

从阴极射线的争议到电子的发现

宋德生

(桂林电子工业学院)

一、从“暗区”到“阴极射线”

法拉第在 1838 年研究真空放电时发现真空管中出现一道暗环，它把紫色的阴极电辉和粉红色的阳极电辉分开。随着气压降低，阳极辉光就变成了数条彩带。后来这个暗环便命名为“法拉第暗区”。

二十一年过去了，德国物理学家 J. Plücker 重新研究法拉第暗区时偶然发现，在阴极附近的管壁上有一片荧光，磁铁可以改变它的位置。Plücker 直觉认为，荧光很可能是由阴极抛射出的某种带电粒子流撞击管壁产生的。但是，他又觉得这种解释与法拉第把电当作“力态”的思想相违，遂不敢坚持己见^[1]。

又过了十年，Plücker 的学生 J. W. Hittorf 实验证明了 Plücker 发现的荧光现象。他把阴极做成点状，他发现在阳极后面的玻璃上闪烁出荧光。他再把一块障板放在阳极和玻璃之间，结果就在原来出现荧光的玻璃壁上出现了一片边缘清晰的阴影^[2]。他似乎觉得阴极发射出一种类似于光的东西，而不是带电粒子。

1876 年，德国物理学家 E. Goldstein 做了一个类似的实验，不过他把阴极做得很大，而把障板做得很小。他发现在障板后面的玻璃管壁上的阴影区的边界模糊，类似于光的衍射效应。这样一来，阴极射线的光学形象更得到了加强。他还把阴极发射的物质流称为“阴极射线”(kathodenstrahlen)，此词一直沿用至今。

至此，德国物理学家们就普遍地把阴极射线当作以太的一种特殊振动，这是因为那个时候物理学家们都认为电与以太有关。并且，电

磁学大师麦克斯韦已经把电磁波当作以太的横向振动，理论上预言了电磁波和光波的同源性。此外，因为当时真空技术水平低，真空管不可能达到高度真空，阴极射线所经之路难免不产生辉光，再加上观察到的投影和衍射现象，便很自然地把阴极射线与光线联系起来。

二、“已知世界”和“未知世界”的边地

把阴极射线类比成光的论点并非无懈可击，它至少解释不了“法拉第暗区”。1879 年，英国物理学家 Sir W. Crookes 为研究暗区现象，再次进行了阴极射线管实验。那时的真空技术有了长足进展，射线管的气压可达到更低的程度。结果发现：除法拉第暗区外还有第二道暗区，它把阴极辉光柱劈成了两截。后来，这个暗区就被命名为“Crookes 暗区”。

Crookes 是最先认定阴极射线是带电微粒流的人。他这一思想是在经过一系列实验后形成的，其中有三个实验对阴极射线以太论最具有批判性，它们依次证明了阴极射线是微粒流，是带电的微粒流，是带负电的微粒流。

第一个实验的装置如图 1 所示。实验的第

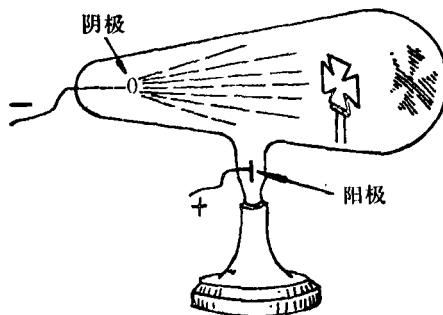


图 1 [1]

一步,把马耳他十字架(云母质)竖起,玻璃壁上出现十字架阴影.第二步,把十字架倒向水平位置,结果原来的阴影部分变得特别亮,比周围的荧光还要强.这种现象无法用以太振动假说来解释,如果假设阴极射线是快速微粒流,则就能迎刃而解了.因为当十字架竖立时,微粒流被挡住了,出现了阴影,未被挡住的部分受到微粒冲击泛出荧光,并逐渐疲劳;一旦把十字架放平,微粒流如潮似涌地打在玻璃上,未疲劳的地方所泛荧光就比已经疲劳的地方亮.

第二个实验的装置如图 2 所示. A, B 是两个条状阴极,与 a, b 两条狭缝平行.如使 A, B 联接,那么就会在荧光屏上打出两条平行的荧光 e 和 f;如果断开 A 和 B 的连线,只使它们当中任意一个带负电位,那么荧光屏上只出现一条荧光 d.根据电的“同性相斥”,可以断定阴极射线是带电的微粒流.当然,也就证明阴极射线带有负电.不过, Crookes 为使人信服,做了第三个实验(如图 3 所示).他利用电流在磁场中偏转的方向来判断电的极性.

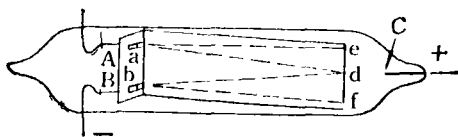


图 2^[1]

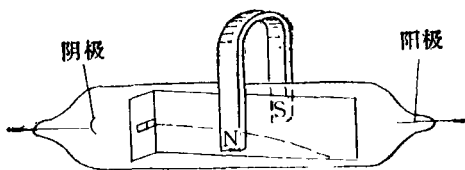


图 3^[1]

人们关心这种带电微粒流是什么样的物质,有多大,性质怎样.当时的科学家普遍地认为原子不可再分. Crookes 也受到这种思想的束缚,他把这种电粒子当作了“电原子”,与发射它的阴极材料的原子一样大,除带负电外,其他性质都与母体的原子相同.即使这样,他的发现仍不失为一项重要突破,为电子的发现迈出

了重要的一步.他本人也相信,他的发现将会“在‘已知世界’和‘未知世界’的‘边地’上产生硕果,‘未来最伟大的科学问题将在这块‘边地’甚至在更远的地方找到它们的答案.这里……隐伏着‘最终实在’,惟妙惟肖、意义深远,而又光怪陆离”.^[3]

三、以太阴云仍然十分凝重

研究阴极射线的热潮从英国到了德国,从德国到了英国,再又转动了德国.这一次是由于光电效应的发现而引起的.德国物理学家赫兹在 1887 年在实验证明位移电流存在的过程中发现,电弧放电时能导致附近的带电体加速放电^[4].翌年, W. Hallwachs 也发现了光电现象,他认为这是弧光中紫外线所引起的放电效应^[5].从此就掀起研究光电效应的热潮.

1889 年,赫兹的学生 P. Lenard (1862—1947)开始研究光电效应,他做了许多实验,其中一个实验是:在一个真空管中放有二平行的金属板,其中一块接电位计,当紫外线投射到另一金属板上时,电位计叶片就逐步张开;如果预先使接电位计的金属板带负电位,电位计叶片张角也不会因另一块金属受到紫外线照射而改变,本来,如果假设光致发射的物质是负电粒子,则现象就能得到解释,但 Lenard 跟他的老师赫兹一样,是不相信“电原子”假说的.他认为,当紫外线投射到金属上时,使金属抛射出一种能量态——“量子”(quants,它与普朗克提出的 quanta 是不同的概念——作者),它们激起“以太云”的流动,打击到另一块金属上,从而引起实验观测到的效应^[6].

Lenard 后来的确找到了否定“电原子”的证据.1890—1891 年间,他制作了一个特殊的阴极射线管,阴极用钠汞齐做成,阳极是铂丝.在进行实验后,他把阳极取下来进行光谱分析,未发现钠的光谱线.如果阴极射线是“电原子”流,那么阳极上就会有钠原子沉淀,然而并没有^[7].这就成了阴极射线“以太振动论”者批判“电原子”论者的第一个把柄.

1892年,赫兹做了另一个实验:他用一块金属将射线管的两极隔开,令其放电,结果发现在金属板两边都产生了辉光。如果阴极射线是由“电原子”构成的,“电原子”的尺寸与金属板的原子尺寸同样大小,则电原子无法穿透。这就是“以太振动论”者怀疑“电原子”的第二个根据。

1893年,Lenard发展了赫兹实验技术,做了一个很有名的实验。他在阴极射线管上开了一个小窗口,正对着阴极,再用铝箔把它封上,然后抽真空。他发现了奇怪的现象:在铝箔的外侧产生了辉光。但是,当时他对这种现象的解释完全是错误的,他认为这是阴极射线穿过铝箔的结果。Lenard把阴极射线称为“阴极射线光”。

现在我们知道,Lenard发现的现象首先是由X射线产生的,其次还有部分电子散射的作用。奇怪的是,Lenard主要因为这项他不能自圆其说的发现获得了1905年诺贝尔奖金。更有意思的是,当伦琴在1895年宣布发现X射线后,Lenard就说这是他早已发现的现象(指1893年实验),因此导致了优先权的争论。最后,他两人共享了1896年维也纳科学院的Baumgartner奖。1897年,巴黎科学院把La Caze Prize的物理学金奖给Lenard,却把生理学奖金奖给伦琴。1901年,历史作了最后判决,把诺贝尔物理学奖金奖给了伦琴,当时提名委员会仍有人坚持要让Lenard分享这次奖金。德国人一般支持Lenard,而英国人多半支持伦琴,因为英国人站在另一角度更能察觉Lenard理论的缺陷。英国物理学家G. G. Stokes曾风趣地说过:“Lenard可能在他的大脑中有过这种射线,而伦琴却把它们放射到其他人的骨骼中去了”^[18]。

四、由“电原子”向亚原子过渡

科学的发展说到底科学思想的发展,理论研究是这样,实验研究也是这样。

在法拉第的理论中,“绝对电荷”不存在,电

物理

不可分,电只不过是空间的一种力学态。他不喜欢“以太”,而使用力线概念^[9]。1846年,德国物理学家韦伯第一次提出了电粒子的概念,他认为所谓电流,是两种不同的电粒子在导线中相反运动造成的。尽管E. T. Whittaker把韦伯的理论称为“第一个电子论”,但还没有足够的事实证明这个理论产生了什么重要结果,“电粒子”概念只不过是韦伯的超距电动力学的框架一部分而已。1855—1864年间,麦克斯韦发展了法拉第场论,再次否定“绝对电荷”,并引入了以太场,目的在于使用菲涅耳的弹性固体以太假说,推导电磁波速度,结果取得成功^[10]。此后,麦克斯韦的理论传到了德国,在那里导致了一种混合的理论体系的出现,既有成功,也有失败。赫兹抛弃超距论框架,接受了电磁场论,实验证明电磁波存在^[11]。另一方面,德国物理学家们(包括赫兹在内)因不承认电可作为一种分离的实在而深陷于无法解释阴极射线的困境中。相反的情况竟发生在电磁场论的故乡的英国,自诩为具有法拉第风格的Crookes首先对法拉第的连续场提出了挑战,提出了“电原子”概念。他的思想接着又影响了德国,影响了能量守恒与转化定律的发现者亥姆霍兹思想转折终于又开始了。

1881年,亥姆霍兹应伦敦皇家学会邀请发表了“法拉第讲演”,把“电原子”由概念阶段推上到理论阶段。他在讲演中指出:“如果我们接受基本物质是由原子构成的,那么我们就不可避免地得出结论:电不论正负,也被划分为有限的基本部分,其行为宛如电原子”^[12]。

值得注意的是,这次讲演名义上是为了纪念法拉第,时间选在法拉第电磁感应定律发现的半个世纪后,而实质上是用原子论的思想来补充法拉第的理论,特别是他在1834年发现的电解定律^[12]。在引入原子概念后的法拉第定律变成了定量的形式。从此,人们对于法拉第常数特别感兴趣,因为它表示用多少电量析出一克当量的元素。对于氢,则等于氢离子的荷质比。这就是引导化学家和物理学家研究电的基本单位的线索。

其实，一些人早就怀疑化合价与某种基本电实体存在联系，爱尔兰物理学家 J. Stoney 称这种未知电实体为“电的自然单位”，并在 1874 年把它估计为 3×10^{-10} esu (静电单位) 电量。1891 年，他就在电子发现之前把“电的自然单位”定义为“电子”。不过，他的思想仍处于“电原子”的阶段，他定义的“电子”只不过是“以每价结合于化学原子之中”的电量，即一价离子的电量，“它们不能从原子上移走，但是它们在原子进行化学结合后则能隐蔽起来。”^[13]

那么，是谁突破了“原子不可分”的框架，把“电原子”概念引向亚原子阶段的呢？在理论方面，功劳属于荷兰物理学家洛伦兹；在实验方面，英籍德国物理学家 Sir Arthur Schuster、荷兰物理学家塞曼和德国物理学家 E. Wiechert 等人的贡献不可忽视。

从 1875 年起，洛伦兹就着手将超距论电动力学中的合理成分引进电磁场论，以建立有源场论，达到解释麦克斯韦解释不了的光的反射、折射等问题，经过十几年努力，取得了超出他原来愿望的结果，创立了电子论 (1892)。虽然，当时还未发现电子，但是他预言在物质中有一种质量比原子轻的电粒子，它们振动时便形成光源，当它们受光照 (即受电磁场作用) 时也会产生新的光源。他成功解释了光的反射、折射，以及金属对电磁波的吸收等现象，从而在理论上肯定了这种亚原子的电粒子存在的必要性和可能性。

从实验方面较早发现“电原子”是一种更小的物质实体的人是 Schuster，他在 1890 年最先用磁场偏转阴极射线的方法测得“电原子”的荷质比是氮离子的 500 倍。^[14] 这就表明，“电原子”的质量很可能比原子轻。更有说明力的是塞曼在 1896 年发现的磁场分裂钠 D 线的现象。他根据光谱线劈裂的宽度，计算出产生光谱线的振荡电粒子的荷质比是氢离子的 1000 倍。^[14] 导致荷质比大，有两种可能情况，一是质量小，二是电荷大。很显然，只有第一种可能才成立，要产生极高速振荡而形成光源只有质量比原子小许多倍的电粒子才能做得到。遗憾的是，塞曼

的论文一直拖到 1897 年 5 月才发表，那时 J. J. 汤姆孙已经做过了测量电子荷质比的第一次实验 (1897 年 4 月)。在这以前，Wiechert 用磁场偏转法测量过电子荷质比，他在 1897 年 1 月 7 日在孔尼斯堡科学和经济学会会上宣读了实验报告。现在很少有人还记得他的工作。J. J. 汤姆孙的儿子 G. 汤姆孙后来在 1967 年发表的一篇题为“The Septuagenarian Electron”的文章中提到了他，认为 Wiechert 的工作“应当接受比它以往所接受的更多的荣誉”^[15]。

五、J. J. 汤姆孙测量电子的 m/e

1897 年初，汤姆孙开始测量阴极射线电粒子的质荷比。他的第一个实验是在法国物理学家 J. Perrin 的工作的基础上进行的。Perrin 在 1895 年做了一个特殊的阴极射线管，阳极是两个同轴开口金属筒，他用它来证明从阴极射出的电粒子带有负电。汤姆孙对它稍作了改进，即在筒内插入热电偶，并在管的左半部分装上一个线圈。这样，阴极射线的负电由开口筒收集，而热电偶将电粒子的动量化为热量，通过热功当量计算来证明这些粒子的性质，再运用一系列变换计算出 e/m 或 m/e 。实验装置如图 4 所示。

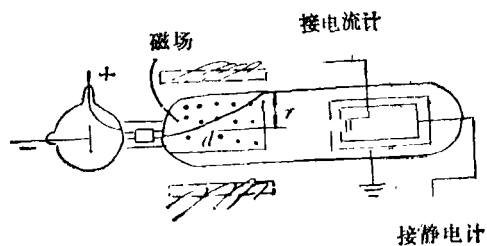


图 4^[11]

这个实验分三步完成^[16]。第一步：通过静电计测量一定时间内阳极筒获得的电量 $Q = ne$ 。第二步：插入热电偶，经过同样时间后读出温升。靶子所获得的能量 $W = \frac{1}{2} nmV^2$ ， m 和 V 分别为电子质量和速度。第三步：加上磁

场,算出电子曲率半径 $2\rho = \frac{d^2}{r} + r$ (根据图 5). 另外,用洛伦兹公式得到 $\rho = mV/eH$. 后一关系引出了 e/m . 这样就可以得到

$$\frac{e}{m} = 2W/QH\rho^2,$$

$$V = 2W/QH\rho,$$

此处 Q, H, W 和 ρ 都是观察值. 汤姆孙由此算出 e/m 介于 10^7 至 3.1×10^7 之间, 电子速度介于 2.3×10^4 至 4.4×10^4 km/s 之间. 他观测的

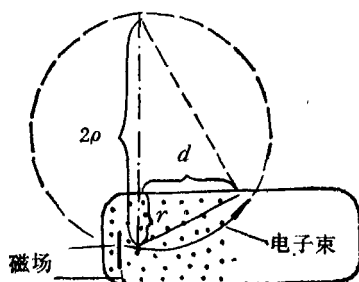


图 5^[13]

电子荷质比是氢离子的 1000—3000 倍, 误差范围较大, 原因是牵涉到的量太多, 每个量的误差累计起来就大得惊人. 不过, 这个实验的确证明电子具有质量, 而不是虚无缥缈的“以太云”. 这就迫使 Lenard 作了有限的让步. 他说: “这里我们有了存在个别以太云的证据, 是至今才发现的, 它单独运动, 具有(惯性)质量, 看来象与电荷的载体是相同的”^[17]

汤姆孙还用第二种方法——电场和磁场偏转方法测量了 m/e . 他所用的阴极射线管如图 6 所示. 如将电场力和磁场力调节到同样大小, 电子将不被偏转而直接打在荧光屏正中央. 根据洛伦兹公式, 电子速度 $V = E/H$, 其中 E 和 H 分别表示电场强度和磁场强度. 在完成两场平衡调节后, 撤去磁场. 这时电子受电场作用向下偏转, 在离开电场范围时获得了向下的

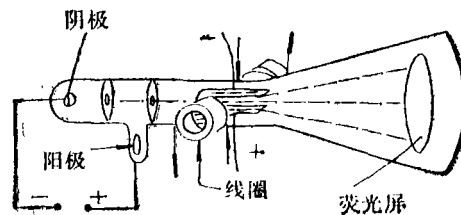


图 6^[13]

速度 $\frac{eE}{m} \cdot \frac{l}{V}$ (V 在这里仍是水平速度, 其值保持不变), 此后它们便以夹角 $\theta = \frac{eE}{m} \cdot \frac{l}{V^2}$ 的方向直射荧光屏. 汤姆孙根据这个关系和上述 $V = E/H$, 得到

$$\frac{m}{e} = \frac{H^2 l}{E\theta}.$$

汤姆孙先后用空气、氢气和二氧化碳气体作射线管的剩余气体, 测出各组参数并计算出各次实验的结果, 如表 1 所示.

表 1*

| | θ | H | E | l | m/e | V |
|------|----------|-----|----------------------|-----|----------------------|-------------------|
| 空气 | 8/110 | 5.5 | 1.5×10^{10} | 5 | 1.3×10^{-7} | 2.8×10^9 |
| 空气 | 9.5/110 | 5.4 | 1.5×10^{10} | 5 | 1.1×10^{-7} | 2.8×10^9 |
| 氢气 | 9/110 | 6.3 | 1.5×10^{10} | 5 | 1.5×10^{-7} | 2.5×10^9 |
| 二氧化碳 | 11/110 | 6.9 | 1.5×10^{10} | 5 | 1.5×10^{-7} | 2.2×10^9 |
| 空气 | 6/110 | 5 | 1.5×10^{10} | 5 | 1.3×10^{-7} | 3.6×10^9 |
| 空气 | 7/110 | 3.6 | 1×10^{10} | 5 | 1.1×10^{-7} | 2.8×10^9 |
| 空气 | 13/110 | 6.6 | 1.5×10^{10} | 5 | 1.2×10^{-7} | 2.3×10^9 |

* 此表中使用电磁单位

由表中数据看, 测量结果基本上不受剩余气体的性质的影响。我们知道, 氢离子的质荷比大约是 10^{-4} (即 $\frac{M_H}{e_H} = \frac{1}{9649.4}$), 汤姆孙观测到的电子质荷比介于 1.1×10^{-7} 至 1.5×10^{-7} 之间, 也就是说, 用化学方法测量的氢离子的质荷比是他测量的电子质荷比的 666—909 倍。而实际上这两种荷电体的质荷比相差 1837 倍。显然汤姆孙的测量结果至少偏大了一倍。这是测量误差引起的还是计算错误引起的, 现在很难说清。不过, 如果在上述公式右边分母乘以 2, 那么汤姆孙的测量结果就大致与实际情况符合了。这并不是凑数, 如果我们考虑电场的影响范围并不局于电极板之间, 并运用牛顿第二定律 ($a = \frac{eE}{m}$) 和运动方程 $\theta l = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m} \left(\frac{l}{V}\right)^2$, 似乎可推导出

$$\frac{m}{e} = \frac{H^2 l}{2E\theta}$$

我们这里假设 θ 极小, 是符合汤姆孙观测的。如果采用这个公式计算, 氢离子的质荷比就介于汤姆孙观测的电子质荷比的 1330—1818 倍之间, 较能符合实际情况。如果把误差大部分归因于相对论效应, 则似乎不可能, 因为电子在管中的速度还仅仅是光速的十分之一, 这样的速度不可能引起严重误差。

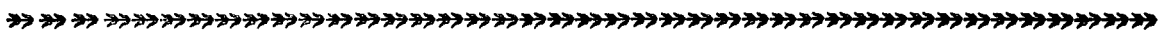
我们在这篇论文里讨论了由阴极射线的发现到电子发现的过程。虽然汤姆孙的工作仅仅

是揭开了测量电子的实验史的序幕, 但是把电子作为一种亚原子实体并对之进行精密的观测的功劳首先应归功于他。在这以后, 他和其他一些物理学家, 特别是美国的密立根对电子电量和质量进行了长期观测, 把电子电量的测量当作了物理学的一个基本常数的测量, 其历史地位不亚于光速的测量。关于这个问题拟另文讨论。

本文得到李国栋先生的帮助, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] T. W. Chalmers, *Historic Researches in Physical Scienc*, Morgan Brothers, London, (1949).
- [2] J. W. Hittorf, *Annalen der Physik und Chemic*, 126 (1869), 1.
- [3] W. Crookes, *Chemical News*, 40 (1879), 130
- [4] H. Hertz, *Annalen der Physik*, 31 (1887), 983.
- [5] W. Hallwachs, *Annalen der Physik*, 33(1888), 301.
- [6] N. N. de V. Heathecote, *Nobel Prize Winners in Physics. 1901—1950*, Henry Schuman, New York, (1953), 39.
- [7] B. R. Wheaton, *Hist. Stud. Phys. Scis.*, 9 (1978), 303.
- [8] A. Schuster, *The Progress of Physics*, Cambridge University Press, (1911), 77.
- [9] M. Faraday, *Phil. Trans.*, 129 (1838), 1, 125.
- [10] 宋德生, *物理*, 11-6(1982), 378, 351.
- [11] 宋德生, *自然杂志*, 5-5(1982), 377.
- [12] H. von Helmholtz, *Jour. Chem. Soc.*, 39(1881), 277.
- [13] J. Stoney, *Sci. Trans. Royal Dublin Soc.*, 4 (1891), 583.
- [14] P. Zeeman, *Phil. Mag.*, 43 (1897), 226.
- [15] G. Thomson, *Physics Today*, May (1967), 56.
- [16] J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, 44 (1897), 293.
- [17] P. Lenard, *Annalen der Physik*, 64 (1897), 289.



1987 年第 6 期《物理》内容预告

扫描隧道显微镜(汪世才); X 光激光器(任国光); 远红外激光磁共振(邱明新); 嵌段共聚物微相分离的统计热力学(谢涵坤); 使用星载红外分光计在全球探测大气温度廓线(张肇先); 用光学方法产生随机数的蒙特-卡罗计算(汤清等); 正电子计算机断层图的原理及其在现代医学中的应用(陈惟昌); 同位素示踪技术

在农业科学中的应用(李京淑); 超晶格结构的离子束沟道分析(潘传康等); 热释电红外探测器的原理与特性(刘正飞); 穆斯堡尔谱仪的中温热扫描技术(许桂琴等); 应用微机测量 RLC 音频电路相频特性的实验(邹书文); 介绍三位苏联物理学家(徐载通); 激光稳频技术的最新发展(1)(屠世谷等)。