

第五章 打开微观世界研究大门的三大发现

科学对于人类事务的影响有两种方式，第一种方式是大家熟知的：科学直接的并在更大程度上间接地产生出完全改变人类生活的工具；第二种方式是教育的性质——它作用于心灵。

——爱因斯坦

世界万物是如何构成的？

1. 在古代的认识：

公元前 400 年，古希腊的哲学家德谟克里特认为，物质是由最小的不可再分的粒子构成。原子的英文名字：atom，出自希腊文，意思是不能再分。

最早原子这个词传入中国时严复把它翻译成“莫破尘”。

我国战国时的公孙龙说过：“一尺之棰，日取其半，万世不竭。”

2. 道尔顿的原子论

科学原子论的创始人——英国科学家道尔顿在1807年，依据一系列实验首先提出：“气体、液体和固体都是由该物质的不可分割的原子组成的”以及“同种元素的原子其大小、质量和各种性质都相同”。在这里，道尔顿的原子已不再是哲学术语，而是实实在在组成物质的基本单元。

3. 物理学家的任务

在道尔顿之后，不少化学家和物理学家以大量实验事实证明了科学原子论的正确。但是原子到底是否可分？若还可分，则如何分？物质结构的最小层次又是什么？……这些任务落到了物理学家身上。

大约又过了100年，到19世纪末，物理学家的研究有了突破性的发现。这就是世纪之交的三大发现：

X 射线 放射性 电子的发现

人类从此打开了奇妙的微观世界研究的大门。

§ 5.1 X 射线的发现

一、阴极射线的发现及其本性的争论

1858年，德国物理学家普吕克尔发现阴极射线。对阴极射线本性有二种不同观点：

一种观点来自**德国**学派，他们主张阴极射线应该是**波**，一种类似于紫外光的以太波。代表人物赫兹和他的助手勒纳德，通过实验发现：这种射线能从勒纳德窗（薄铝箔）

透出来,由此他们认为:只有波才能像光透过透明物质一样,穿越金属箔。由于射线被引出,可方便对它进行各种性质的测试。发现这种射线不仅能使荧光物质发光,且能在磁场中被偏转,还可使照相底片感光,使空气电离。

遗憾的是,在另一实验中,他们却发现此种射线不能被在垂直方向上所加的电场中发生偏转,由此对是否带电产生怀疑。(实际是由于当时真空度不高,电场加不上去。)

另一种观点来自英国学派,他们主张阴极射线应是粒子流。代表人物有克鲁克斯 j. j. 汤姆孙等人。克鲁克斯提出阴极射线是由带负电的分子流组成。

两个学派,截然相反的观点,在当时双方争持不下。

最后对阴极射线本性了做出正确而肯定答案的是英国剑桥大学卡文迪许实验室教授 J. J. 汤姆孙于1898年所作出(电子的发现)。

值得思考:为什么说科学争论是必然发生的,它又必将会推动科学的发展?

二、一种新射线的发现

伦琴用装有勒纳德窗的阴极射线管研究阴极射线,发现了 X 射线,于 1901 年获得了第一个诺贝尔物理学奖。

1. 发现过程:

在实验中抓住异常现象(竟然发现在远离管的一块荧光屏发出了荧光,不可能是阴极射线所致)不放过,一鼓作气,深入研究,7周时间连续发现了一种奇特的新射线(X射线),这种射线:直线传播,在磁场中不偏转,有很强的穿透性,可使照相底片感光。

1895年12月28日,完成了具有历史意义的论文《一种新射线——初步报告》,公布了历史上第一张X射线的照片(他妻子的手骨照片)

2. 重大意义:人类首次进入了微观世界。

3. 在发现过程中几个值得思考的问题

(1) 伦琴发现X射线是偶然的吗?

看来好像是偶然的,实际上又是“偶然中的必然”。在伦琴发现X射线之前的30年中,不少科学家已发现过类似伦琴所见到的异常现象,可惜没有抓住机会。成了恩格斯所说的“往往当真理碰到鼻子尖上的时候,还是没有得到真理”的人。

伦琴为什么能抓住这机遇呢?这归功于他一贯对实验工作十分热爱和专注以及他敏锐的观察和判断能力,还有严谨的科学态度。

“实验是最强有力的杠杆,我们可以利用这个杠杆去撬开自然的秘密。在解决某一假说是保留还是摒弃这样一个问题时,这个杠杆应当成为最高级的评审法院。”

柏林普鲁士科学院在祝贺伦琴获得博士学位50周年的贺信中，对伦琴做出了高度的评价：“科学史表明，在每一个发现中通常都在成就和机遇中间存在一种特殊的联系，而许多不完全了解事实的人，可能会倾向于把这一特殊的事例大部分归功于机遇。但是只要深入了解您独特的科学个性，**谁都会理解这一伟大发现应归功于您这位摆脱了任何偏见，将完美的实验艺术和极端严谨自觉的态度结合在一起的研究者。**”

(2) 伦琴淡薄名利的高尚品德值得称颂。他将发现和发明全部奉献给了人类。

三、X射线的本性和应用

X射线与通常的光波一样，是电磁波，只是波长很短（0.001~1nm）。

围绕X射线的性质和应用的研究，除伦琴外，还有15项获诺贝尔奖的课题与X射线有关。例如：

获奖年代	人物	成就
1914	劳厄	提出了用天然晶体的晶格作为衍射光栅，观察到了X射线的衍射现象，证明X射线是电磁波
1915	布拉格父子	利用X射线衍射进行晶体结构分析
1927	康普顿	康普顿散射，揭示了X射线光子的粒子性

在应用方面值得指出的是：

医学诊断；

用于对材料的元素成分做出分析，在考古、材料研究等方面有重要应用；

用X射线衍射可以对晶体表面进行分析，尤其值得一提的是用此方法，沃森和克里克获得了DNA分子结构，从而提出DNA双螺旋结构模型。

可参见《改变世界的物理学》中§4.3，其中有X射线应用的详细介绍。

§ 5.2 放射性的发现

一、贝克勒尔的一个惊人的意外发现

1. 发现过程

起因是彭加勒对X射线来源的一个错误推测：他认为X射线可能是从荧光物质发出的。贝克勒尔是研究荧光现象的世家子弟，他用荧光物质铀盐做实验，事隔一周后，所给出的两次报告

的结果截然不同。

他发现铀盐本身就会放出一中肉眼看不见的射线，它与荧光完全无关，是一中穿透能力很强的神秘射线。这种射线还可以使空气电离。这一性质为后来对射线强度的定量研究打下了实验基础。

2. 重大意义：

人类第一次接触到核现象，下章我们将会知道放射性是来自原子核，这使人类的认识又深入一个层次。

3. 在发现过程中几个值得思考的问题

(1) **偶然中的必然**：家族几代人对铀盐的研究，使贝克勒尔积累了丰富的实践经验，培养了他严谨的科学态度和科学家的“灵感”。

(2) **“灵感”是一种创造性思维**。科学思维包括逻辑思维（归纳、演绎、类比等）和超逻辑思维（科学想象、直觉和灵感）。人们的科学思维是这两种思维的综合运用。但超逻辑思维能打破常规思路、突破思维定式、洞察事物本质，更具创造性作用。

“灵感”是一种顿悟式的、突发性的直觉。它是以创造者善于思考、不断探索和实践经验的积累为前提的，决不是凭空想象和心血来潮的结果。

(3) 从简单的甚至错误的假设出发，通过实验检验不断修正，甚至推翻原有的假设，使人们的认识逐步走向真理，最终得到世人公认的重大发现，这正是**科学研究的一种常见模式**。

二、贝克勒尔的“先验观念”和居里夫人的新的突破和创新点

1. 贝克勒尔为什么“保守”了？

贝克勒尔发现铀盐的放射性后，没有将研究拓宽和深入下去，而是仅仅只限于铀盐。主要原因正如他多年后所说：“因为放射线是通过铀认识的，所以有一种先验的观念，认为其他已知物体的放射性可比铀还要大很多是不大可能的，于是对这个新现象的普遍性的研究似乎就没有对它的本质的物理研究来的紧迫。”

2. 居里夫人的创新思维

居里夫人根据其丈夫的建议，将刚被发现的放射性的研究作为她的博士论文。有胆识、极具挑战性。

居里夫人工作的创新性表现在：

(1) 她毫不保守，毅然将测量对象从一种铀盐扩展到她能找到的各类矿石，从而发现多种放射性。

(2) 通过高精度定量化的测量弱电离电流来测量放射性的强度。

在极端困难情况下，她在1898年接连发现了新的放射性元素：钷、钋和镭。其中镭的放射

性要比铀强约100万倍。

1903年居里夫妇与贝克勒尔共享了诺贝尔物理学奖。

3. 居里夫人的高尚品德

居里夫妇克服困难，历时4年坚持不懈地工作，在几吨矿渣中提炼出了0.1克纯氯化镭。居里夫人的健康受到很大损害，体重减轻了10公斤。然而回忆这段历史，她说：“在这样的设备条件下，我们开始了令任何人都会疲乏不堪的工作。然而，就是在这陈旧不堪的棚子里，度过了我们一生中最美好和最幸福的年月。”

作为第一位两获诺奖的科学家，功名、财富近在咫尺。然而居里夫人不为所动，不把自己的发明申请专利，将制镭技术奉献给全人类。她说：

“物理学家总是把研究成果全部发表的。不能因为我们的发现偶有商业前途而从中牟利，特别是，镭有治病的功效……我们不能申请专利，这是违背科学精神的。”

爱因斯坦在悼词中说：

“在像居里夫人这样一位崇高人物结束她的一生的时候，我们不要仅仅满足于回忆她的工作成果对人类做出的贡献。第一流人物对于时代和历史进程的意义，**在其道德品质方面，也许比单纯的才智成就方面还要大。**……”

讨论与思考：

为什么居里夫人会与贝克勒尔共享诺贝尔物理学奖？

为什么爱因斯坦讲：“第一流人物对于时代和历史进程的意义，在其道德品质方面，也许比单纯的才智成就方面还要大”？

三、 α 、 β 和 γ 三种射线

1. 三种射线在磁场中可以分开：

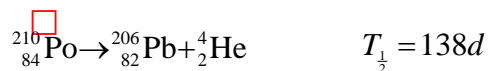
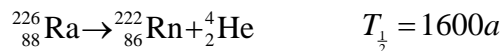
α 射线： ${}^4_2\text{He}$

□ β 射线： e^- 电子流

γ 射线：中性的电磁辐射

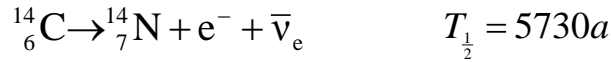
2. 放射性现象实质是一种原子核衰变

□ α 衰变：原子核自发地放射出粒子而发生的转变



β 衰变：原子核自发地放射出粒子或俘获一个轨道电子而发生的转变

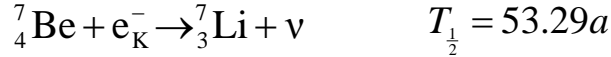
在考古上常用 ^{14}C 的核的 β^- 衰变为:



在医学上常用 $^{13}_7\text{N}$ 的核的 β^+ 衰变为:

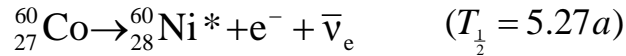


轨道电子俘获:



其中 e^-_{K} 是 K 层电子。 ν_e 和 $\bar{\nu}_e$ 分别是质量很接近零的中微子和反中微子,它们是电中性的,有很强的穿透力。

γ 衰变: α 或 β 衰变后,留下的子核处于激发态时,它可以通过放出 γ 射线而退激。子核放出的 γ 射线不止一种,可能含有几种不同能量的 γ 射线,例如



处于激发态的 $^{60}_{28}\text{Ni}^*$ 子核可以再放出的射线有1.17MeV和1.33MeV两种。

四、放射性衰变规律

1. 指数衰变规律

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

λ 为衰变常数,是反映衰变快慢的物理量。

2. 放射性活度和衰变常数的意义

在实际应用中,放射性强弱应是与放射性核的数目及衰变快慢有关,所以定义放射性活度:

$$A(t) = \lambda N(t)$$

λ 意义是:在 t 时刻,放射性核素的衰变率。

证明:

$$\begin{aligned} A(t) &= \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\frac{[N(t+\Delta t) - N(t)]}{\Delta t} \\ &= \frac{N_0 e^{-\lambda t} - N_0 e^{-\lambda(t+\Delta t)}}{\Delta t} = \frac{N(t)(1 - e^{-\lambda \Delta t})}{\Delta t} \end{aligned}$$

当 Δt 足够小时, $e^{-\lambda\Delta t} \approx 1 - \lambda\Delta t$, 所以: $A(t) = \lambda N(t)$

由 $-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N(t)$ 可得:

$$\lambda = -\frac{\Delta N}{N(t)\Delta t}$$

可见 λ 的物理意义是: 单位时间放射性核素的衰变概率 (单位是 s^{-1})

3. 半衰期 $T_{\frac{1}{2}}$ 与 λ 的关系

某放射性核素的数目衰变掉一半所需的时间:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

衰变规律可以改写为:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

4. 已知放射性活度随时间的变化, 可以测得相应的时间

$$A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

于是有

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{A(t)}{A_0} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A(t)}$$

应用举例: ^{14}C 考古

例题: 有一古尸, 现测得此古尸1g碳中的 ^{14}C 的活度是 0.121 Bq。问此人已死亡多少年了?

先计算 ^{14}C 的衰变常数

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{5730\text{y}} = 1.21 \times 10^{-4}/\text{y} = 3.83 \times 10^{-12}/\text{s}$$

已知: 12 g (1摩尔质量) 碳中含有的碳原子数为阿伏加德罗常数 $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ 个, 所以1g 碳 ^{12}C 中的原子数为 $(6.02 \times 10^{23})/12 = 5.02 \times 10^{22}$ 个, 相应的 ^{14}C 原子数目为

$$5.02 \times 10^{22} \times 1.20 \times 10^{-12} = 6.02 \times 10^{10} \text{ 个}$$

$$A_0 = \lambda N_0 = (3.83 \times 10^{-12}/\text{s})(6.02 \times 10^{10}) = 0.231\text{Bq}$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \frac{1}{1.21 \times 10^{-4}/a} \ln\left(\frac{0.231\text{Bq}}{0.121\text{Bq}}\right) = 5340a$$

可见此人已死去 5340 年了。

§ 5.3 电子的发现

一位最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人——汤姆孙

鉴于汤姆孙对物理学发展所做出的贡献，有必要介绍他的生平。尤其是他连续担任卡文迪许实验室教授（即负责人）长达 35 年，为实验室建设、人才培养、国际合作交流做出了重要贡献（见附录 5A）

一、电子发现过程

三个关键性实验：

第一个实验：通过提高真空度，完成了阴极射线在磁场中的偏转实验，证明阴极射线是带电粒子流。

第二个实验：利用汤姆孙管，定量测出阴极射线的荷质比 q/m 约为 10^{11}C/kg ，这要比氢原子的荷质比大1000倍左右。他结合了其他人的实验，尤其是的阴极射线能穿过勒纳德窗（铝箔）的实验，提出这种微粒应比原子、分子小得多，且是原子的组成部分。而且由于 q/m 值与阴极物质材料无关，他进一步得出结论：这种粒子应是各种物质不同原子所包含的普适成分。

第三个实验：利用威尔逊所发明的云雾室，测定这种微粒所带电荷为 $1.1 \times 10^{-19}\text{C}$ ，有力地证明了此微粒的质量要比氢离子小约1000倍。

这种微粒后来被命名为“电子”，电子的发现是关于阴极射线本质的争论宣告结束。

二、敢于突破传统观念

在继承中发展，这是科学研究的正确方法。但是在认识发展的过程中要有敢于创新，敢于突破传统观念束缚的勇气。正如英国科学家贝尔纳所说：“发现的最大困难，在于摆脱一些传统的观念。”

面对荷质比的测定结果，只有汤姆孙认为它可以不是传统原子、分子微粒，而是一种新的、

前人从未见到过的比原子、分子微粒小得多的带电粒子。

三、电子发现对现代科学和技术发展的深远意义

1. 电子的发现，打破了原子不可分的经典的物质观，宣告原子不是构成物质的最小单元，它具有内部结构，是可分的。

2. 三大发现中电子的发现是与微观物质组成有最直接的关系，它是组成原子的普适成分，它的质量比氢原子要小三个量级。

3. 电子的问世开辟了电子技术的新时代。

4. 电子的发现影响了一个世纪中人们的科学思想的研究方法。

对这一点，李政道教授的评价：

“在整个100年前，汤姆逊发现了电子，从那以后影响了我们这世纪的物理思想，即大的是由小的组成，小的是由更小的组成，找到了最基本的粒子就知道最大的构造。这个思想不仅影响到物理，还影响到本世纪生物的发展，要知道生命就应研究它的基因，知道基因就可能知道生命。我们现在发现这并不然。……我觉得基因组也是这样，仅是基因并不能解开生命之谜，生命是宏观的。”

值得深思：对一个重大发现的意义来讲，对人们思想观念变化的影响将会更加深远、更加广泛。

紧接着李政道教授又提出了新的科学思想：

“我猜测，21世纪将要把微观和宏观整体地联系起来，这不光是影响物理，也许会影响到生命的发展。微观和宏观必须要结合起来，这个结合对应用科技可能会有极大的影响。”