

## 严谨而精密的创新——瑞利进行研究的特点\*

刘 战 存

(首都师范大学物理系 北京 100037)

**摘 要** 着重介绍了瑞利在测量氮气密度过程中发现惰性气体氩的研究和创新历程,以及瑞利对光学、声学等物理学的各个领域的主要贡献,指出正是严谨求实的科学态度、锲而不舍的钻研精神和以创新为乐趣的事业追求是瑞利一生中取得丰硕的研究成果的主要原因。

**关键词** 瑞利,氩,发现,瑞利干涉仪

### RIGOR AND ACCURACY——HOW LORD RAYLEIGH MADE HIS DISCOVERIES

LIU Zhan-Cun

(The physics department of the Capital Normal University, Beijing 100037)

**Abstract** We recount how Lord Rayleigh brought forth new ideas and discovered the inert gas argon in the process of measuring the density of nitrogen. His contributions to optics, acoustics and other fields of physics are also described. It is pointed out that a rigorous scientific approach and realistic spirit, perseverance, and regarding discovery as a pleasure were the main reasons for Lord Rayleigh's successful scientific achievements.

**Key words** Lord Rayleigh, argon, discovery, Rayleigh's interferometer

## 1 引言

著名的瑞利散射和瑞利判据是每个学过物理学的人所熟知的。瑞利在物理学的多个领域中都作出了他特有的贡献,特别是因发现惰性气体氩而获得了诺贝尔物理奖。本文将介绍他是如何以严谨求实的态度、锲而不舍的精神,注重理论与实验结合进行创新的。

## 2 生平简介

约翰·威廉·斯特拉特,瑞利男爵三世(John William Strutt, Third Baron Rayleigh)1842年11月12日生于英国埃塞克斯郡的一个贵族家庭。他的父亲是第二世男爵约翰·詹姆斯·斯特拉特,因袭父亲爵位,而称为瑞利勋爵。由于身体原因,他的早期教育经常被打断。1861年进入剑桥大学的三一学院攻读数学,逐渐显露出非凡的才华,1865年他通过了高年级的数学学位考试,是一等及格者,次年被选为三一学院大学评议员(Fellow of Trinity College)。他改变了通常毕业后游览欧洲大陆的传统,改为访问美国。1868年他回国时,购买了一套实验装置,充实

家中的实验室。1871年结婚后辞去了工作,准备回特尔灵家中从事研究。不久他患了严重的风湿病,不得不去埃及和希腊度过冬天,在旅途上他开始了《声学原理(The Theory of Sound)》一书的著作。1873年回国后居住在特尔灵家园并继续进行这一工作,同年被选为英国皇家学会会员。1879年第一任剑桥卡文迪什实验物理教授麦克斯韦(James Clerk Maxwell)逝世后,瑞利接替了这一职务,1884年瑞利作为英国先进科学学会主席,在蒙特利尔主持了他第一次在国外召开的年会,使他对美国和加拿大物理学进展有了更多的了解。回国后他立即辞去卡文迪什教授,回到他在特尔灵的实验室。1887—1905年任大英皇家学会教授,履行这一职务,每年在伦敦居住一段时间,并出席他所研究或感兴趣题目的讲演。1885—1896年他继斯托克斯之后被选为皇家学会秘书,1905—1908年任皇家学会会长。他对教育问题有极大的兴趣,自1908年起直到1919年逝世前,还一直担任剑桥大学校长<sup>[1]</sup>。

他在50年的科学生涯中,完成的研究工作量是

\* 2000-03-06收到初稿,2000-04-29修回

惊人的,他的文集中收入了 446 篇论文,还为大英百科全书撰写了光学的有关内容.他的研究几乎涉及 20 世纪初经典物理学的各个领域,做出了许多新的发现和发明,在理论和实验研究中都有许多创新.他在科学上的成就,受到了公众的高度评价,先后被授予 13 个名誉学位,被 50 多个学术团体授予名誉会员或奖励,其中最著名的就是由于发现氩而获得 1904 年诺贝尔物理学奖.

### 3 氩的发现

#### 3.1 实验方法和问题的提出

瑞利曾在 20 多年中以大部分精力从事气体密度的研究,在测定了氧对氢的原子量之比后,他的注意力转向了氮.他先使用了哈考特(Harcourt)发明的方法:“空气先通过液态氨,再通过一个管子,管子中放有赤热的铜.空气中的氧在管中被氨中的氢吸收,剩余的氮再用硫酸清除.在这个实验中,铜仅仅起了增加接触面和指示剂的作用.只要铜还发亮,我们就可肯定氮在起作用<sup>[2]</sup>”.他对这样处理的气体进行了一组测试,结果都一致.起初打算就此结束对氮气的实验,但后来仔细考虑,对另一种方法即雷尼奥(Regnault)方法无论如何应当试一下.这种方法是使空气直接通过赤热的铜而除去氧,对此方法进行了一组实验,其结果互相完全一致.但是两种方法得出的密度值相差了千分之一.瑞利经过分析认为,差值虽小,但它完全超出了实验误差范围.

经过一段时间的研究,他感到困惑不解,不知该怎样继续研究它.他想到两者的差别,一种氮气全部来自空气,另一种氮气中约有五分之一来自氨.“在氨法中用氧代替空气,是放大这个差值的最有希望的办法.因为这样一来,实验中的全部氮气都应该来自氨.这个实验立刻获得了成功.来自氨的氮气比来自空气的氮气轻  $1/200$ .对这个差值可以满意地进行分析<sup>[2]</sup>”.他最开始怀疑从氨中制取的氮气受到了其他气体成分氢的“污染”,就有目的地将氢混入大气中的氮气,然后通过除氢装置,实验排除了这一可能性<sup>[3]</sup>.他又考虑大气中的氮受到了氧的“污染”,接着又排除了这种可能性.有一种解释是,从氨法中得到的氮中可能会有一种游离状态的氮,这种氮应当是不稳定的,但把样品保留了 8 个月,密度仍不变,于是否定了这种解释.那么只能是空气中还有一种比氮气重一些的气体.

他在 1892 年写信给《Nature》杂志:“我被氮的密度的一些结果所迷惑了,恳请你们的化学专业读

者对此提出建议.按照制备方法不同,我获得了两种显著不同的数值<sup>[4]</sup>.”在没有征集到建议的情况下,瑞利又用了两年多的时间,用不同的技术制备氮气,其他方法得到的氮气,其密度总比从大气中制取的小一些.

#### 3.2 进一步的研究和证明

瑞利对卡文迪什 1795 年研究氮气的方法进行了重复.用感应圈代替静电起电机放电的方法使氮氧化,再用氢氧化钾将其化合物吸收,这样使几乎所有的氮都被除去,而总剩下一小部分未知气体.1894 年拉姆塞(William Ramsay)给瑞利写信,请求允许对此进行研究,他在一个球体容器中燃烧镁除去氮.连续七个月他们通过书信频繁交换信息.8 月 13 日他们联合向不列颠学会提交了一份报告;1895 年 1 月 13 日他们又共同提交了一份长达 54 页的论文,给出了这种新发现的气体的密度、折射率、在水中的溶解性、比热容和原子光谱,将其定名为氩(Argon).

瑞利进行的实验是非常细致的.为了准确的测定氩的折射率,他制作了现在称之为瑞利干涉仪的仪器<sup>[5]</sup>,其结构见图 1,准直透镜 A 距光源 7 m 远, B, C 为两个长约 30 cm 装气体的管子,直径约为 1.3 cm 左右,两端用从同一块玻璃板上切割下的平行玻璃板密封住, E 是口径约 7.6 cm 的望远镜,其前方为一个开有两条互相平行的狭缝的盖子 D,每个狭缝的宽度为 6 mm,两缝中心间距为 38 mm.视场中会出现宽度与两缝间距成反比的干涉条纹.无论由于什么原因,使其中一束光相对于另一束光的光程有了增加,干涉条纹就会发生移动,只有抵消这一增加后,条纹才会回到原来的位置.

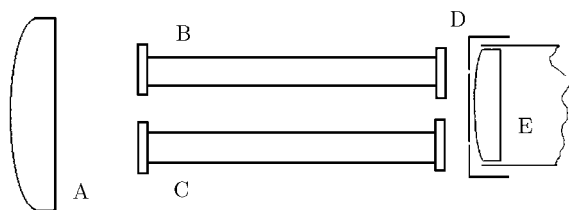


图 1 瑞利干涉仪示意图

B, C 两管中有一个装入待测气体,另一个装入空气,调整两管中气体的压强,使条纹中心落在确定的位置,再分别测出两管中的压强.压强变化之比与气体折射本领(refractivity)即  $(\mu - 1)$  成反比( $\mu$  为折射率).为了避免由于仪器装置的系统误差引起条纹移动,采用了从管子外边通过的光形成的第二套条纹,以其作为待测气体形成的条纹标准.在这里,瑞利考虑得相当周密,对这一实验进行了多达 40 套条

物理

纹的实验(相邻两套条纹之间相差 5 mm 汞柱的压差),每次都使条纹的移动得到了补偿.他由此测出了氩与空气折射本领之比为 0.962.他从实验结果中得到的结论是折射率和密度都说明了氩不可能是氮的同素异形体  $N_3$ .他后来还用这种干涉仪测出氩的折射本领为空气的 0.146 倍.

他还测出氩的粘滞系数是干燥空气的 1.21 倍,而氮则是干燥空气的 0.96 倍;他利用在斯托克斯关于不可压缩流体原理的基础上由 O. Meyer 得出的公式,在压差不太大时,时间  $t$  内通过半径为  $R$ 、长度为  $\lambda$  的气体体积为  $V_2$ ,测出  $V_1$ ,则其粘滞系数正比于时间  $t$ .使用内径很小的长约 1 m 左右的毛细管,使通过的气体体积约为 100 ml.

为了更准确地测定氩气的密度,制取 3 L 氩,需吸收掉约 300 L 氮气,或大约 800 L 的氮氧混合气,吸收能力约为 7 L/h.这项工作持续了将近三个星期,得到的 10 L 残留气体中仍会有氧和相当数量的氮.1895 年 5 月 22 日获得了一个较为满意的结果.当准备再次重复时,容器发生了问题,漏入了 1 L 空气,整个提纯过程必须从头返工.由此我们不难想象这一工作是如何严密,是多么艰苦细致的.为了检验气体中是否含有氮气,他在这种残余气体中放电,在常压和低压下检查其光谱,证明了其中存在氮气.

### 3.3 这一发现的结果

瑞利和拉姆塞的研究结果发表后,引起了一些怀疑甚至攻击,更有甚者说对氩的测量是“捏造的”,一些科学家也认为这样重的元素不可能是气体,瑞利回答说:“我已经看到了氩的反常性质会使我们受到一些责难...我们掌握的事实很充分,现在所能做的就是为我们自己和这种气体进行辩护.”正是因为瑞利对氩的性质进行了全面而细致的研究,掌握了它的密度、折射率、在水中有溶解性、比热容和原子光谱特征等这些无可辩驳的证据,使得那些很难相信当时还有未能发现的元素的化学家也只能接受这一现实.他们的结果在不久后的几年内被其他科学家所证明,而且拉姆塞和特瑞沃斯(Travers)、索迪(F. Soddy)还一起相继分离出了氦、氟、氡、氩,拉姆塞由此获得了 1904 年诺贝尔化学奖.开尔文祝贺氩的发现,说这无疑是一年中最伟大的科学事件,“如果有任何一件事情能够增加我们对所感到吃惊的发现的兴趣,那就是对发现它的途径的考虑,...从 1882 年开始,瑞利以百折不挠的毅力坚持了 12 年之久的艰苦工作.”

从纯物理的角度看,发现氩的最重要的意义在

于导致了氦的发现.在含有放射性元素铀和钍的矿物中存在氦的情况发现后,卢瑟福和索迪认为氦可能是放射性元素蜕变的产物,又从实验中证明  $\alpha$  粒子就是氦离子,并由此形成了原子结构的模型,为物理学的发展逐步进入微观世界奠定了基础,也为惰性气体的研究开了一个头.氩常用于生成一个防止与其他气体发生化学反应的环境,可用于易氧化金属的焊接和切割工艺中,氩也因其导热系数小且化学性质不活泼而用于灯泡中,也用于激光器和溅射镀膜中.

## 4 对物理学发展的其他贡献

瑞利在物理学领域中,研究最多的要算是光学了.在收入他的文集的 400 多篇论文中光学占了近 200 篇.在进行早期的颜色视觉实验中,瑞利已经注意到天空的蓝色影响到色彩的匹配,于是开始了一项关于天空的蓝色和落日呈红色的研究.当时有一种看法认为天空的蔚蓝色可能是由于水形成的气泡造成的.在 1871 年的论文中,瑞利指出,如果是由于薄板或气泡的反射,应当随  $\lambda^{-2}$  变化(这样散射中蓝光光强约为红光的 4 倍).他经过分析并经实验证明,如果散射光是由于小到可和波长相比的粒子所致,光强应与  $\lambda^{-4}$  成正比(即散射的蓝光强度约为红光的 16 倍).1881 年他又从麦克斯韦理论重新导出了这一原来由以太理论假设得出的关系,1894 年他又指出,大气粒子的假定也是不必要的,大气分子自己就可产生散射效应.

瑞利很早就对照相感兴趣,1871 年他开始复制衍射光栅,最初的目的是用粗光栅复制细光栅.1874 年他提出光栅的分辨本领是由光栅刻槽总数与光谱级次的乘积决定的.在后来的论文中,他进一步考虑了光栅的分辨本领,并引入了著名的瑞利判据:“当第二个衍射像的中心落在第一个波长衍射花样的第一级最小处时,这两个波长认为是可以分辨的.”

瑞利的《声学原理》一书的出版,是声学发展史上的一个里程碑.他用那些看来很简陋的仪器在自己的实验室进行实验,但是他的绝大部分研究结果今天看来仍是正确的,声学阻抗的单位和一种表面波型都是以他的名字命名的.他还分析过由于上下温度之差所引起的流体对流,引入了有关的无量纲数(后称为瑞利数, Rayleigh number),这个结果可以用来解释由于地面大气对流而引起的某些气象现象.此外,他还研究过有限幅度波的传播和气体对运动物体的阻力等.

在特尔灵参观过瑞利实验室的科学家都认为他的实验装置相当简单甚至有些粗糙.这一方面是由于瑞利不喜欢过分奢华,另一方面也是由于他的节约精神和经费紧张不允许铺张.但在他的任何实验中,装置的关键零部件是经过精心制作的,其他部件则只要能用即可.在他的实验室,“密封蜡、弦线、粗笨的木制品和玻璃管由球形和其他形状的接头连在一起,到处可见<sup>[4]</sup>.”

瑞利在任卡文迪什实验室教授期间,制定了鼓励研究者共同从事研究的计划;他建议 J. J. 汤姆孙从事确定静电单位与电磁学单位对比的研究,瑞利自己还为此设计了一些重要仪器.他重新确定了三个电学量标准:欧姆、安培和伏特,这一研究到 1884 年结束,其结果很好地经受住了时间的考验.

瑞利在 1900 年还考虑了黑体辐射的问题.他根据经典电动力学和统计物理学得出黑体辐射的能量分布公式,公式在长波部分与实验结果较符合,而在短波部分则完全不符.虽然瑞利更偏爱经典物理理论,但他仍对量子理论和相对论给予了极大的关注.瑞利可以称得上是最后一位对物理学非常博学的人.进入晚年他的研究仍很活跃,在最后的 15 年中,撰写了 90 多篇论文.

## 5 瑞利给我们的启示

从瑞利的科学生涯特别是他对氩的发现过程,我们可以获得很多有益的启示:

(1) 创新过程中必须有严谨缜密、一丝不苟的作风.瑞利最早用空气使氮氧化的方法测出氮气的密度,且一组测试结果都一致.在常人看来,就算大功告成了.但是瑞利想的却是另一种方法(即从空气中去掉氧的方法)“无论如何应当试试”,有的人可能会认为这简直是节外生枝.当发现两种方法得出的密度值相差千分之一时,一般人看来这算不了什么,可能会随意地归咎于测量误差,但瑞利经过细致分析,认为“这个差值虽小,但它完全超出了实验误差范围.”他绝不去拼凑数据,而是提出“实验工作者有一条好规矩:当差值一开始就存在时,我们总是要设法放大这个差值,而不是凭感情放弃它.”于是用纯氧代替空气,发现了来自氮的氮气比由空气中制取的轻 1/200.在实际研究中,他尽量设法消除和减小误差的影响,如用他的干涉仪测定氩的折射率时,他用管外通过的光形成的另一套条纹中心作为参照点,避免了仪器系统误差引起的条纹移动的影响.他就

是这样通过严密的思考,精确的实验,完全靠着这种一丝不苟的精神才实现自己的创新的.

(2) 创新需要锲而不舍的精神.瑞利在研究中遇到了难题,不知应该从何入手.他将自己的问题公开征集答案,同时仍不放弃研究.他经常是在实验室遇到了难题,就先去做其他工作,同时继续对困难问题进行思考.他将自己的时间均匀地分为实验研究和理论研究两部分.他读起文献来废寝忘食,研究的许多问题都是在阅读文献时提出的,他能够抓住他人研究结果中的薄弱环节和难点,作出自己的贡献.氩气密度问题也是读了 1795 年卡文迪什的一篇论文后找到线索的.卡文迪什当时就已经发现,在空气中放电使氮氧化,总有一些残留气体,如果他坚持这一研究,也许会发现氩的存在.同样,如果瑞利“锲而舍之”,也就会失去这个创新的机遇.

(3) 以创新为乐.瑞利在 31 岁时世袭了父亲的爵位,生活是很优裕的,但这丝毫没有影响他对科学的追求.他从美国参观访问回国时,自己购置了一些实验仪器.他从事科学研究不是为了经济上的利益.1904 年获诺贝尔奖后,把奖金捐赠给了剑桥大学用以改善卡文迪什实验室和图书馆条件.他在一次获奖致辞时说:“我意识到个人的唯一优点是乐于从事研究学习.任何由研究取得的成果应归于这样一个事实,我对能成为一位物理学家而感到高兴.”由此不难看出,正是由于他把全部兴趣和热情都放在了研究和学习上,才能在物理学的理论和实践上不断创新.

瑞利在几十年的科学生涯中,不仅做出了许多发现和创新,推动了物理学的理论和实验方法的发展,也为我们在创新思路、创新方法上提供了宝贵的经验.

## 参 考 文 献

- [1] Gillispie C C. Dictionary of Scientific Biography. Vol.13. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. 100-107
- [2] 诺贝尔奖基金会编.宋玉升等译.诺贝尔奖金获得者讲演集(物理学,第 1 卷).北京:科学出版社,1985.78-87[ Nobel Foundation ed. SONG Yur Sheng et al trans. Nobel Lectures (Physics, Vol.1). Beijing: Science Press, 1985. 78-87 (in Chinese) ]
- [3] Magill F N. The Nobel Prize Winners (Physics, Vol.1). Pasadena: Salem Press, 1989. 80-86
- [4] Howard J N. Appl. Opt. 1964, 3: 1091
- [5] Lord Rayleigh. The Collected Optics Papers of Lord Rayleigh. Vol. 2. Washington: Optical Society of America, 1994. 719-728