{-13}\ \mathrm{J}$$
$$= 2.2\ \mathrm{MeV}$$

案例 2 “原子质量单位”是原子物理中常用的一个特殊质量单位，符号为 u。已知碳-12 原子的质量是 12.000000 u，一个碳-12 原子可以看作是由 6 个氢原子（每个氢原子的质量是 1.007825 u）和 6 个中子组成（每个中子的质量是 1.008665 u），求碳-12 原子核的结合能。

1u = 1.6606×10^{-27} kg

直接用 u 作为质量单位时，根据 $\Delta E = \Delta mc^2$ 可得出一个常用的换算关系：

1u 相当于 931.5MeV

分析 在计算碳核的质量亏损时，因为与电子的能量有关的部分在相减过程中几乎能消去，所以可以用碳原子的质量代替碳原子核的质量，用氢原子的质量代替质子的质量。

解答 中子的总质量 $6\,m_n = 6 \times 1.008665\ \mathrm{u} = 6.051990\ \mathrm{u}$

氢原子的总质量 $6\,m_H = 6 \times 1.007825\ \mathrm{u} = 6.046950\ \mathrm{u}$

中子和氢原子的质量和 $6\,m_n + 6\,m_H = 12.098940\ \mathrm{u}$

碳-12 原子的质量 $m_C = 12.000000\ \mathrm{u}$

质量亏损 $\Delta m = 0.098940\ \mathrm{u} = 1.643 \times 10^{-28}\ \mathrm{kg}$

碳-12 核的结合能

$$\Delta E = \Delta mc^2 = \frac{1.643 \times 10^{-28} \times (2.9979 \times 10^8)^2}{1.6022 \times 10^{-19}} \text{eV} = 92.2\text{MeV}$$

通过这两个案例，请你归纳一下，如何利用公式 $\Delta E = \Delta mc^2$ 计算结合能？在计算中，如何合理地选用单位？

多学一点　平均结合能与核的稳定性

核子结合成原子核时每个核子平均放出的能量，叫做平均结合能，它等于核的结合能跟核子数的比值。例如，氘核的平均结合能为 $\frac{2.2\text{MeV}}{2} = 1.1\ \text{MeV}$；碳-12 核的平均结合能为 $\frac{92.2\text{MeV}}{12} \approx 7.7\ \text{MeV}$。用同样的方法，可以求出其他原子核中每个核子的平均结合能。平均结合能的大小能够反映核的稳定程度。平均结合能越大，原子核就越难拆开，表示该核越稳定。

图 5-2 表示核子的平均结合能随原子核的核子数变化的规律。由图像可以看出，核子数较小的轻核与核子数较大的重核，平均结合能都比较小。中等核子数的原子核，平均结合能较大，表示这些原子核较稳定。

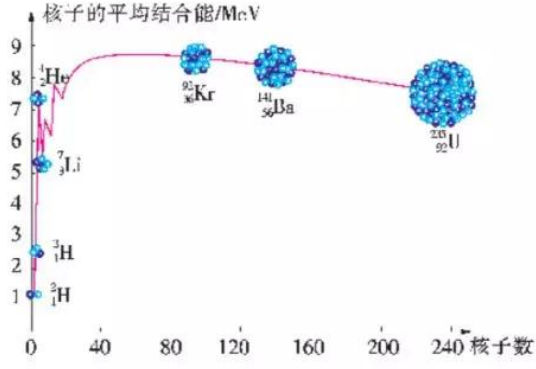


图 5-2　核子的平均结合能曲线

当平均结合能较小的原子核转化成平均结合能较大的原子核时，就可释放核能。例如，一个核子数较大的重核分裂成两个核子数小一些的核，或者两个核子数很小的轻核结合成一个核子数大一些的核，都能释放出巨大的核能。

平均结合能启示人们，利用核能有两种可能的方式：一种是利用重核分裂，另一种是利用轻核聚合。

课后作业与活动

1. 兆电子伏(MeV)和原子质量单位(u)是核物理领域常用的两个单位，请根据质能方程证明，1 u 相当于 931.5 MeV 的能量。
2. 氦核由 2 个质子和 2 个中子组成。每个质子的质量是 1.007277 u，每个中子的质量是 1.008665 u，氦核的质量是 4.001509 u，试求氦核的结合能。
*3. 下表列出了一些原子核的结合能。思考一下，当铀核或钚核裂变为中等核子数的核时，每个核子平均大约可放出多少能量？当氘、氚聚合成氦-4 时，每个核子平均又约可放出多少能量？

原子核	结合能(MeV)	核子的平均结合能(MeV)
$^{2}_{1}$H	2.224	1.112
$^{3}_{1}$H	8.485	2.828
$^{3}_{2}$He	7.720	2.573
$^{4}_{2}$He	28.30	7.075
$^{6}_{3}$Li	31.99	5.332
$^{7}_{3}$Li	39.25	5.603
中等核子数的核(如 Fe)		约为 8.5
重核(如 U 或 Pu)		约为 7.6

5.2

裂变及其应用



费米（E. Fermi，1901—1954），美籍意大利物理学家。因利用中子轰射发现新的放射性元素，及慢中子所引起的有关核反应，获1938年诺贝尔物理学奖。元素周期表中的第100号元素命名为镄，就是为了纪念他。

1942年，在意大利物理学家费米的主持下，在美国芝加哥大学建成了世界上第一座原子反应堆（图5-3）。人类从此开始了利用核能的新纪元。

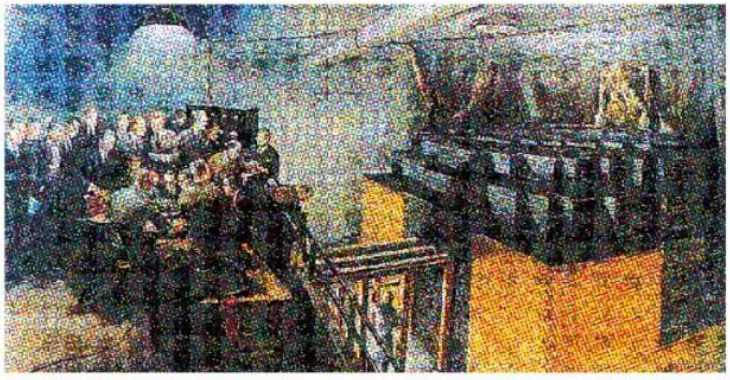


图5-3　世界上第一座核反应堆

铀核的裂变

重核裂变是在20世纪30年代末期用中子轰击铀核时发现的。如图5-4，中子打进铀-235核，使该核变成处于高能量状态的复核；由于复核中核子的激烈运动，复核变成不规则形状，核子间的距离增大，核力迅速减小，因而不能克服质子间的静电斥力而使核恢复原状；于是复核就分裂成质量差不多的两部分，同时放出几个中子。

1946年至1948年间，我国物理学家钱三强与何泽慧夫妇及其合作者，在研究铀核裂变时，经过上万次的观测，首先发现三分裂和四分裂现象。钱三强从实验与理论两方面对三分裂现象作出了全面的论述。

三分裂现象比较罕见，约为二分裂的千分之三；四分裂现象就更少了。

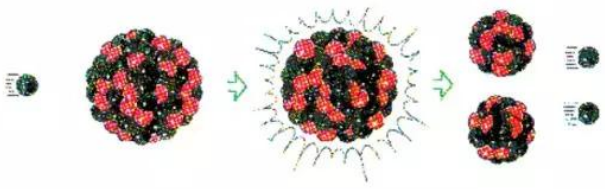


图5-4　铀核裂变过程示意图

铀核裂变的产物是多种多样的，有时裂变为氙（Xe）和锶（Sr），有时裂变为钡（Ba）和氪（Kr），有时裂变为锑（Sb）和铌（Nb）。产物不同，释放的能量和中子数也不尽相同。

信息检索

裂变的发现

20世纪30年代，研究原子的科学家热衷于创造更重些的新元素。中子的发现为这一领域的研究提供了一种强有力的新型“炮弹”。1938年，德国放射化学家哈恩（O. Hahn）和他的助手斯特拉斯曼（F. Strassmann）发现，铀核在受到慢中子轰击后，分裂成中等核子数的两部分。

哈恩虽从化学上确定了铀核反应的产物是位于周期表中间的元素，但对这一反应的物理机理还不理解。奥地利女物理学家迈特纳（L. Meitner）及其外甥弗里施（O. R. Frisch）经反复计算，终于对铀核经中子轰击后的变化做出解释。他们用细菌的“裂殖”fission称呼这个过程，中文译作“裂变”。

核裂变的发现无疑是预设原子能时代即将到来的第一声春雷。迈特纳对裂变的发现曾这样写道：“哈恩和斯特拉斯曼对铀核裂变的证明，揭开了人类历史的新纪元。”



图 5-5 迈特纳与哈恩在实验室工作

链式反应及其条件

如图5-6，铀核裂变时，通常会放出2到3个中子，这些中子可以作为新的“炮弹”轰击其他的铀核，使裂变反应不断地进行下

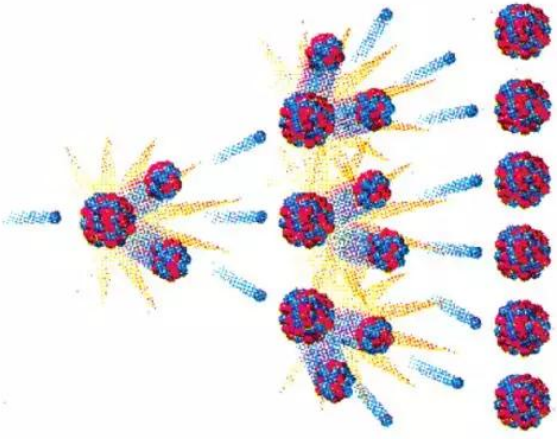


图 5-6 链式反应示意图

天然铀中主要有两种同位素：铀-235与铀-238。其中99.3%以上是铀-238，0.7%是铀-235。铀-235俘获各种能量的中子都会发生裂变，铀-238只有俘获能量大于1MeV的中子才可能发生裂变，并且概率很小。因此，为了容易发生链式反应，需要选用纯铀-235。

去，这种反应叫做**链式反应**(chain reaction)。

研究发现，核裂变所释放的中子，并不是每个都能引起新的裂变。要想引起链式反应，必须使每一次核裂变所释放的中子中至少有一个能引起新的核裂变，也就是说，中子的“再生率”要大于1。因此，发生链式反应的条件除了选用纯铀-235外，还必须保证铀块有足够大的体积。如铀块太小，铀核裂变放出的中子会逸出铀块，从而中断反应。能够使铀块发生链式反应的最小体积(或对应的最小质量)称为**临界体积**(或**临界质量**)。

当铀-235的体积超过其临界体积时，中子进入铀块，立即会引起链式反应，在短时间内释放出大量的核能，原子弹就是根据这个原理制成的。

裂变反应堆

裂变反应堆是核电站的心脏。它是一种用人工控制链式反应的装置，可以使核能较平缓地释放出来。

裂变反应堆的基本结构

裂变材料(核燃料) 一般用浓缩铀(铀-235占3%—4%)，通常做成棒状，置于反应堆的中心部分。

慢化剂(减速剂) 通常用石墨、重水或普通水，其作用是使裂变产生的快中子通过慢化剂而减速，使它容易被铀-235吸收。

控制棒 用镉或硼钢制成，用来吸收减速后的中子，控制反

信息链接

用双手掰开原子弹的人

制造原子弹时，需要设计一种装置，使两块小于临界体积的铀块在投掷时自动合成一块大于临界体积的铀块，以保证发生链式反应。在这方面，历史上还曾发生过一件惊心动魄的事。

1945年，在美国研制原子弹工作的最后阶段，由一名年轻的加拿大物理学家斯洛廷(L. P. Slotin)承担安装装置和引爆机构的试验。那时，没有机械手，没有代替人作业的机器人，一切都靠物理学家双手操作。斯洛廷需用两把螺丝刀在导轨上拨弄两块半球形铀块，这工作十分危险，无异于“虎口拔牙”。1946年5月，斯洛廷到比基尼岛参加第二次水下原子弹爆炸试验。他再次拿螺丝刀调整爆炸装置时，不料失手，螺丝刀滑掉了，两个半球形铀块很快就要滑到一起，眼看着一场灾难性的核爆炸事故马上就要发生。在这千钧一发之际，斯洛廷以惊人的镇定和大无畏的勇气，用双手掰开即将达到临界状态的铀块。一场核灾难避免了，可是斯洛廷已受到致命的核辐射，9天后献出了他年轻的生命。

加拿大政府和人民为了表彰斯洛廷，把他誉为“用双手掰开原子弹的人”。

应强度。当反应太强时，控制棒能自动插入，多吸收些中子；当反应强度不够时，控制棒能自动抽出一些，少吸收一些中子。

反射层 一般用石墨做材料，安放在反应堆中心区周围，阻止中子逃逸。

热交换器 核反应堆中释放的能量大部分转化为热能，利用水循环，产生高温高压的蒸汽，从而推动蒸汽轮机，带动发电机发电。

防护层 由金属套、防止中子外逸的水层以及 1—2 m 厚的钢筋混凝土构成，可有效地防止射线对人体及其他生物体的侵害。

裂变反应堆的常见类型

重水堆 采用重水做慢化剂的反应堆。它的优点是中子利用率高，可以采用天然铀做反应堆燃料。但由于重水昂贵，为了减少重水泄漏，反应堆及重水回路设备制造复杂，要求高，使核电站投资增加。

高温气冷堆 采用石墨为慢化剂、氦为冷却剂的反应堆。目前在技术上还不成熟。它具有高效率、高安全性、对环境污染小等优点，有着综合利用的广阔前景。我国已把它列入重要的开发项目。

快中子增殖反应堆 又叫快堆，它是以铀-235 作为主要裂变材料的反应堆。快中子增殖反应堆最大的特点是可以合理利用有限的铀资源，使核燃料增殖。在这种反应堆中，裂变产生的中子，除了维持链式反应外，其余部分被铀-238 吸收变成铀-239，铀-239 是不稳定的，经过两次 β 衰变，转化成容易裂变的钚-239。钚-239 的产生速度远远大于铀-235 的消耗速度，结果是使核燃料越“烧”越多。快中子增殖反应堆能够将天然铀资源的利用率由慢中子堆的 1%—2%提高到 60%—70%。我国是一个贫铀国家，加快对这种反应堆的研究，充分利用核资源，显得尤为重要。

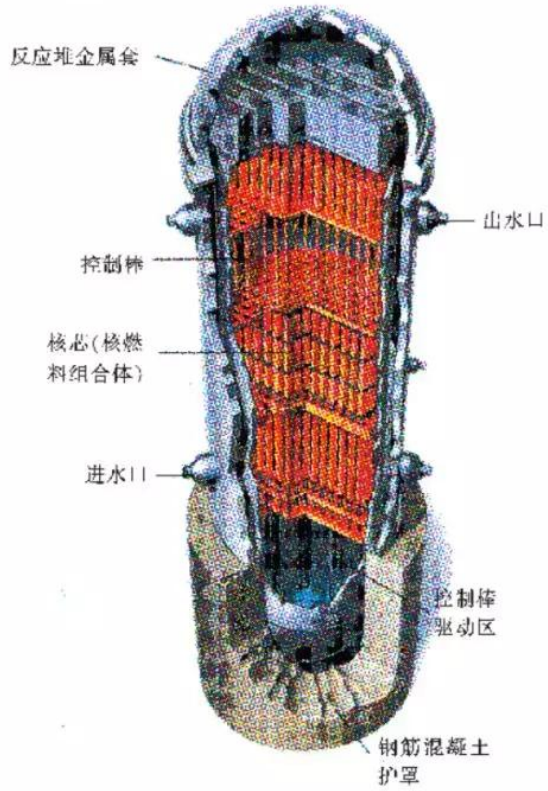


图 5-7 裂变反应堆结构示意图

核电站的工作模式

核电站是以核反应堆为能源，用它产生高压蒸汽，取代发电厂的锅炉，其余部分与火力发电厂基本相同。图 5-8 是秦山核电站的基本结构示意图。它主要由裂变反应堆、第一回路系统、第二回路系统及其他辅助系统组成。

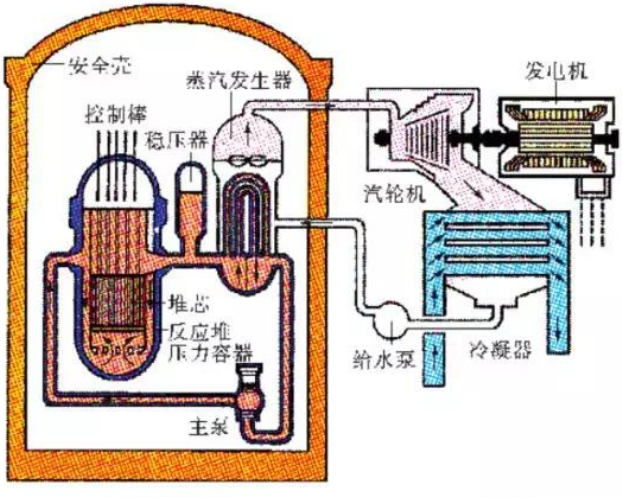


图 5-8　秦山核电站的基本结构示意图

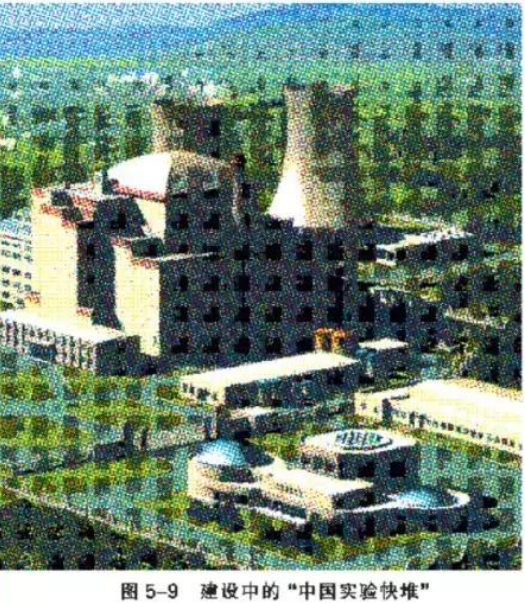


图 5-9　建设中的“中国实验快堆”

讨论与思考

观察图 5-8，分析并讨论一下，其中两个回路系统是怎样工作的？并请画出核电站中的能流图。

案例分析

案例　用中子轰击铀核（$^{235}_{92}U$），其中的一个可能反应是分裂成钡（$^{141}_{56}Ba$）和氪（$^{92}_{36}Kr$）两部分，放出 3 个中子，试写出核反应方程，算出反应中释放的核能。

分析　根据反应前后核的核子数守恒、核电荷数守恒和反应中的能量守恒，就可以写出核反应方程。

为了算出核能，查出各个核和中子的质量如下：

$m_U = 390.3139 \times 10^{-27}$ kg　　$m_n = 1.6749 \times 10^{-27}$ kg

$m_{Ba} = 234.0016 \times 10^{-27}$ kg　　$m_{Kr} = 152.6047 \times 10^{-27}$ kg

根据核反应前后的质量亏损，用爱因斯坦的质能方程就可算出释放的核能。

请根据上述分析，完成本题的解答。

家庭作业与活动

1. 裂变反应堆是怎样组成的？裂变反应堆为什么不会像原子弹那样爆炸？
2. 目前已建成并运转的核电站，都是利用什么反应产生的能量来发电的？
3. 核潜艇可以在大洋中长期潜行而不需要补充燃料。想一想核潜艇是利用什么做燃料的。参照教科书中关于核电站的介绍，设想一下核潜艇中的工作情况大致应该是怎样的。
4. 我国目前已建成的秦山核电站和大亚湾核电站，都是利用核燃料$^{235}_{92}$U在裂变反应堆中“燃烧”产生的热能使水汽化以推动汽轮机发电的。已知一个$^{235}_{92}$U在反应堆中完全“燃烧”放出的能量约为200 MeV。

(1) 1 g $^{235}_{92}$U完全“燃烧”释放出的能量约为多少焦？

(2) 秦山核电站的发电功率为3.0×10^5 kW。假定核燃料$^{235}_{92}$U完全“燃烧”释放的能量有90%转变成电能，则该电站每年需消耗纯$^{235}_{92}$U约多少千克？

课题研究

原子弹的威力及其防护

通过查阅资料，了解原子弹的杀伤作用主要表现在哪些方面，以及如何进行有效的防护。

5.3 聚变与受控热核反应

更大的能源宝库

在对结合能的研究中，我们已经知道，使结合能小的轻核聚合成一个较重的原子核，即发生聚变时，同样会释放核能。而且，在核燃料消耗量相同的条件下，聚变比裂变释放的能量更多。

例如，一个氘核（${}_1^2\mathrm{H}$）和一个氚核（${}_1^3\mathrm{H}$）发生聚变时，产生一个氦核（${}_2^4\mathrm{He}$），同时放出一个中子和 17.6 MeV 的能量，平均每个核子释放的能量在 3MeV 以上，比裂变反应中平均每个核子释放的能量大 3 到 4 倍。这个核反应方程为

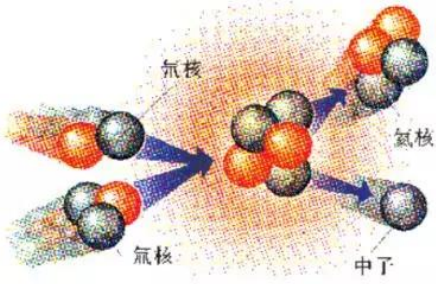


图 5-10　氘核与氚核聚变成氦核

$$ {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^3\mathrm{H} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1\mathrm{n} + 17.6\ \mathrm{MeV} $$

据推算，1g 氘发生聚变放出的能量为 $1 \times 10^5\ \mathrm{kW \cdot h}$。地球上共有约 $1 \times 10^{18}\ \mathrm{t}$ 海水，其中含氘约 $3 \times 10^{13}\ \mathrm{t}$，如果用来发电，足够人类使用上亿年。可见，聚变核能是一个更大的能源宝库。

聚变的条件

我们知道，原子核只占整个原子体积极小的一部分，电子在原子核外绕核运动。要使两个原子的核靠近并聚合在一起，必须剥离原子核外的电子，使两个核接近到 $10^{-15}\ \mathrm{m}$ 以内，这时核力才能发生作用。

原子核带正电，它紧紧地吸引着核外电子。要让核外电子逃逸，并使原子核克服相互靠近时产生的巨大的静电斥力，必须有几千万摄氏度以上的高温。在这么高的温度下，剧烈的热运动使原子完全电离，形成物质的第四态——等离子态，原子核可获得足够大的动能，进行剧烈的运动和相互碰撞，这时总有一部分核可以接近到足以发生聚变的距离。所以，聚变又叫热核反应。

热核反应在宇宙中很普遍。目前的理论认为，太阳以及许多

恒星内部，都在不断地进行着聚变反应，因此它们不断地辐射出光和热。

那么，怎样才能获得这么高的温度以实现热核反应呢？目前较成熟的技术是利用原子弹的爆炸使氘和氚发生热核反应。氢弹就是这样制造出来的，它能产生比原子弹大得多的威力。

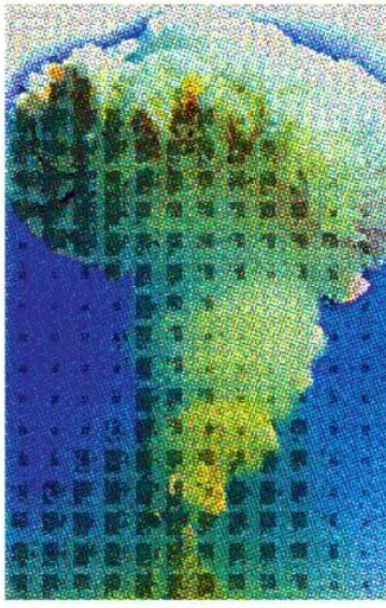


图 5-11 1967 年我国成功试爆第一颗氢弹

受控热核反应

为了使热核反应的能量缓慢地释放出来，世界上许多国家都在研究受控热核反应的理论和技术。

当前，受人青睐的受控热核反应实验装置称为“托卡马克”(Tokamak)，它是一种利用强磁场约束等离子体的环流器，其结构示意图如图 5-12 所示。它的主体是一个环状真空室，其中充以氘气或氘、氚混合气体，这是托卡马克的核燃料。真空室外是磁场装置，它的作用是约束等离子体。当中央螺线管通电后，在环状真空室内感应出强电流，加热核燃料，使其成为等离子体，同时中央螺线管和同轴环形线圈一起形成一个螺旋状磁场，将等离子体约束在环状真空室内，使之不与室壁接触，也不会从端面流失。等离子体在真空室内互相碰撞就可发生热核反应。

托卡马克装置是前苏联科学家于 20 世纪 50 年代首先提出来的。1991 年 11 月 9 日，来自欧洲 14 个国家的科学家在英国牛津郡卡勒姆的欧洲联合环形聚变装置上，首次成功进行了氘氚反应实验，产生了 1.7MW 的电，持续时间为 2s。这是人类向获得安全、清洁和取之不尽的核能迈出的具有里程碑意义的一步，标志着人类对核聚变的探索已由科学可行性阶段进入工程技术可行性阶段。

1964 年，我国著名物理学家王淦昌与苏联科学家各自独立地提出了激光聚变的构想，即用高功率的激光束打在氘、氚组成的靶丸上，产生高温使核燃料发生核聚变。

如今世界上已经启动了一个包括欧盟 15 个成员国和中国、美国、俄罗斯、日本、韩国、加拿大在内的，旨在实现第一个实用聚变反应堆的“国际热核实验反应堆计划”。根据目前的实验研究，估计在 21 世纪中叶，核聚变发电站有投入使用的可能。

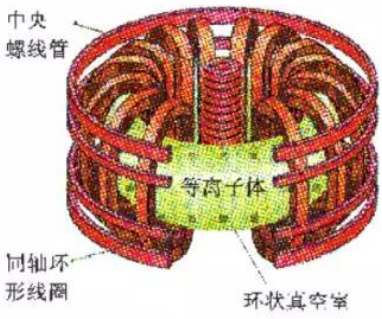


图 5-12 托卡马克装置结构示意图

案例分析

案例 使两个氘核发生聚变生成一个氦核，放出多少核能？

分析 聚变的核反应式为

$$2{}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He}$$

根据不同的已知条件，通常可以有两种计算方法。

方法 1 先查出氘核和氦核的质量

$$m_{\mathrm{D}} = 2.014102\ \mathrm{u},\ m_{\mathrm{He}} = 4.002603\ \mathrm{u}$$

然后根据核反应前后的质量亏损，用质能方程算出释放的核能。

方法 2 先查出氘核和氦核的平均结合能

信息浏览

我国对受控热核反应的研究

我国已在积极研究受控热核反应技术。“中国环流器 1 号”(HL-1)于 1984 年 9 月顺利启动。接着，在 1994 年又建成了“中国环流器新 1 号”(HL-1M)。这两个中型托卡马克装置及其实验研究成果，代表了当时我国磁约束聚变实验研究的水平，已进入国际上同类型、同规模装置的先进行列。

1994 年我国又成功地建成第一个超导托卡马克 HT-7 实验装置，使我国成为继俄、法、日之后第四个拥有超导托卡马克装置的国家。

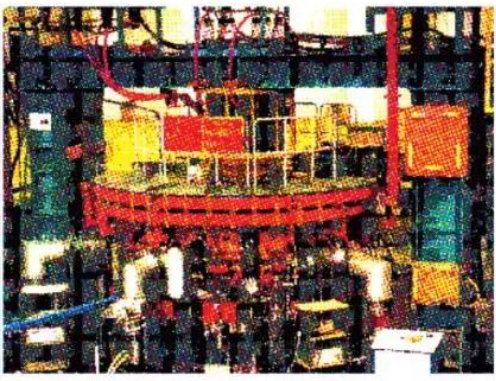
为了追踪世界一流水平，1999 年 4 月，我国开始着手中国环流器 2 号 A(HL-2A)的建设，该装置于 2002 年 12 月 2 日建成并投入运行。HL-2A 是更为先进的托卡马克核聚变实验研究装置，其主要目标是改善约束实验条件，开展核聚变领域许多前沿物理学课题以及相关工程技术的研究。HL-2A 的建成对提高我国核聚变研究的整体水平具有十分重大的意义。

现在，作为 HT-7 的升级设备而建造的大型非圆截面超导托卡马克 HT-7U 实验装置，其规模和性能都远远超过 HT-7，是世界上第一个全超导托卡马克，可开展聚变反应的前沿性研究，为未来稳态、先进的聚变反应堆奠定工程技术基础，必将使我国核聚变研究进入世界前列。

图 5-13 HT-7 是一个庞大的实验系统



图 5-14 中国环流器 1 号



$E_D = 1.11\ \text{MeV}$，$E_{He} = 7.07\ \text{MeV}$

然后采用“先拆散、后结合”的方法，即先把2个氘核分解成4个自由核子（2个中子和2个质子），再使这4个自由核子结合成氦核，比较前后两个过程中释放的结合能，同样可得出结果。

请同学们根据上述分析，用两种方法完成计算。

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，靠燃烧燃料放出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。

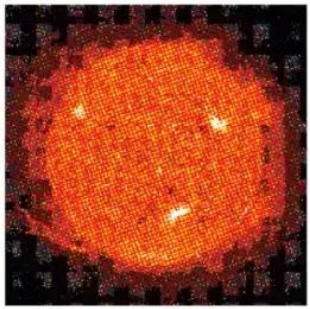


图5-15 太阳释放的能量是通过热核反应产生的

课后作业与活动

1. 一个氘核和一个氚核聚变成氦核，放出一个中子，这个反应中放出了多少结合能？已知 $m_D = 2.014102$ u，$m_T = 3.016050$ u，$m_{He} = 4.002603$ u，$m_n = 1.008665$ u。
2. 已知4个氢核聚变成1个氦核，放出2个正电子。
   (1) 写出这个核反应方程；
   (2) 这一核反应释放出的能量有多少焦？
   (3) 若1 g氢完全聚变，它放出的核能相当于多少优质煤完全燃烧放出的化学能？已知优质煤的燃烧值为 3.34×10^7 J / kg。
3. 假设太阳内部持续不断地发生着4个质子聚变为1个氦核的热核反应，这个核反应释放出的大量能量就是太阳的能源。
   (1) 太阳的质量每秒减少多少千克？
   (2) 若太阳质量减少3/10 000，热核反应就不能继续发生。据此估算太阳还能存在多少年。（已知太阳向空间辐射的总功率为 3.8×10^{26} W，太阳的质量为 2×10^{30} kg，$m_p = 1.007276$ u，$m_{He} = 4.002603$ u，$m_e = 0.000548$ u）



图 5-16　泰山核电站控制室

5.4

核能利用与社会发展

核能登上历史舞台，虽然只有短短的 60 多年，却已有了长足的发展。目前世界上已有 40 多个国家和地区建有 400 多座核电站，发电量已占世界发电总量的 17%以上。

核能的发展迅猛，核能的利用对人类社会产生了哪些影响？

核能的优越性

核能跟常规能源相比，具有明显的优势。

核原料提供的能量巨大

计算表明，如果按照 1 个铀核裂变放出 200 MeV 的能量估算，1 kg 铀全部裂变释放的能量相当于 2700 t 标准煤完全燃烧放出的能量。地球上的一般常规能源都无法跟核能相比。

核原料的储量丰富

目前核电站使用的裂变材料是铀，铀在地壳中的平均含量比金、银更为丰富，不仅分布在岩石中，也蕴藏在海水、河水、湖水中。除铀以外，钍也是一种裂变材料，它比铀更为丰富，如果能把钍利用起来，核电的发展前景将更为广阔。

热核反应需要的原料——氘，在海水中有着丰富的储量。1L 海水中大约有 0.03 g 的氘，它发生热核反应放出的能量跟燃烧 300 L 汽油相当。因此，一旦受控热核反应在商业上获得成功，将从根本上解决困扰人类社会的能源问题。

核原料的运输和储存方便

一座 1×10^6 kW 的火力发电厂，一年要烧煤 3.5×10^6 t，这些煤每天要用 200 节火车车厢或一艘万吨巨轮运输。而同等规模的压水堆核电站，一年只需 30—40 t 低浓铀，只需 6 辆卡车就可全部运到现场，储存也很方便。

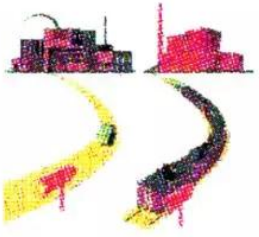


图 5-17 核原料只需用卡车运输

清洁卫生，对环境的污染小

火力发电厂运行时会排出大量的废气以及其他对环境和人体有害的物质。一座 1×10^6 kW 的火力发电厂，每天要烧掉约 1×10^4 t 标准煤，同时排出几十吨的二氧化硫、氮氧化物，1×10^3 t 左右的煤渣及烟灰，2×10^4 t 二氧化碳废物，它们都是造成温室效应和酸雨的“罪魁祸首”。同时，煤中还会含有放射性物质，如铀、钍、镭等，也会对生物体造成一定的危害。

核电站不排放二氧化碳、氮氧化物等造成温室效应或酸雨的气体及烟尘。设计良好、管理完善的核电站，不会发生放射性污染事故。因此采用核能有利于环境的保护和可持续发展。

在学习本章内容之前，你对核能的优越性有什么认识？通过学习，你觉得核能还有什么特点？请相互交流。

核安全性与核废料处理

1980 年发生在苏联切尔诺贝利核电站的核泄漏事故，曾给核电站的应用前景投下了一片阴影。人们感到核电站很不安全，对核废料也有些谈虎色变。其实，核电站有着可靠的安全措施，对核废料也有着严格的处理方法。

核电站的安全性能

核电站往往以可能性极小的、假想的最严重事故作为安全设计的依据，加以层层设防。

为了防止放射性物质的泄漏，核电站设置了 4 道安全屏障（图 5-18）。

第一道屏障 二氧化铀陶瓷体燃料芯块，可以把 98%以上的裂变产物滞留在芯块内，不向外释放。

第二道屏障 性能良好的锆合金包壳把燃料芯块密封其内，能够经受各种运行工作情况的考验，保证密封性良好。

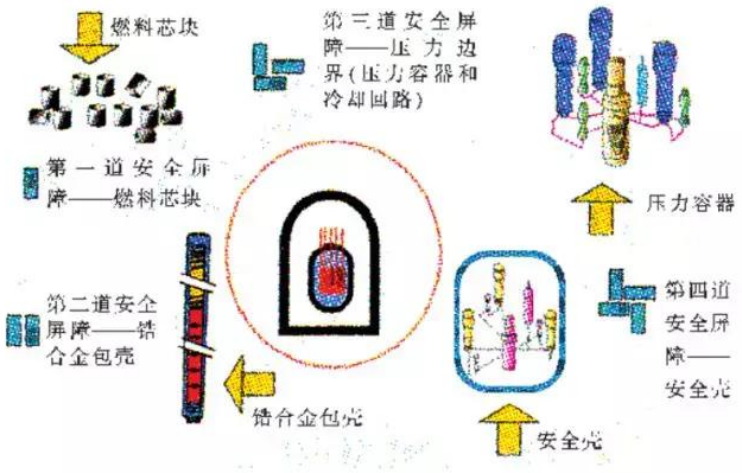


图 5-18　核电站的四道安全屏障

第三道屏障　由反应堆压力容器和冷却回路构成的压力边界，保证结构的完整性。

第四道屏障　山安全壳把整个反应堆压力边界内的设备包容在内，能承受事故发生的压力并保持良好的密封性，防止放射性物质向外泄漏。

核电站是现代科学技术综合发展的产物，它的科学设计、精心制造、可靠运行和多重安全措施，使得发生重大事故的可能性远比其他自然或人为灾害的要小，核电站是安全可靠的。

核废料的处理

对核废料的处理有多种方法。目前我国对核废料采用后处理技术，即从用过的核燃料中回收铀、钚等。这样，96%的铀和 1%的钚可回收再利用，只需处理剩下的 3%放射性废料和其他途径产生的核废料。对其中的低、中放射性废物进行沥青固化或水泥固化后，贮存在地下浅层废料库；对高放射性废料采用玻璃固化后，埋藏在深层废料库。在核电站周围还设置许多监测点，定期采集空气、水样、土样和动植物样品进行分析，监测放射性对环境的污染。

如果国家需要在你的家乡选址建设核电站，你对此持何态度？为什么？就这一问题与你的同学、朋友进行讨论和交流。

信息对流

我国及国外核电站概况

我国核电建设从 20 世纪 80 年代起步。1991 年 12 月 15 日 3.0×10^5 kW 的秦山核电站首次并网发电，结束了我国大陆无核电的历史，使我国成为世界上第七个具备自主设计、自主建造、自主调试和自主运营管理核电站能力的国家。随后，引进法国和英国技术又建成了 1.8×10^6 kW 的广东大亚湾核电站。

目前，中国核电总装机容量达到 8.7×10^6 kW，共有 6 座核电站，11 台核电机组。现已建成投入运行的有秦山一期，二期 1、2 号，三期 1、2 号，大亚湾 1、2 号，岭奥 1、2 号，田湾 1、2 号。2003 年，我国核电发电量达到 4.37×10^{10} kW·h，占全国总发电量的 2.3%。我国在 2003 年底提出了一个宏大的核电发展规划，在未来的 16 年左右的时间里，将建约 30 座核电站。预计到 2020 年我国核电装机容量将达到 3×10^7 kW 左右。

截至 2000 年，国外核电站概况如下页表(仅列出前 10 名)。

序号	国家	运行中的机组		在建机组		2000年发电情况	
		机组数	装机容量（MW）	机组数	装机容量（MW）	发电量（TW·h）	核电比例（%）
1	美国	104	97 411			753.90	19.83
2	法国	59	53 073			395.00	76.40
3	日本	53	43 491	3	3190	304.87	33.82
4	德国	19	21 122			159.60	30.57
5	俄罗斯	29	19 843	3	2825	119.65	14.95
6	韩国	16	12 990	4	3820	103.50	40.74
7	英国	35	12 968			78.30	21.94
8	乌克兰	13	11 207	4	3800	72.40	47.28
9	加拿大	14	9 998			68.68	11.80
10	瑞典	11	9 432			54.80	39.00

科学家的使命

巨大的核能既能造福于人类，也有着一定的潜在危险。现代社会比以往任何时候更需要科学家的高度社会责任感和正义感。

科学家的责任感

发现铀核裂变时，正值第二次世界大战期间，科学家认识到核裂变能释放出巨大的能量，并担心这一科学成果被德国纳粹政府用来制造大规模杀伤性武器。于是，两位流亡到美国的匈牙利物理学家西拉德(L. Szilard)和维格纳(E. Wigner)找到爱因斯坦，说服爱因斯坦致信美国总统，从而促成了美国“曼哈顿工程”的上马。

当原子弹快要研制成功时，西拉德、爱因斯坦、玻尔等人纷纷告诫美国政府使用原子弹应采取慎重态度。然而，1945年美国还是在日本的广岛和长崎投掷了两颗原子弹，当时就造成了巨大的伤亡。在广岛事件之后，爱因斯坦在一篇文章中写道：“物理学家们发现他们自己处于与诺贝尔相同的地位。诺贝尔发明了至今仍为最强的炸药，这是一种具有摧毁力的东西。为了纪念这个发明和减轻压在思想上的痛苦，也为了和平的成功，设立了奖金。今天，参加那些令人恐惧和充满危险的武器研制的物理学家们，被



图 5-19 爱因斯坦和西拉德

同样的责任感所烦扰……”

爱因斯坦曾参与建议美国政府制造原子弹，为此他在后半生常常自责不已。美国物理学家奥本海默(J. R. Oppenheimer)曾在“曼哈顿工程”中担任研究所所长，但在美国继续启动威力更大的氢弹研制计划时，他发表声明公开反对……

为和平而努力

为了维护世界的和平与安定，要求全面销毁核武器，特别是反对各种类型的核试验的呼声日益高涨。当前，如何使人类避免一场核灾难的问题已变得越来越严峻。近年来，联合国等国际组织先后通过了一系列条约和协定，限制各国制造和使用核武器。

我国发展核武器是在特定的历史条件下迫不得已作出的决定。我们研制和发展少量核武器，完全是出于防御的需要，是为了抵制核威胁，打破核垄断。中国从拥有核武器的第一天起，就郑重声明，中国在任何时间、任何情况下都不首先使用核武器。中国还无条件地承诺不对无核武器国家和地区使用或威胁使用核武器。中国是世界上唯一作出并恪守这一承诺的有核国家。

课后作业与活动

1. 查阅资料，了解核电站放射性废料处理的常用方法。
2. 皮埃尔·居里在1903年说：“人类从未来的发现所得到的好处将比坏处更多。”卢瑟福在1915年说：“我希望人们在学会和平相处之前，不要释放出内部能量。”两位科学家的意见是互为对照的。结合本节内容，谈谈你的看法。

5.x

第 5 章家庭作业与活动

1. 1956年李政道和杨振宁提出在弱相互作用中宇称不守恒，吴健雄用 $^{60}_{27}\mathrm{Co}$ 对此进行了实验验证。次年，李、杨二人为此获得诺贝尔物理学奖。$^{60}_{27}\mathrm{Co}$ 的衰变方程是：

$$^{60}_{27}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{Ni} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \bar{\nu}_e,$$

其中 $\bar{\nu}_e$ 是反电子中微子，它的电荷为零，静止质量被认为是零。

(1) 在上述衰变方程中，衰变产生的 $^{A}_{Z}\mathrm{Ni}$ 的核子数 A 是 _____，核电荷数 Z 是 _____。

(2) 在衰变前 $^{60}_{27}\mathrm{Co}$ 是静止的，根据云室照片可以看出，衰变产物 $^{A}_{Z}\mathrm{Ni}$ 和 $^{0}_{-1}\mathrm{e}$ 的运动径迹不在同一条直线上，如果认为衰变产物只有 $^{A}_{Z}\mathrm{Ni}$ 和 $^{0}_{-1}\mathrm{e}$，那么衰变过程将违反 _____ 守恒定律。

2. 完成下列核反应方程，并指出核反应的类型：

$^{3}_{2}\mathrm{He} + $ _____ $\rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$，是 _____ 变。

$^{24}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + $ _____，是 _____ 变。

$^{24}_{11}\mathrm{Na} + $ _____ $\rightarrow {}^{22}_{11}\mathrm{Na} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$，是 _____ 变。

$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + $ ____ $+3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$，是 _____ 变。

3. 1998 年 7 月 8 日，全国科学技术名词审定委员公布了 101—109 号元素的中文定名。而早在 1996 年 2 月，德国达姆施特重离子研究所就合成出当时最重的人造元素，它是用 $^{70}_{30}\mathrm{Zn}$ 撞击一个 $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$，并立即释放出一个中子而产生的一种新元素。该元素的原子序数是

A. 111　　B. 112　　C. 113　　D. 114

4. 用 α 粒子轰击铍核，生成一个碳核和一个粒子，则该粒子

A. 带正电，能在磁场中发生偏转

B. 在任何方向的磁场中都不会发生偏转

C. 电离本领特别强，是原子核的组成部分之一

D. 用来轰击铀-235 可引起铀核的裂变

5. 下列说法中正确的是

A. 质子与中子的质量不等，但质量数相等

B. 两个质子之间，不管距离如何，核力总是大于库仑力

C. 同一种元素的原子核有相同的核子数，但中子数可以不同

D. 除万有引力外，两个中子之间不存在其他相互作用力

6. 1 L 海水中含有 0.146 g 的重水，从中可提取 0.03 g 的氘（$^{2}_{1}\mathrm{H}$），假如 1L 海水中的氘全部聚变为氦，则释放多少能量？氘核和氦核的质量分别为 2.0141 u 和 4.0026 u，若 1 L 汽油完全燃烧释放的能量为 3.23×10^{7} J，那么 1 L 海水中的氘全部聚变所放出的能量相当于多少升汽油燃烧时释放的能量？($1\mathrm{u} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg)

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3-5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。在学完本书后，你一定想让同学们分享自己的研究成果。那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以把你平时做过的最满意的课题拿来，再做进一步的研究，取得更有意义的成果，到这个报告会上去展示；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你感兴趣的课题，自己一人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。

在这个报告会上，也许没有宏篇大论，也许没有什么重大发明。但这里展示的成果，铭刻着你们的勤奋，凝聚着你们的心血……这里，最可贵的是真实！

简单就是美丽，巧妙就是智慧！

这个“课题研究成果报告会”，将让你的智慧放出灿烂的火花，让你的才智得到充分的展示！

研究课题示例

应用动量定理和动量守恒定律研究体育运动

你可以从球类、田径、游泳等运动项目中，选择你熟悉和喜爱的一项运动，用动量定理或动量守恒定律进行分析研究，并通过典型案例，说明如何提高运动成绩。这项研究需要在物理老师和体育老师的共同指导下进行。

关于射线的应用

射线的应用很广泛，建议从以下几个方面收集资料，撰写一篇有关的科普文章：(1)射线探伤和测厚；(2)示踪原子；(3)碳-14技术；(4)射线杀菌；(5)射线诱变育种、刺激生物生长和防治害虫；(6)放射性同位素在疾病诊断和治疗上的应用。

关于粒子物理研究的进展

你对微观粒子的发现过程以及它们的性质感兴趣吗？请从互联网上或到图书馆去查阅有关粒子物理研究的最新进展情况，写一篇综合性报告。

物理模型的思想和方法在物理学发展中的意义

以科学家对原子结构的探索为例，研究物理模型的思想和方法在物理学发展中的意义。研究的要点：(1)物理模型要建立在实验和理论的基础上；(2)物理模型必须是科学的假设，不是没有根据的类比和模拟；(3)物理模型应能说明已有的科学现象；(4)物理模型有一个不断发展和完善的过程；(5)检验物理模型正确性的唯一标准是实验。

关于受控热核反应的研究进展

实现了氘-氚的受控热核反应，等于打开了一个“取之不尽，用之不竭”的能源宝库，人类就将从根本上解决能源问题。你若对受控热核反应感兴趣，可从互联网上或到图书馆去查找有关资料，有条件的地方，还可访问有关的科学家，了解国内外在这方面的研究进展情况，写一篇综合性报告。

讨论建立核电站的必要性

假定经有关部门考察，建议在你家乡建立一座核电站。事关重大，政府将这项计划提交地方人民代表大会讨论。如果你是人民代表，你将发表怎样的意见？请你准备一篇发言稿。动笔前，要先进行调查，而且陈述意见要有理有据。

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　仲扣庄　汪延茂

编写人员（按姓氏笔画为序）

王　高　田　宁

朱　琦　仲扣庄

汪延茂　钱嘉伟

戴苾芬

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。沈永昭教授和刘红博士审阅了全书书稿。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