

# 理查孙和热电子发射定律的发现<sup>1)</sup>

郭奕玲

(清华大学现代应用物理系)

1990年是英国著名物理学家理查孙(Owen W. Richardson, 1879—1959)诞生111周年,也是他逝世41周年。他是热离子学(thermionics)的创始人之一,以发现热电子发射定律即理查孙定律而闻名于世。由于这一贡献,他获得了1928年诺贝尔奖金物理学奖。

## 一、历史概述

热离子现象可以溯源到二百多年前,那时人们已经知道,灼热物体附近的空气会失去绝缘性能而导电。1725年, Du Fay 就注意到了这一现象,后经 Du Tour (1745年), Watson (1746年)、J. Priestley (1767年), Cavallo (1785年)不断进行观察,积累了许多这方面的资料。1853年 A.C. Becquerel 证明,白热状态下的空气只需几伏电压就可以导电;1881年, Blondlot 进一步肯定了上述结论,并证明即使电压低到1/1000V,白热状态的空气也不能保持绝缘。后来,研究者转向灼热物体对空气导电的影响,致力于追寻这一影响的根源。1873年, F. Guthrie 让加热的铁球带电,发现红热的铁球能保留负电,却不能保留正电,白热的铁球既不能保留负电,也不能保留正电。J. Elster 和 F. Geitel 在1882—1889年进行了一系列实验研究,检测了在不同压强下各种气体中靠近各种热丝的绝缘金属板所聚集的电荷,得到一条结论:在温度低、气压高的状态下,金属板带正电;在温度高、气压低的状态下,金属板带负电。

此时发明家爱迪生正在研究电灯泡。他在灯泡中靠近灯丝的地方装上一块金属片,发现当金属片经电流计同灯丝电源的正极接通时,电流计的指针偏转,显示有电流从灯丝越过空

间到达金属片。这就是所谓的爱迪生效应。但在当时爱迪生并没有搞清楚这一电流的本质。

1897年,汤姆孙(J.J. Thomson)通过阴极射线荷质比 $e/m$ 的测量发现了电子。1899年,他进一步研究了爱迪生效应中越过空间的电流,用磁偏法测出其荷质比,证实这种电流也是由电子组成。第二年,他的学生 McClelland 指出,只要周围气体的压强足够低,从带负电的铂丝放出的电流几乎不受气体性质和压强变化的影响,这种影响即使有也极小。这些结果引起了汤姆孙另一名年轻学生的极大兴趣。他就是理查孙。在导师的鼓励下,他热情地投身于这项研究中。

## 二、理查孙的生平

理查孙出生在工业器材经销商的家庭,从小就显露天赋,12岁在中学以优异成绩获奖学金,赢得过多项竞赛,1897年靠奖学金进入剑桥大学三一学院,在汤姆孙领导的卡文迪许实验室学习。这一年正值汤姆孙发现电子。1900年,理查孙大学毕业,由于他对热离子学的积极钻研,学校留他在卡文迪许实验室继续研究。他的工作富于创造性,既认真实验,也注重理论。1901年,他在剑桥哲学学会上宣读了两篇论文,第一次提出了热离子遵守的规律,受到同行的好评。1902年,理查孙被推选为三一学院委员(fellow),1906年,27岁的理查孙应邀赴美,到普林斯顿大学任物理学教授,在那里继续开展热离子学的研究。热离子学(thermionics)这个词就是他在1909年作为论文题目新提出的<sup>1)</sup>。理查孙给研究生讲课的讲稿于1914年出版,书名为《物质的电子论》,后来成为对电子

1) 此文于1989年投本刊。——编者注

学和无线电有兴趣的学生学习的主要课本。受他指导的研究生中有 K.T. 康普顿和 A.H. 康普顿两兄弟。A. H. 康普顿以发现“康普顿效应”获 1927 年诺贝尔奖金物理学奖。他的另一位研究生 C. J. Davisson 因发现电子衍射获 1937 年诺贝尔奖金物理学奖。里查孙把英国剑桥大学卡文迪许实验室的作风带到美国,对美国的科学研究和人才培养有广泛影响。

里查孙于 1913 年回到英国, 历任国王学院、伦敦大学物理学教授, 英国协会 A 部主席 (1921 年), 伦敦物理学会主席 (1926—1928 年), 1939 年受封为爵士。1914 年以后, 他除了继续研究热离子学外, 还研究光电效应、磁学、化学作用引起的电子发射、电子论、量子论、氢分子光谱、软 X 射线和氢谱  $H_{\alpha}$  及氦谱  $D_{\alpha}$  的精细结构。他早年 (1907—1909 年) 就做过热电子发射对麦克斯韦分子速度分布律的实验验证。后于 1917 年指导中国研究生丁燮林(丁西林) 进一步研究这个课题。丁燮林的论文发表于 1921 年。这是分子束方法尚未提出之前唯一可行的实验验证方法, 有一定理论价值。

在第二次世界大战期间, 里查孙致力于雷达、声纳、电子检测仪器以及磁控管, 速调管等项目的研究。他的科学活动和无线电电子学紧密相联、不断促进无线电电子学的发展。他不愧为热离子学(热阴极电子学)的创始人。

### 三、里查孙发现热电子发射定律

里查孙从 1900 年起投身于热离子现象的研究, 前后历时十余年。他一方面不屈不挠地从事实验工作, 另一方面还下很大功夫进行理论分析。摆在里查孙面前的是十分复杂的现象。如果没有理论指导, 就只能停留在表面现象, 难以探讨事物的本质; 如果不掌握精确的数据资料, 再好的理论也得不到证实。前人的研究成果固然提供了许多有用的依据, 但也充斥着形形色色的说法。

例如有人认为热离子现象是以太行为的某种表现。有的把气体导电现象归因于以太。也

有人认为不同的材料有不同的属性, 因而发出不同的电荷。还有人认为这是一种化学效应, 是由于热体和周围的气体分子相互作用的结果。

21 岁的里查孙从导师汤姆孙和学长 McClelland 的实验结果得到启示, 判定只要尽量抽成真空, 排除残余气体, 然后直接研究饱和电流, 就有可能抓住事物的本质。

关于实验工作的困难, 从里查孙 1929 年的诺贝尔领奖词中可以窥见一二, 他说<sup>[2]</sup>:

“我认识到, 要取得进展, 最好的办法是避免由于气体在场的复杂性, 尽可能搞清楚气体效应排除之后会出现什么情况”。

“本世纪之初解决这个问题不象现在这样容易。主要是由于这个现象在技术上的重要性, 从那时起抽气工艺已大大地发展了。当年只有靠手摇泵抽气。由于热丝给器壁和其它部分加热会产生无休止的放气, 抽气是一件最厌烦的操作。我常常连续几个星期给管中金属丝加热, 来保证观察到的电流稳定, 并保证这个电流与残余气体无关”。

他的真空管里装有铂丝, 铂丝周围是一金属筒作为阳极, 电极间加足够强的电场。温度从铂丝的电阻变化可以算出。改变铂丝温度  $T$  测不同温度时发射的饱和电流  $i$ , 得到的  $\ln i - \frac{1}{T}$  曲线可以看成是直线, 证明  $i$  和  $T$  的关系大概是指数关系。

但是要获得严格的函数关系光靠实验是不够的。里查孙坚信热丝周围的电荷主要是从热丝内部由于热运动逸出的自由电子, 而不是什么以太效应, 这可从汤姆孙的荷质比实验得到证明。把这些电子看成是电子气, 就有可能象分子运动论处理理想气体一样推出饱和电流随温度变化的公式。

里查孙推导这一公式的基本思想是: 在热金属体内部充有大量自由运动的电子, 当电子到达金属表面时, 如果和表面垂直的速度分量所决定的动能大于逸出功  $W$ , 这个电子就有可能逸出金属表面, 而电子的速度分布遵循麦克

斯韦-玻耳兹曼分布律。经过计算得出

$$i = AT^{1/2}\exp(-W/kT), \quad (1)$$

式中  $i$  是热体发出的饱和电流密度,  $k$  是玻耳兹曼常数,  $A$  是与材料有关的系数。里查孙的实验数据表明, 理论与实验符合甚好。这就是 1901 年里查孙宣读论文的基本内容。

里查孙进一步研究在热体周围的正离子。他通过大量实验终于搞清楚, 正离子的产生非常复杂, 有的是电极本身在加热时发出的, 有的是杂质引起的, 有的确是由于加热电极与周围气体之间的相互作用。他证实这些正离子和负电子一样, 也遵循同样的规律, 即  $i = aT^{1/2}\exp(-b/T)$ , 其中  $a$  和  $b$  也是两个待定的系数。里查孙还发现固体样品在第一次加热时总要先发射大量正离子, 形成瞬态电流, 去掉杂质后, 才开始稳定地发射正离子。瞬态电流显然是由杂质引起的, 稳态电流才是由电极本身材料产生的正离子组成的。

为了检验 (1) 式所依据的基本前提是否正确, 里查孙提出两条途径:

一条途径是如果电子确实是依靠克服了逸出功  $W$  的动能而从热体逸出, 则热体必然会由于这个过程而降温。为此里查孙于 1903 年作了计算。1909 年, A. Wehnelt 和 F. Jentsch 首次实验证实, 不过数值与理论不符。1915 年里查孙和 H.L. Cooke 合作, 改进实验方法, 终于确证理论的正确<sup>[1]</sup>。

另一途径是其逆过程。里查孙提出, 如果电子束从外部流进导体, 则导体应发热, 热量既与温度无关, 也与驱动电子流的电位差无关。1910—1911 年, 里查孙和 H.L. Cooke 的实验对此也作了肯定的证明<sup>[2]</sup>。

直到 1913 年, 还有人热电子发射的理论表示怀疑, 总认为这不是物理问题, 而是化学问题, 是由于热体与周围气体产生化学作用的某种二次过程。1913 年, 里查孙用压延性良好的钨代替铂充当热丝, 有了更好的真空条件, 产生大得多的发射电流。他证明发射出来的电子所具有的质量大大超过可能消耗掉的化学物品的质量总和, 于是以确凿的事实令人信服地作出

了判断。

1911 年, 里查孙用热力学方法对热电子发射公式进行了严格推导, 在推导中考虑到电子对金属比热不作贡献的事实, 得出下式:

$$i = A'T^2\exp(-W'/kT), \quad (2)$$

其中  $A', W'$  是两个有别于  $A, W$  的系数, 不过它们之间可以互相推算。

(1) 式与  $T^{1/2}$  有关, (2) 式与  $T^2$  有关。里查孙认为 (2) 式可取, 因为它具有更好的理论基础。两个公式都在误差范围内与实验相符, 无法用实验作出判决。

1915 年, 里查孙证明 (2) 式中的  $A'$  是与材料无关的普适常数, 于是更显示出 (2) 式的优越。1923 年, S. Dushman 推导出下式:

$$A' = \frac{2\pi me k}{k^3} = 60.2 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{deg}^2.$$

此式基本上与实验相符。

后来, 量子力学发展了。令人惊奇的是, 1911 年里查孙提出的第二个热电子发射公式竟经受住了量子理论的考验。1927—1928 年, 泡利和索末菲把费米-狄拉克量子统计分布用于金属电子运动, 推出的热电子发射公式和里查孙的 (2) 式完全一致。

里查孙研究热电子发射规律的工作对无线电电子学的发展有深远影响, 因为不论是早期的二极管和三极管, 还是后来的 X 射线管、电子显象管、磁控管和速调管, 都离不开发射电子的热阴极。要使这些器件能够高效率、长寿命地工作, 关键在于设计合理的电子发射机构。里查孙定律为此指明了道路。这一事例又一次证明了基础研究对科学技术的重要意义。

我们纪念里查孙, 应该学习他对理论和实验并重的研究风格, 这一点也许是值得特别提出的。

[1] O.W. Richardson, *Phil. Mag.*, **17**(1909), 813.

[2] Nobel Lectures, Physics (1922—1941), Elsevier, (1965), 224.

[3] O.W. Richardson, and H.L. Cooke, *Phil. Mag.*, **25**(1915), 624.

[4] O.W. Richardson, and H.L. Cooke, *Phil. Mag.*, **20**(1910), 173; **21**(1911), 404.