

# 从电子的发现看科学实验

## ——纪念汤姆逊发现电子一百周年

郁 忠 强

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

19世纪末,物理学已经有了长足的发展,牛顿力学、热力学、电磁学和光学,都已经建立了比较完整的理论体系,并在应用上也取得了辉煌的成就,所有的物理现象几乎都得到了完满的解释.研究物体的运动,大到日月星辰,小到气体分子,都可以用牛顿力学来研究;电磁现象和光,有麦克斯韦的电磁场理论.许多物理学家踌躇满志,甚至有人认为,物理学的大厦已经建成,留给后辈物理学家的只是一些装修工作:把常数测量得更精确一些,把公式推导得更完备一些.19世纪—20世纪之交,实验上出现了一系列重大的发现,打破了物理学界沉闷的气氛,引起了许多物理学家更深入的思考和探索,从而揭开了现代物理学的序幕.从1895年伦琴发现X射线开始,在短短的十年间,重大的发现有10余项,其中J.J.汤姆逊(J. J. Thomson)于1897年通过测量荷质比发现电子是最重要的一项.电子的发现不仅打开了原子的大门,而且开创了近代粒子物理实验的先河.

对气体放电现象的研究导致了阴极射线的发现,许多物理学家对阴极射线的实验研究奠定了汤姆逊发现电子的实验基础.这段历史始终贯穿着实验—解释和争论—再实验,去粗取精,去芜存真,不断改进,不断提高.现在我们再来重温电子被发现的过程仍能学到许多有关科学实验的知识,从中得到启示.

### 一、关于阴极射线的实验研究

电子的发现是和阴极射线的实验研究联系在一起的,而阴极射线的发现和是从真空管中的放电现象开始的.1838年法拉第在真空管内发现了“法拉第暗区”,即紫色的阴极电辉和粉红色的阳极电辉彼此分开,中间出现一

个暗区.随着真空管内气压的降低,阴极辉光分裂为几条彩带.法拉第认为,弄清这些现象是很重要的.随着电力工业的发展,电光源开始得到应用,在许多实际应用中都要求对气体的放电现象作深入的研究.1855年水银真空泵发明后,有可能制成低压的气体放电管,给真空管内的气体放电现象研究创造了条件.1858年德国物理学家普吕克尔(J. Plücker)在利用放电管研究气体放电现象时发现了阴极射线.他发现当玻璃管内的空气稀薄到一定程度时,管内的光线逐渐消失,也就是法拉第暗区变得很大,这时在阴极对面的玻璃管壁上出现了绿色荧光.如果改变放电管所处的磁场,荧光的位置和分布也随着改变,普吕克尔认为这种荧光是从阴极发出的电流撞击玻璃管壁造成的.后来,德国物理学家哥尔茨坦(E. Goldstein)把普吕克尔发现的阴极辉光称为阴极射线.1869年普吕克尔的学生希托夫(J. W. Hifforf)设计了一个喇叭形的阴极射线管,在中间放置一块障碍物片,使其面对阴极,结果发现在端面玻璃壁上出现一块边界清晰的阴影,形状与障碍物相似,再次实验证明了普吕克尔的发现.历史上将希托夫发明的阴极射线管称为“希托夫管”.

为了弄清阴极射线究竟是什么,在19世纪的后30年,许多物理学家投入了对阴极射线的研究工作,逐渐形成了两种不同的观点.以德国物理学家哥尔茨坦和赫兹(H. Hertz)为代表的德国学派,主张以太说.他们认为阴极射线是类似于紫外线的以太波.另一种是以英国物理学家克鲁克斯(W. Crookes)和瓦尔利(C. F. Varley)为代表的英国学派,主张带电微粒说,即阴极射线是由带负电的“分子流”组成.两种不同的观点都是基于各自的实验观

察。双方争执不下,为了找到有利于自己观点的实验证据,他们不断地改进实验,并设计新的实验。他们也重复对方的实验,并加以改进,得到了越来越多的实验结果。争论持续了二、三十年,吸引了一大批物理学家参与了对阴极射线的实验研究,使研究工作越来越深入。

1876年,哥尔茨坦的实验进一步证实了阴极射线的直线运动。他从一系列的实验结果中得出结论:阴极射线不像一般的白炽灯丝发出的光那样,向四面八方散射,而是从阴极表面垂直地发射,一凹面状的阴极可以使射线聚焦;阴极射线的性质与阴极材料无关;阴极射线会引起化学反应,阴极射线像紫外线的作用一样可以使真空管内的银盐改变颜色。哥尔茨坦根据这些性质,认为阴极射线类似于紫外线,可以看成是以太的某种扰动。

哥尔茨坦还作了一个著名的光谱实验。他用一根特制的L形放电管,如图1所示。A、B两个电极分别当阴极,用光谱仪观测谱线,研究阴极射线发光波长是否受多普勒效应的影响。如果A作阴极,从光谱仪接收到的光来自前进方向的阴极射线。如果B作阴极,光谱仪看到的光来自于垂直方向前进的阴极射线。实验结果表明,无论是哪一端发出的阴极射线,谱线的波长都没有改变。哥尔茨坦认为他的实验否定了克鲁克斯等人提出的“分子流”的假设。

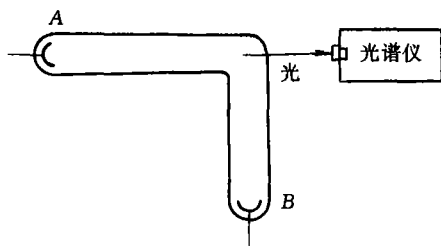


图1 哥尔茨坦的光谱实验

赫兹和他的学生勒纳德(P.Lenard)做了一系列的实验以证明自己的以太理论,从而否定阴极射线的带电微粒模型。赫兹做的最重要的实验是观察阴极射线在电场中的行为。在阴极射线管中加了一个垂直于阴极射线的电场,观察阴极射线的偏转,结果他没有观察到阴极射

线有任何偏转。由此赫兹认为阴极射线是不带电的,更坚定了他的以太说。实际上,赫兹的这个实验是不成功的,他忽视了低压状态下气体导电机制的复杂性。下面要讲到J.J.汤姆逊重复了赫兹的实验,成功地得到了正确的实验结果,从而得出了正确的结论。赫兹和勒纳德的另一个实验是非常成功的。当时在研究阴极射线时,人们只限于观察玻璃管内的现象,因为阴极射线到达管壁就被停止了。若能将阴极射线引出放电管外,就可以更方便地进行观察和测量,进一步研究在放电管内无法进行的实验。1891年,赫兹已经注意到了阴极射线可以像光透过透明物质那样地透过某些金属薄片。在赫兹教授的启发下,勒纳德制作了一个特制的玻璃放电管,在末端嵌上厚仅2.65微米的薄铝箔作为窗口,如图2所示。他们观察到了阴极射线能够穿过铝箔继续在管外的空气中行进。他们认为这又是以太说的有力证据,因为只有波才能穿越实物。

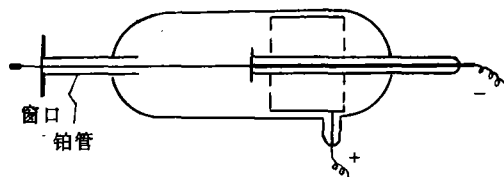


图2 勒纳德的阴极射线管

勒纳德的发现使他取得了一系列丰硕的实验成果。实验表明,从铝窗发出的射线和放电管内的射线具有相同的性质,即它们都能激发荧光,都可被磁铁偏转等。他进一步证明了阴极射线有某些化学效应,例如使照相底片感光,使空气变成臭氧,使气体电离导电等。还发现射线在气体中散射,散射随气体的密度而增加;射线对不同物体的穿透本领不同,吸收率和物体密度有直接的关系。后来他还证明了阴极射线即使在真空中也带负电。勒纳德还发现有不同类型的阴极射线,它们在磁场中偏转的程度不同。勒纳德对阴极射线的研究成果,不仅增加了人们对这些现象的了解,而且在许多方面都成为以后电子论发展的基础。这很大程度上要归功于他作出的关于阴极射线可存在于放电

管外的这一发现,大大地扩展了研究领域,促进了对其它远未弄清的类型射线源的研究. 鉴于勒纳德的研究工作的科学价值和它的开创性意义,瑞典皇家科学院决定授予他 1905 年的诺贝尔物理学奖.

主张微粒说的瓦尔利和克鲁克斯最早是根据阴极射线在磁场中受到偏转的事实提出的. 他们主张阴极射线是由带负电的物质微粒组成的设想. 他们做了一系列的实验,发现阴极射线不但能传递能量,还能传递动量. 他们认为阴极射线是由于残余气体分子撞到阴极,因而带上负电,形成了分子流.

1895 年法国物理学家佩兰(J.B.Perrin)将圆桶电极安装在阴极射线管中,用静电计测圆桶接收到的电荷. 结果测到的是负电荷. 他的实验支持了带电微粒说. 但反对者反驳说,他测到的不一定就是阴极射线的电荷.

## 二、电子的发现

对阴极射线的本性作出正确答案的是英国剑桥大学卡文迪许实验室教授 J.J.汤姆逊. 有关阴极射线的谜引起了他的浓厚的兴趣,从 1890 年起,他带领着学生进行阴极射线的研究. 他思索着用什么样的方法可以解开这个谜呢? 他对以往实验进行了考察,认为克鲁克斯等人的带电微粒说更符合实际. 要是阴极射线是一种带电的微粒(原子或者分子),那么它不仅能在磁场中偏转,也应该在电场中偏转. 汤姆逊还认为更重要的是应该设法测出阴极射线中那些微粒的质量. 为此,他进行了以下几方面的实验:

1. 直接测量阴极射线所携带的电荷. 他将佩兰实验装置作了改进,将连到静电计的电荷接收器(法拉第圆桶)安装在真空管的一侧,不加磁场时,没有电荷进入接收器,加上磁场时使阴极射线偏转. 当磁场达到某一值时,接收器接收到的电荷骤增,说明电荷确实来自阴极射线.

2. 使阴极射线受静电偏转. J.J.汤姆逊重复了赫兹的静电场偏转实验,起初和赫兹一样没有看到阴极射线的偏转. 看来,汤姆逊将得到和赫兹同样的结论了. 可是,细心的汤姆逊

没有放过实验中出现的哪怕是非常细微的异常现象. 他发现在金属板上外加电压的瞬间阴极射线出现了短暂的偏转,然后很快地回到管壁标尺的中点. 汤姆逊抓住这瞬间的异常,分析出现这种现象的可能原因. 他认为现在的装置中没有观察到持续而稳定的偏转很可能是由于放电管内气体的存在. 当阴极射线穿过气体时会使气体变成导体,射线将被导体包围起来,屏蔽了电的作用力,就像金属罩把验电器屏蔽起来一样,使它不受外部的电作用. 由此,他提出了新的要求,实验必须在更高的真空中进行. 汤姆逊利用了当时最先进的真空技术,将放电管内的空气一直抽到只剩下极少量的空气时,终于排除了电离气体的屏蔽作用,使阴极射线在电场中发生了稳定的电偏转,偏转的方向表明阴极射线带的是负电荷,取得了突破性的实验结果.

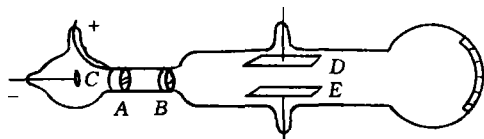


图 3 汤姆逊测定电子荷质比的实验装置示意图

3. 用不同的方法测量了阴极射线的荷质比. 一种方法是在一只特制的阴极射线管上进行的,见图 3 所示. 在管子的中间有一对金属电极  $D$  和  $E$ , 在管子端部的管壁上贴了一张标有刻度的标尺. 当接通电源后,从阴极  $C$  发出的阴极射线穿过两个狭缝  $A$  和  $B$ , 使阴极射线成为细束, 然后穿过金属板  $D$  和  $E$  之间的空间, 最后打在管壁标尺的中心, 并发出荧光. 如果在电极  $D$  和  $E$  上加上一定的电压, 阴极射线就被电场推向一边, 不再到达标尺的中心, 从管壁的标尺上很容易测得偏移大小. 在管子的两侧各加一个通电线圈, 以产生垂直于电场方向的磁场. 汤姆逊巧妙地将电场和磁场结合起来, 选择合适的电场和磁场, 可以使磁场产生的作用力恰好等于电场产生的作用力, 也就是说, 由阴极射线束打在管壁上所引起的荧光不受到任何偏转, 这样就可以从电场和磁场的大

小计算出阴极射线的速度. 再根据阴极射线在电场下引起的荧光斑点的偏移, 就可以推算出阴极射线中粒子的荷质比  $e/m$ .

另一种方法是测量阳极的温升. 阴极射线打击到阳极, 会引起阳极的温度升高. J.J. 汤姆逊把热电偶接到阳极, 测量它的温度变化. 根据温升和阳极的热容量可以计算出粒子的动能, 再从阴极射线在磁场中偏转的曲率半径, 推算出阴极射线的荷质比与速度.

两种不同的方法得到的结果相近, 荷质比都是  $e/m \approx 10^{11}$  库仑/千克. J.J. 汤姆逊进一步的实验表明, 改变放电管的形状、改变管内气体的压力, 甚至改变阴极物质材料或者改变管内气体的种类, 测得的荷质比  $e/m$  均不变.

1897年4月30日, J.J. 汤姆逊向英国皇家研究所报告了自己的工作, 后又以《论阴极射线》为题发表了论文. 他指出阴极射线粒子的  $e/m$  值比起电解的氢离子  $e/m$  值大得多, 约1700倍. 原因何在呢? 不是阴极射线粒子的质量比氢离子小得多, 就是它的电荷比氢离子的电荷大得多, 或两者兼而有之. J.J. 汤姆逊认为, 根据勒纳德的薄窗实验, 阴极射线粒子的质量应该很小, 比普通分子小得多, 才能解释阴极射线透过薄铝窗的事实.

接着, J.J. 汤姆逊和他的学生们用几种方法直接测量到了阴极射线载电荷子所带的电量. 其中一种方法是采用威尔逊 (C.T.R. Wilson) 发明的云室, 即带电粒子可以作为一个核心使它周围的水蒸气凝成小水滴的方法, 测量了阴极射线粒子所带的电荷量与稀溶液电解中一个氢离子所携带的电荷量是相等的. 1899年, J.J. 汤姆逊采用斯坦尼 (G.T. Stoney) 的“电子”一词来表示阴极射线粒子. “电子”原是斯坦尼在1891年用于表示电的自然单位.

这样, J.J. 汤姆逊最终解开了阴极射线之谜, 发现了电子. 随后, 他又研究了许多新现象, 以证明电子存在的普遍性.

光电效应是1887年赫兹发现的, 但光电流的本质一直没有搞清. 1899年, J.J. 汤姆逊用磁场偏转法测定了光电效应产生的带电粒子的荷

质比  $e/m$ . 他用锌板作光阴极, 平行的阳极约距1厘米, 紫外光照射在锌板上, 从锌板上发射出来的光电粒子经电场加速, 向阳极运动. 整个装置处于磁场  $H$  之中. 在磁场的作用下, 光电子作圆弧运动, 只要磁场足够强, 总可以使这些粒子返回阴极, 于是极间电流降至零. 根据电压、磁场和极间距离, 可计算出光电粒子的荷质比  $e/m$ , 它与阴极射线的荷质比相近, 这就肯定了光电流和阴极射线实质相同, 都是高速运动的电子流.

热电发射效应是1884年爱迪生 (T. Edison) 发现的, 称爱迪生效应. 他发现在白炽灯泡中, 白炽碳丝加热后有负电逸出. J.J. 汤姆逊同样用磁场截止法测其荷质比, 证明这一负电荷也是电子.

$\beta$  射线是卢瑟福 (E. Rutherford) 在1898年发现的, 不久, 贝克勒尔 (H. Becquerel) 用磁场和电场偏转法测得  $\beta$  射线的荷质比和速度, 证明  $\beta$  射线也是高速电子流.

大量的实验事实表明: 不论是阴极射线、 $\beta$  射线还是光电流, 都是电子组成的; 不论是由于强电场的电离、正离子的轰击、紫外光的照射、金属受灼热还是放射性物质的自发辐射, 都发射出同样的带电粒子——电子.

### 三、诺贝尔奖得主和科学园丁

自阴极射线发现后, 一大批科学家包括希托夫、克鲁克斯、瓦尔利、哥尔茨坦、赫兹、勒纳德、佩兰、汤姆逊等人研究了阴极射线, 历时20余年. 在大量的科学实验的基础上, 汤姆逊最终发现了电子的存在.

因对阴极射线的研究作出突出贡献的1905年诺贝尔物理学奖得主勒纳德教授在授奖仪式上的演讲有一段精彩的开场白. 他说: “这给了我一个很好的机会, 一方面谈一下我的工作是如何依靠了别人的工作, 另一方面谈一下后来的、或多或少是同时代的其他研究者的工作是如何在若干方面和我的工作相联系. 因此, 用一个比喻, 我尊敬的瑞典科学院的同行们, 在你们的院士证书的扉页上用过的比喻, 现在在我不仅要讲得到的果实, 而且要讲结出果实

# 宇宙年龄

## ——宇宙学中的一个热点问题

许 梅 ·

### 问题的提出

1986年8月下旬,国际天文学联合会第124次(观测宇宙学)讨论会在北京举行.这次会议上宣布的宇宙年龄的最好结果是140—200亿年.但近几年通过对几个河外星系中造父变星的观测却产生了所谓宇宙年龄危机的新问题:例如,对星系M100内20颗造父变星光变数据的测定得出哈勃常数 $H_0=80\pm 17$ 公里·秒<sup>-1</sup>·兆秒差距<sup>-1</sup>,对星系NGC4571中3颗造父变星的测量得出 $H_0=87\pm 7$ 公里·秒<sup>-1</sup>·兆秒差距<sup>-1</sup>,而对星系群狮子/中星系M96的造父变星的测量却得出 $H_0=69\pm 8$ 公里·秒<sup>-1</sup>·兆秒差距<sup>-1</sup>.按照宇宙创生热大爆炸模型(以下简称标准模型),如果物质是均匀膨胀的,而彼此间又没有引力等相互作用,则 $H_0$ 的倒数就直接给出宇宙的年龄,所谓哈勃年龄.若取 $H_0=87$ 公里·秒<sup>-1</sup>·兆秒差距<sup>-1</sup>,则哈勃年龄

$$T_0 = \frac{1}{H_0} = \frac{3.26 \times 10^6 \times 9.46 \times 10^{12}}{87} \text{ 秒}$$

的果树和栽培它们的人.这个比喻对我来说尤其合适,因为我决不是属于收获果实的人,我只是一个植树的人,照料果树的人或者只是对这些有帮助的人.”勒纳德这儿指的比喻是瑞典科学院院士证书的扉页上有一个盾形图案,画面是一个园丁在种植幼树,上面题有格言:“为了我们的后代.”勒纳德因研究阴极射线而获诺贝尔奖.他发现了阴极射线可以穿过铝片继续在管外的空气中行进.他的发现是受到他老师赫兹的启发,在赫兹实验的基础上作了改进,成功地将阴极射线引出放电管外,使对阴极射线的研究工作有可能在比以前更简单、更方便

$$= \frac{3.26 \times 9.46 \times 10^{18}}{87 \times 365.23 \times 86400} \text{ 年}$$

$$\approx 115 \text{ 亿年}^{[注]}$$

若取 $H_0=69$ 公里·秒<sup>-1</sup>·兆秒差距<sup>-1</sup>,则 $T_0\approx 145$ 亿年.另一方面,天文学家一致认为球状星团是我们银河系中最古老的天体,因为星团中恒星的低金属(在天文学中,重于氮的元素称为金属元素)含量表明它们是属于从原星系凝聚出来的第一代恒星.利用球状星团的赫罗图可以推算出星团和银河系的年龄为130至180亿年,至少不能低于114亿年.因此,按照标准模型,就会得出宇宙年龄比宇宙中最古老天体年龄小的谬论.

### “非标准”的答案

在一些科学家提出的非标准宇宙模型中,不存在宇宙年龄危机问题.现介绍其中的三种如下:

#### 1. 对星系NGC4571中3颗造父变星的

[注] 1秒差距=3.26光年,1光年=9.46×10<sup>12</sup>公里,1回归年=365.23天,1天=86,400秒.

的实验条件下进行.使得勒纳德以及其他科学家进行了一系列有价值的实验研究.从这个意义上讲,勒纳德是一个植树的人,照料果树的人.而收获果实的是汤姆逊.是汤姆逊总结了20余年有关阴极射线的实验结果,用巧妙的实验方法测定了阴极射线的荷质比,最后确定了电子的存在.使20余年有关阴极射线的争论告一段落.电子的发现打开了原子的大门,开始了20世纪科学技术发展突飞猛进的新纪元.享受现代文明的人应该感谢现代物理的植树人之一、开创粒子物理实验的先驱、1906年诺贝尔物理学奖得主——J.J.汤姆逊教授.