

阳射线研究简史

肖 明

(湖北教育学院物理系, 武汉 430060)

杨 建 邨

(华中理工大学物理系, 武汉 430074)

人们在回顾气体放电研究的历史时, 对阴极射线作过详尽的探讨, 但对阳射线 (positive rays) 研究的历史, 却很少有人注意。实际上, 这段鲜为人知的历史, 对原子物理学的进展, 有着极为重要的意义。本文所讨论的正是这项研究的简要历史。

一、阳射线的早期研究

1886年, 德国物理学家戈德斯坦 (E. Goldstein, 1850—1930) 首次在气体放电管中观察到一种现象: 在开有小孔的阴极板之后, 有一条由阳极向阴极方向运动的射线。他形象地称之为极隧射线 (kanalstrahlen)。让射线穿过磁场, 戈德斯坦没有发现射线有明显的偏转现象发生^[1]。

到了1898年, 德国物理学家维恩 (W. Wien, 1864—1928) 成功地使极隧射线发生了电偏转和磁偏转。他的实验表明, 射线带正电, 其速度为 $3.6 \times 10^7 \text{cm/s}$ 。根据估算出的荷质比 (e/m), 维恩认为, 射线是由带正电荷的气体原子或分子组成的^[2]。

同年, 维恩还专门设计了一个实验, 想以此来精确地测定射线的荷质比。其实验原理是: 让一束准直的射线穿过含有同向电场和磁场的偏转区, 经偏转作用后射到屏上, 射线的飞行方向垂直于场方向。由原理分析可知, 在屏上应能观察到一些分立的抛物线, 每条抛物线对应于一个特定的 e/m 值。

由于维恩实验管中的压强太高, 他未能观察到预期的抛物线^[3]。几年之后, J. J. 汤姆孙 (J. J. Thomson, 1856—1940) 继承了维恩的

抛物线方法, 并作了重要的改进。

二、J. J. 汤姆孙对阳射线的研究

由于极隧射线带正电荷, 汤姆孙于1907年就称它为阳射线。本文从这节开始, 不再使用极隧射线这个旧名称了。

1. J. J. 汤姆孙研究阳射线的目的

1903—1905年期间, 汤姆孙提出了原子的“葡萄干面包模型”。根据该模型, 原子中所有的电子占有原子质量的绝大部分, 而原子中的正电荷则几乎没有质量。因此, 一个原子量为 A 的原子所包含的电子数大约是 $1000A$ 。汤姆孙于1906年提出了三种计算方法, 来进一步确定原子内的电子数。但算出的结果却是: 原子中的电子数与其原子量有相近的数量级^[4]。这与汤姆孙原先的设想大相径庭。汤姆孙的旧原子模型受到了严重的挑战。汤姆孙开始认识到原子中的正电部分必定携带着原子的绝大多数质量, 而电子则恰恰相反。从此, 他开始着手研究阳射线, 并认为, 阳射线是“认识正电本质最有希望的研究对象”^[5]。

2. 实验方法与原理分析

与维恩的方法基本相同, 汤姆孙所采用的实验方法也是抛物线方法。

让射线沿 Z 轴方向运动, 电场和磁场方向沿 X 轴方向 (见图1), 射线在屏上的偏转为

$$\begin{aligned} x &= (Ee/2mv^2)(l+d)^2 \\ &= Ae/mv^2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y &= (e/mv) \int dz \int Hdz \\ &= Be/mv, \end{aligned} \quad (2)$$

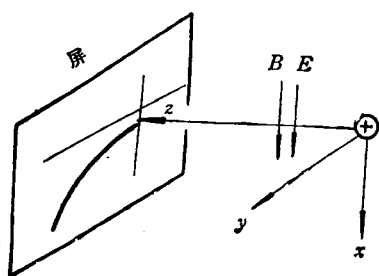


图1 实验原理示意图

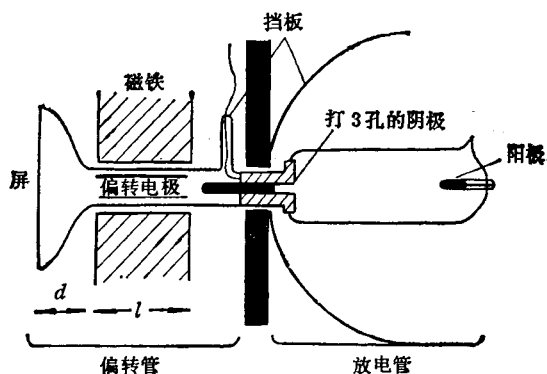


图2 实验装置剖面图

x, y 分别为电偏转和磁偏转, l, d 如图2所示, A, B 为常数, v 为阳射线的速度。

由(1)式和(2)式可得

$$y^2 = Bxe/Am, \quad (3)$$

$$y = (B/A)vx. \quad (4)$$

由(3)式可知, 若阳射线的 e/m 值是一个常数, 而射线速度值取若干数值, 则射线在屏上就会造成一条抛物线的径迹。一条抛物线对应于一个 e/m 值。由(4)式可知, 若射线的速度恒定, 而 e/m 取各种数值, 则射线在屏上就会造成一条直线条纹。一条直线条纹对应于一个速率。

3. 实验的三个阶段

汤姆孙早在1905年就开始了阳射线的实验, 但在1910年以前, 他从未观察到一条真正清晰的抛物线。幸运的是从那以后, 他邀请年轻的物理学家阿斯顿 (F. W. Aston, 1877—1945), 与他共同研究阳射线。在阿斯顿的敦促下, 汤姆孙才对实验作了一系列的改进, 从而为阳射线的研究带来了重大的进展^[6]。下面我们将汤姆孙的整个研究工作分为三个阶段来进行讨论。

(1) 1906—1910年时期

实验初期, 为了探测到阳射线的径迹, 汤姆孙采用硅酸锌作为荧光物质。但不幸的是, 硅酸锌虽能产生很强的荧光, 但它只对轻离子敏感, 而对重离子不敏感。正是由于这个缺陷和其他方面的原因, 汤姆孙只是在屏上观测到一些直条纹, 而根本没有观察到抛物线。

汤姆孙观测到两条清晰的直条纹, 通过计算, 这两条直条纹端点所对应的 e/m 值分别是 10^4 和 $\frac{1}{2} \times 10^4$ 。对于前者, 他认为应是氢离子

(H^+) 的; 对于后者, 则应是 α 粒子的。汤姆孙就此作了一个了不起的结论: H^+ 离子是正电的基本单元 (fundamental units)。由于受自己原子理论的制约, 汤姆孙不可能意识到这个结论的潜在意义, 因而没有深入地研究 H^+ 离子。

(2) 1910—1912年时期

这是汤姆孙研究的重大转折时期。这时, 他得到了阿斯顿的帮助, 并对实验仪器作了两项重要的改进。

第一项改进是记录径迹方法的革新。汤姆孙最初是利用墨汁描下屏上的径迹的, 这种简陋的方法显然不利于精确的测量。后来, 他又采用照相法, 但这常常需要几个小时的曝光, 也不甚理想。1910年秋, 他和阿斯顿将照相底片直接放入偏转管中, 代替了荧光屏。这是一项关键性的改进, 它克服了以前记录径迹方面的种种毛病。但是, 仅此改进仍然是不够的。照相底片法虽能增进记录上的灵敏度, 但它无法系统地增加记录的清晰度和精确度。因此, 还必须作出其他方面的改进。

第二项改进是把偏转管和放电管隔离起来。在早期的实验探索中, 汤姆孙就逐渐认识到, 要想在屏上得到清晰的抛物线, 理应降低偏转管中的压强和放电管中的放电电势。但在1910年以前, 他从未认真而系统地实施过。

1910年9月, 汤姆孙和阿斯顿一起把放电管与偏转管严格地隔离开来, 只让阳射线能够从准直的、狭窄的隧道中通过。这样, 既可以使

偏转管保持高真空度，又可以使放电管保持一个适于放电的、不太低的压强(见图2)。

在以上两项主要的改进实施后，汤姆孙才第一次在屏上探测到各种气体所对应的抛物线。汤姆孙高兴地发现，阳射线的实验“可能为分析放电管中的气体、测定其原子量提供一种有价值的方法”^[7]。

(3) 1912—1914年时期

1912年以后，汤姆孙开始对阳射线进行定量观测，并把大部分精力奉献给气体成分的分析。他曾风趣地说：“只要摄一张阳射线的照片，我就能一眼看出放电管里充的是什么气体。”^[8]但是，事实并非他想象的那么简单。

1912年，汤姆孙一个意外的发现使他感到非常惊诧和疑惑。正如他在一篇论文中写道：

“……在照片上，我们发现了氦、氩(很强)、氩的曲线，此外还有一条曲线，对应的原子量为22，它和任何已知气体造成的曲线都不一致。我首先想，这条曲线由于它的原子量是 CO_2 的一半，一定是带双重电荷的碳酸分子引起的，在某些底片上可以看到相应于44的暗弱曲线。但是，如果让气体慢慢通过浸在液化空气中的管子以后，则44处的曲线消失了，而22处的那一条曲线，亮度却不受影响。”

“……如果我们承认门捷列夫周期律，我们也没有任何位置安放原子量为22的新元素。”^[9]

在这种无可奈何的情况下，汤姆孙只好大胆地猜想：这条曲线对应的也许是 NeH_2^+ 离子。但是，自然界中似乎并不存在 NeH_2 这种气体。汤姆孙又试探性地提出一个假设，在氦的原子量附近，可能有一组(两个或更多个)元素具有相似的性质，这就是说，原子量为22的气体有可能是氦的一种同位素。但好景不长，过了几个月他又否定了本来是很正确的同位素假设。汤姆孙从此陷入了歧途。这大概与他1913年提出的放射性同位素理论有关。根据这个理论，所有同位素的原子量之差只能是 $4n(n=1, 2, \dots)$ 或者 $4n+3(n=0, 1, 2, \dots)$ ^[10]汤姆孙完全没有料到，他所观测到的原子量为22的气体原子，却是首例被发现的非放射性的同位素。

物理

迟至1921年，汤姆孙仍坚持 NeH_2 的解释。

我们在前面已经说过，汤姆孙研究阳射线的目的是“认识正电本质”。到1914年前后，大约他认为对阳射线的研究不可能达到这个目的，因此对它逐渐失去了兴趣。实际上，他在阳射线研究中的一些发现，与原子结构大有关系。阿斯顿的后续研究充分证明了这一点。

与汤姆孙大不相同，阿斯顿一开始就认为 NeH_2 的解释必定不对，而用氦的同位素 Ne^{22} 来解释是正确的。他的这个观点未能赢得汤姆孙的赞许。但他并没有因为汤姆孙的巨大威望而放弃它。相反，他要进一步证实自己的意见是正确的。汤姆孙的提示(若存在 Ne^{22} ，就应想办法把它分离出来)启发了阿斯顿，促使他决心走汤姆孙未走完的路。起先，阿斯顿采用分馏法，没有得到预期的结果。后来，他改用扩散法，立刻取得了肯定但还不能算是结论性的成果。

1919年，阿斯顿发明了质谱仪。有了质谱仪，分离同位素就是轻而易举的事情了。阿斯顿不仅证实了 Ne^{22} 元素的存在，而且还发现了其他的211种稳定同位素。

在回首这段往事时，阿斯顿深有感触的说：“J. J. 汤姆孙教授无疑是现代物理、化学方面的权威学者。今日科学界的后起之秀大多是他的高足，我也是他的学生。我永远忘不了这位老师，但当发现他在学术上有错误时，我应该纠正他的错误，即使我不这样做，后人也会发现他的错误的。”^[11]

1922年，阿斯顿由于杰出的科学成就，荣获了诺贝尔化学奖。J. J. 汤姆孙功亏一篑。但是，他的功劳是不可埋没的。正如特里格(G. L. Trigg)所说：“阿斯顿确证……氦有两个(实在是三个)变种或同位素。阿斯顿继续证明大多数元素都有不止一种同位素，并且高度精确地测定了它们的质量。但是归根到底，推动力都来自汤姆孙放电管中那条多出来的抛物线。”^[12]

从阳射线的发现，到阿斯顿发明质谱仪，阳射线的研究经历了30多年的风风雨雨。这项研究的重要成就就是发现了第一个稳定的同位素

Ne²², 并且诱发出的一系列稳定同位素的发现,为解决元素周期表当时面临的困难(例如原子量都是非整数),作出了不朽的贡献。人们终于使一个世纪以前就提出的普劳特假说又获得了新生。

就 J.J. 汤姆孙原来设计的直接目标来说,阳射线的研究似乎没有获得很有价值的成果。但是,它却意想不到地在化学领域中开花结果,大大推动了化学的发展,并在化学史上写下了光辉的篇章。这是科学研究中各门学科相互渗透、相互促进的一个极好范例。

在这里,我们还想谈一谈 J. J. 汤姆孙在阳射线中表现出的思想方法。像大多数老一辈英国物理学家一样,汤姆孙所采取的理论方法一般都是机械类比,更确切地说,是一种流体力学的类比。虽然他也对某些模型作一些定量分析,但一般说来,他仍倾向用定性的直观的方法来使用它们。他不太关心模型和实验之间的精确的定量关系,也很少关注理论如何与实验相调谐。他往往习惯于用很少的实验去作大量、自由的推测。他认为,具有潜在价值的理论不必精确地对应于实验;对应于同一现象的几个模型可以同时被采纳,因为还不知道哪一个模型是正确的。于是,在汤姆孙那儿,模型和实验只具有一种松散的联系。正是在这种思想指导下,他常常喜欢实验给出直观的结果,而不大重视仪表的读数。在求助于定量实验中,他不轻易牺牲直观的可见性。例如,1912年,汤姆孙在对阳射线作定量实验时,曾一度用法拉第圆筒代替照相底片。尽管这一实验很成功,也获得了

许多颇有理论价值的数,但他很快又回到利用照相底片来直观地观察阳射线。

汤姆孙曾经说:“从物理学家的观点来看,一种物质的理论是一种方针(policy),而不是一种宗教的信条 creed);它的目的是联系和协调各种明显不一样的现象,而且首先是去建议、促进和指导实验。”^[13]这句话是颇有名气的,而且他的许多研究都体现了他的这个观点。忽视精确的测量,将目标定在积累不同的实验结果,这种思想和方法虽曾使 J. J. 汤姆孙作出过一些著名的发现,但也同样使他错过一些绝佳的机会。阿斯顿发现了汤姆孙的这个缺点,于是他把握了机会,作出了本可能由汤姆孙作出的伟大发现。应该说,越是到远离直接知觉的复杂领域(如微观、宇观),汤姆孙的方法就越是捉襟见肘。

- [1] 威·弗·马吉,物理学原著选读,商务印书馆,(1986),597—599.
- [2] Ref [1],619—621.
- [3] F. L. Friedman and L. Sartori, *The Classical Atom*, Addison-Wesley, (1965), 60.
- [4] J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, **11**(1906), 769—781.
- [5] J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, **13** (1907), 561—575.
- [6] I. Falconer, *HSPS.*, Vol. 18, Part 2, p. 266.
- [7] J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, **20** (1910), 758.
- [8] G. L. 特里格,二十世纪物理学的重要实验,科学出版社,(1982),21.
- [9] J. J. Thomson, *Proc. Roy. Inst.*, **20**(1913), 591.
- [10] J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, **26** (1913),792—799.
- [11] 《诺贝尔奖金获得者传》编委会,诺贝尔奖金获得者传(2),湖南科学技术出版社,(1983),123.
- [12] Ref [8], 23.
- [13] Ref [6], 309.

1994年第11期《物理》内容预告

知识和进展

发现顶夸克的最新证据(李卫国);
分子电子器件简介(游效增等);
新型电子全息术及其进展(寇雷刚等);
硅锗量子阱发光器件的探索(王迅等);
光折变存储器的研究与进展(刘思敏等);
超短脉冲强激光与等离子体非线性相互作用(盛政明等);
用等离子体沉积法生长的纳米硅膜及其物性(韦亚一等).

物理学和经济建设

大亚湾核电站不可能发生切尔诺贝利核电站事故(陈俊衡等);
物理原理在气体检测中的应用(吴孔宝).

实验技术

激光聚变实验测量和诊断技术的新进展——激光间接驱动干净辐射场的建立和诊断(李文洪等).

物理学史和物理学家

长度收缩假说究竟是谁首先提出和发展的?(阎康年).