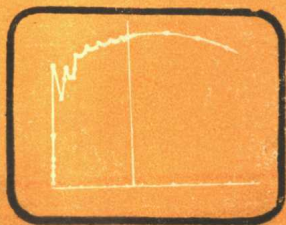


中学物理教学参考丛书



# 放射性和原子能

上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

# 放射性和原子能

张民生 冯承天 符丽天 编

上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

**放射性和原子能**

张民生 冯承天 符丽天 编

上海教育出版社出版

(上海永福路123号)

新华书店上海发行所发行 崇明浜东印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 2.75 字数 56,000

1985年11月第1版 1985年11月第1次印刷

印数1—4,000本

统一书号: 7150.3411 定价: 0.37元

## 编者的话

本书是中学物理教学参考丛书之一，主要供中学物理教师参考。全套丛书共有十七本，将陆续出版。

《放射性和原子能》的主要内容是介绍天然放射性的特性、原子核的结构以及原子能释放现象。全书共分四章：第一章天然放射性，介绍了放射性物质和放射性辐射的一般性质和规律；第二章核反应和原子核结构，回顾了中子和正电子的发现简史，阐述核反应的规律和原子核的结构；第三章原子能，简明地分析了核裂变和聚变的特点；第四章列举了中学常见的典型例题，提出各种解题方法。

限于编者的业务水平，书中难免有错误和不妥的地方，恳请读者批评指正。

# 目 录

<b>第一章 天然放射性</b> .....	1
一、天然放射性现象的发现.....	1
二、放射性辐射的一般性质.....	3
三、放射衰变及其规律.....	7
四、放射衰变中的守恒定律和天然放射系.....	9
五、放射性的探测.....	13
(一) 荧光屏和闪烁计数器 .....	14
(二) 计数器 .....	16
(三) 核乳胶 .....	16
(四) 云室和气泡室 .....	17
<b>第二章 核反应和原子核结构</b> .....	20
一、第一次核反应.....	20
二、中子的发现和原子核的结构.....	22
三、正电子和人为放射性现象的发现.....	26
四、核反应的种类.....	29
五、核反应中的守恒律和能量.....	34
(一) 电荷守恒 .....	34
(二) 质量数守恒 .....	34
(三) 总质量和总能量守恒 .....	34
(四) 动量守恒 .....	34
六、原子核的结构.....	36
(一) 原子核的 $\alpha$ 粒子模型 .....	39
(二) 原子核的液滴模型 .....	40

(三) 原子核的壳层模型 .....	40
七、放射性的应用 .....	41
(一) 在地质学和考古学上的应用 .....	42
(二) 示踪原子的应用 .....	43
(三) 射线的应用 .....	44
(四) 中子活性分析 .....	44
<b>第三章 原子能</b> .....	<b>46</b>
一、质量亏损和结合能 .....	46
二、重核裂变和链式反应 .....	50
三、裂变能的应用 .....	56
四、轻核聚变 .....	61
<b>第四章 解题分析</b> .....	<b>67</b>
<b>习题</b> .....	<b>75</b>
<b>习题答案</b> .....	<b>80</b>

# 第一章 天然放射性

## 一、天然放射性现象的发现

天然放射性现象是十九世纪末叶自然科学的一项划时代的发现，它打开了原子世界的大门，揭示了物质结构的秘密。

十九世纪中叶，人们对气体中的放电现象进行了研究，发现了阴极射线，物理学家设计了各种实验力图弄清它的本质（这最终导致了电子的发现）。1896年，实验却带来了意外的收获：物理学家伦琴发现了以他的名字命名的射线——伦琴射线（又称为X射线）。

伦琴的发现一公布，所有拥有这类实验设备的物理学家都纷纷进行实验。数星期后，法国巴黎又传来了新的消息，这就是放射性的发现。

放射性的发现是研究伦琴射线的直接产物。当时，人们发现，放电管所发出的X射线来自于玻璃管壁上发荧光的部分。因此，很自然地产生了问题：X射线是由荧光产生的吗？能发出荧光的物质都能发出X射线吗？

法国物理学家贝克勒尔开始对这一想法进行考察。贝克勒尔的父亲也是一位物理学家（他最先拍摄了太阳光谱），他对荧光很感兴趣，曾对硫酸双氧铀钾这种荧光物质进行过研究。现在，贝克勒尔就用这种铀盐晶体进行实验，想弄清它的荧光中有没有X射线。为此，他把铀盐放在用黑纸包裹起来的照相底板上，让它们接受太阳光的照射。因为太阳光无法

穿透黑纸，所以它对底板不可能直接发生作用，而太阳光却能激发铀盐发出荧光，如果荧光中有X射线，那么X射线就能穿透黑纸使底板感光。实验结果似乎证实了这一设想：底板冲洗后显示出模糊的黑斑。贝克勒尔继续进行实验，不久出现了完全意想不到的结果。1896年2月底，连续几天阴雨，铀盐未经太阳照射（当然它不可能发射荧光），但冲洗的结果却大大出乎意料：底板居然由于受到强烈的辐射而变得很黑，显然，这跟荧光之间没有任何联系。这个结果说明了原来的想法是不对的，唯一可以作出解释的是，有某种与荧光无关的辐射穿过了黑纸，使底板感光了。随后，贝克勒尔通过一系列的实验确定，凡是含有铀的化合物都能不断地放射出这种辐射，因此可以断定，这是铀在起作用。他发现这种辐射能穿透黑纸使底板感光，而且能使空气电离。后来，贝克勒尔又把这种铀盐晶体加热、冰冻、研成粉末、溶解在酸中，一切能想到的都做了，但这种神秘的辐射却依然如故。很清楚，这是一种新的现象，这一现象称为放射性现象。

这一发现使不久前已为X射线的发现所激动的物理学家更激动了，很多人都参加了研究。当时，一个很自然的问题就是：一切物质是否都具有放射性呢？皮埃尔·居里和玛丽·居里夫妇两人对此进行了研究。他们根据放射性辐射能使空气电离的特性，设计了一种新的检测放射性的仪器，它不但灵敏方便，而且还能测出放射性的强度。他们又收集了各种元素及其化合物，一一进行了实验，结果发现钍和铀一样也具有放射性。他们又对铀和各种铀盐进行了研究，比较它们辐射的强度，结果发现有一种沥青铀矿，它的放射性比金属铀更强，于是，他们猜测，在这种铀矿中还含有放射性更强的未知物质。

居里夫妇两人应用化学分析方法，不断进行实验，终于有



了新的发现。1898年7月，他们向法国科学院报告，说明他们已发现了一种新的元素，它有较强的放射性（比铀强400倍），他们把它命名为钋。到12月，他们又发现了一种放射性更强的元素，它被命名为镭。

为了研究新发现的元素镭的特性，必须提炼出纯镭来。在随后的几年时间里，他俩在简陋的实验室里，在极原始的条件下，以超人的毅力日夜操作，从几吨沥青铀矿渣中提炼出极微量的纯镭。经测定，它的放射性强度竟是铀的二百多万倍。

那时物理学家还陆续发现了一些其它放射性元素，如钷、钷等。

X射线和放射性现象的发现似属偶然，但科学发现中的这些“偶然”只给予那些有心人。正是这些思想敏锐的有心人，他们十分注意研究那些不寻常的事件，锲而不舍，直至真相大白，由此推动着科学的前进。

## 二、放射性辐射的一般性质

应用放射性很强的镭试样进行实验，可以发现放射性辐射具有以下一般性质：

(1)使气体电离；(2)使带电物体放电（这可以从它使带电的验电器放电得到证实）；(3)使照相底板感光；(4)激发荧光。利用这一特性，在荧光物质中掺入极微量的放射性物质可制造夜光物质；(5)能穿透平常光线所不能透过的物质；(6)使任何吸收这种辐射的物质发热；(7)能杀伤细胞，在放射性辐射的长期照射下将会引起疾病和损害健康。通过这些性质，我们可以确定它的存在。

那么，放射性物质所发出的辐射的本质又是什么呢？

为此可以进行如下的实验：把放射性元素放到铅室中，铅

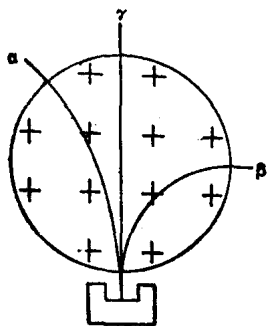


图 1-1

室上开一小孔，射线可从小孔中射出。在孔外加一磁场(图 1-1)，这时可以发现，射线分成三部分，一部分向左偏折，表明它带有正电；一部分向右偏折，表明它带有负电；第三部分不偏折，表明它不带电。这三部分分别称为  $\alpha$  射线， $\beta$  射线和  $\gamma$  射线。

1903 年，卢瑟福进行了类似实验，发现  $\alpha$  射线中的荷电粒子(称为  $\alpha$  粒子)的荷质比就其符号和大小来说都和带有两个正电荷的氦离子相同。1909 年，卢瑟福等观察到集聚起来并已中和的  $\alpha$  粒子显示出氮的黄色特征谱线。直到这时才确定， $\alpha$  粒子实际上就是氦原子核， $\alpha$  射线就是氦核流。

由于  $\beta$  射线在磁场和电场中容易发生偏转，通过测定，很快就知道了它就是电子流。对于  $\gamma$  射线，通过实验得知它的性质与 X 射线相似，以后进一步证实了， $\gamma$  射线实际上是波长比 X 射线更短的电磁波。

天然放射性的  $\alpha$  粒子的初速度一般在  $(1.6 \sim 2.2) \times 10^7 \text{m/s}$  的范围内，也就是说它的初始动能约为  $5 \sim 9 \text{MeV}$ 。 $\alpha$  粒子的能量最初应用射程法测定，即通过测量  $\alpha$  粒子在空气中的射程来求得它的能量。现在，一般是通过测量它在磁场中的偏转来求得其能量。让  $\alpha$  粒子进入与其速度方向垂直的均匀磁场  $B$  中，由洛伦兹力和向心力的公式可得

$$\frac{m^2 v}{r} = qBv,$$

其中  $r$  是  $\alpha$  粒子运动轨道的半径，测得  $r$  就可求得粒子的初始动能。其实，对各种带电粒子都可应用这类方法测出其初始动能。实际测量结果表明：各种放射性元素所放射的  $\alpha$  粒子的速度互不相同，但同一种物质所放射的  $\alpha$  粒子，其初速却有一组确定的值。

$\alpha$  粒子穿过物质时，将与物质原子的外层电子发生电磁作用。 $\alpha$  粒子是带正电的粒子，它对电子的作用，或使电子脱离原子，或使电子由低能态跃迁到高能态。前者使原子电离，后者使原子激发，这就使  $\alpha$  粒子损失自己的能量。经过不断的电离和激发， $\alpha$  粒子损失了它的全部能量，于是，它在物质中就不再前进，此时它所通过的距离就是它的射程。

天然放射性产生的  $\alpha$  粒子在空气中的射程约为几厘米。它在空气中每产生一对离子，平均将损失约 32.5 eV 的能量，因此在它的射程中，大约可产生 10 万对电子—离子。在不同的物质中， $\alpha$  粒子的射程是不同的，在固体和液体中， $\alpha$  粒子的射程要短得多。例如，镭  $A^*$  的  $\alpha$  射线在空气中的射程约为 4.6 cm，而它在铜中的射程只有  $1.3 \times 10^{-3}$  cm。由此可见， $\alpha$  粒子的穿透本领是比较小的。

与  $\alpha$  粒子一样，由  $\beta$  射线在磁场中的偏转也可求得它的初始能量和速度，只是因为  $\beta$  粒子（即电子）的荷质比较小，因此所需的磁场可以弱一些。由于  $\beta$  粒子的质量比  $\alpha$  粒子小得多，因此在具有相同能量的情况下， $\beta$  粒子的速度要大得多，所以在推导有关公式时，要考虑相对论效应。

从实验测得，放射性物质放出的  $\beta$  粒子的能量是在零到某个最大值之间连续分布的，而  $\alpha$  射线和  $\gamma$  射线的能量却是

\* 镭  $A$  的元素符号为  ${}^{210}_{88}\text{Po}$ ，即钋的同位素。这一放射性元素的传统名称为 RaA。

分立的(有一组确定的不连续值)。

$\beta$  粒子通过物质时与物质的相互作用主要是弹性散射和电离作用等,跟  $\alpha$  粒子相比,它的电离作用要弱得多。 $\alpha$  和  $\beta$  粒子主要都是通过电离作用损失能量的,所以由电离作用的强弱就可决定它们穿透本领的大小。 $\beta$  粒子在空气中的射程约为 1000 厘米,在每毫米路径上仅产生约 4 对离子。 $\beta$  粒子可以穿过几毫米厚的铝板,它在穿过物质时将被逐渐吸收。物质对  $\beta$  粒子的吸收与  $\beta$  粒子穿过吸收物质的距离之间服从指数规律。

$\gamma$  射线是一种电磁波,波长特别短,一般在  $0.2\sim 0.01\text{\AA}$  之间。它的穿透本领比  $\alpha$  射线和  $\beta$  射线都大,它可以穿过几厘米厚的铝板。在它穿过物质时,主要是通过光电效应、电子对效应(即光子转化为正负电子对)及其它效应损失能量的。 $\gamma$  射线是中性的,所以它的电离作用最小。

在天然放射现象中, $\gamma$  射线不单独出现,而是与  $\alpha$  射线或  $\beta$  射线同时出现。 $\gamma$  射线穿过物质后的强度与它们穿过的距离之间也存在着指数关系(按指数规律衰减)。

放射性物质所放出的辐射的种种特性和作用,在放射性现象发现的初期已被证实与外界的化学和物理条件完全无关。例如,铀化合物的放射性只与该化合物中的铀的含量有关,而与其化合状态完全无关。如果改变外界的物理条件,如加高温或低温,或加上电场和磁场,都不能影响其放射性的强弱。因此虽然原子核的发现比放射性的发现晚了十五年,但上述事实已足以说明放射性现象是在原子的最内部发生的。当然随着原子核的发现,对这些辐射的本质就更清楚了,原来这些辐射都是在原子核变化时从原子核里放射出来的。

### 三、放射衰变及其规律

1900年，居里夫妇发现镭周围的空气具有放射性，但对这一现象未作进一步研究。到1908年卢瑟福等对这一现象进行了详细研究。他们把一些镭盐  $\text{RaCl}_2$  放在密封的容器中，两天以后，容器内的气体的光谱出现了氡的黄色谱线，六天后出现了氡的所有谱线。同时又发现了另一种气体，它的光谱与当时已知的气体的光谱都不相符。当时把这种气体称为镭射气，此即现在的氡。卢瑟福的研究表明，象铀、镭这些放射性元素，它们的核很不稳定，它们在自发放出射线的同时，变为另一种元素的原子核，这一现象称为放射衰变，或称为原子核的衰变。在上述的实验中，镭在衰变时，放出  $\alpha$  射线， $\alpha$  射线是氦核，当其被中和后即是普通的氦原子，而镭核就变成新元素氡的核。氡也是放射性的，它在放射  $\alpha$  粒子后，变成镭 A ( $\text{RaA}$ )。

在实验中如果进一步把镭和氡分开，则氡的数量很快随时间而减少，四天后减为一半，八天后减为四分之一，而三十天后氡就不到原来的百分之一了。其它的放射性物质也有类似的情况，只是时间的长短不一样。这表明放射性元素在衰变时其数量随时间的变化符合一定的规律。在图 1-2 中画出了氡的数量变化曲线，纵轴是氡的相对数量，横轴代表时间。如果纵轴以自然对数标出，则可得图 1-3，这是一根直线。由此可知这二者之间的关系为

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t,$$

即

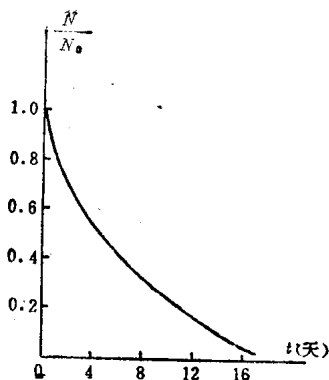


图 1-2

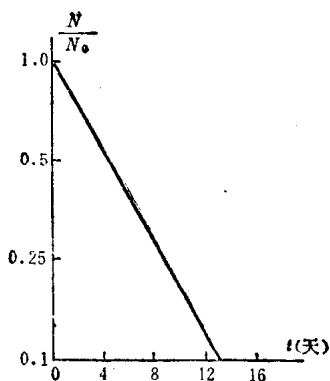


图 1-3

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

式中  $N_0$  是时间  $t=0$  时的原子核数， $N$  是经过时间  $t$  后还存留的原子核数， $\lambda$  为一常数。实验表明放射性元素的衰变都符合这一规律，只是常数  $\lambda$  并不相同。 $\lambda$  标志着放射性元素衰变的快慢，故称为衰变常数。各种放射性元素的衰变常数相差很大。

在衰变中原子核的数目减为原来的一半所需的时间称为半衰期  $T$ ，它是放射衰变快慢的标志。由上式可得

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T},$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}.$$

这就得到了  $T$  与  $\lambda$  的关系， $\lambda$  大的  $T$  短。几种放射性元素的半衰期如表 1 所示。

应当指出的是，以上表明的放射性元素的数量随时间变

化的规律是一个统计规律。在众多的原子核中，每一个核什么时候发生衰变是不能预知的，但可以知道的是，在一定的时间内总有一部分原子核将发生变化，并且它在数量上服从上述指数规律。在同一种放射性元素中，有些核早变，有些核晚变。也就是说它们的寿命有的长，有的短。但由上述指数规律可以算得到这些原子核的平均寿命  $\tau$  为

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{或} \quad T = 0.693\tau$$

对于氡来说，它的平均寿命  $\tau = 5.56$  日。

表 1 几种放射性元素的半衰期

放射性元素名称	元素符号	射线	衰变常数(秒 <sup>-1</sup> )	半衰期
铀	${}_{92}^{238}\text{U}$	$\alpha$	$4.88 \times 10^{-18}$	$4.5 \times 10^9$ 年
镭	${}_{88}^{226}\text{Ra}$	$\alpha$	$1.37 \times 10^{-11}$	1620 年
氡	${}_{86}^{222}\text{Rn}$	$\alpha$	$2.10 \times 10^{-6}$	3.82 日
镭 A (RaA)	${}_{84}^{218}\text{Po}$	$\alpha, \beta$	$3.78 \times 10^{-3}$	3.05 分
钍 C' (ThC')	${}_{84}^{220}\text{Po}$	$\alpha$	$2.31 \times 10^6$	$3 \times 10^{-7}$ 秒

半衰期或衰变常数是各种放射性元素的标志，测出这些常数是辨认放射性元素的一个重要方法。如前所述，放射性衰变是一种核的变化过程，它与外界的化学、物理条件无关（除了用高能粒子对核进行轰击），因此这两个常数与外界条件也无关。

在放射衰变中，根据衰变放出射线的种类分别称为  $\alpha$  衰变、 $\beta$  衰变和  $\gamma$  衰变。

#### 四、放射衰变中的守恒定律和天然放射系

放射性元素的放射衰变过程也象任何其他过程一样，必

须遵守一些一般的守恒定律,如电荷守恒定律、质量和能量守恒定律等。如用  $Q$  表示电荷,用  $M$  表示质量,则有

$$Q(\text{衰变前原子核}) = Q(\text{衰变后原子核}) + \Sigma Q(\text{射线粒子}),$$

$$M(\text{衰变前原子核}) = M(\text{衰变后原子核}) + \Sigma M(\text{射线粒子}) + \Delta E/c^2,$$

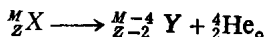
式中求和号  $\Sigma$  是因为有时一次衰变中不止放出一种射线。第二式的最后一项则是根据爱因斯坦质能关系  $E = mc^2$  得到的, 式中  $\Delta E$  为衰变时放出的能量, 此项即是与衰变能相应的质量。由于原子核和  $\alpha$ 、 $\beta$  粒子的电荷可以用电荷数来表征, 因此电荷守恒就是电荷数守恒。又因为天然放射性现象中与  $\Delta E$  对应的质量仅是原子质量的很小一部分,  $\beta$  粒子的质量也很微小, 当略去它们以后, 则可用质量数守恒定律来代替质量守恒定律, 即衰变后原子核的质量数与射线粒子(只考虑  $\alpha$  粒子)的质量数之和应等于衰变前原子核的质量数。

按照通常的习惯,把衰变前的原子核称为母核,把衰变后的原子核称为子核,以  $A$  表示质量数,以  $Z$  表示电荷数,则有

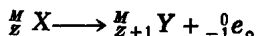
$$Z_{\text{母}} = Z_{\text{子}} + \Sigma Z,$$

$$A_{\text{母}} = A_{\text{子}} + \Sigma A。$$

如果放射性元素作  $\alpha$  衰变,以  $X$  表示母核,以  $Y$  表示子核,以  ${}^4_2\text{He}$  表示  $\alpha$  粒子,则有



对  $\beta$  衰变有



由于元素在周期表中的位置是由它的原子核的电荷数决定的,所以经过  $\alpha$  衰变后,子核在周期表中的位置较母核移后两位。经过  $\beta$  衰变,则移后一位,这就是放射衰变中的位移定



则。

放射性元素在  $\alpha$  衰变时，母核要放出能量，其中一部分以  $\alpha$  粒子动能的形式出现。这样， $\alpha$  粒子就具有动量，由动量守恒定律子核应受到反冲。因为母核静止，故有

$$m_Y v_Y = m_\alpha v_\alpha,$$

则

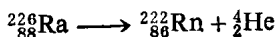
$$v_Y = \frac{m_\alpha v_\alpha}{m_Y}.$$

用  $E_\alpha$  表示衰变时母核放出的能量，这又称为衰变能，则有

$$\begin{aligned} E_\alpha &= \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \\ &= E_\alpha \left( 1 + \frac{m_\alpha}{m_Y} \right), \end{aligned}$$

其中  $E_\alpha$  为  $\alpha$  粒子的动能。测得  $\alpha$  粒子的动能，则可由上式算出衰变能。由于  $\alpha$  衰变的核的质量数大多在 200 以上，故子核的反冲动能约为衰变能的 2%，其余的 98% 则为  $\alpha$  粒子的动能。

如前所述， $\alpha$  粒子具有分立的能量谱，这完全与原子发出的光谱相似。因此，可以推想在核的内部就象原子内部一样，存在着分立的能级，核有基态也有激发态。当母核通过  $\alpha$  衰变成为子核时，由于子核可处于不同的能级，因此放出的  $\alpha$  粒子的能量就会不同。还可以推想，当子核从激发态回到基态时将以光子的形式放出能量，这应当就是实验上观察到的  $\gamma$  射线。由图 1-4 可见， $\alpha$  衰变能之差应等于子核的能级差，因此  $\gamma$  射线的能量应与  $\alpha$  衰变能之差一致。所有这些都已在实验中得到充分的证实。例如，在镭的  $\alpha$  衰变过程中



$\alpha$  粒子有两种不同能量：