

# 验证原子能级量子化的里程碑： 弗兰克—赫兹实验

林志忠<sup>†</sup>

(台湾阳明交通大学电子物理系 新竹 30010)

2024-05-06收到

<sup>†</sup> email: jjlin@nycu.edu.tw

DOI: 10.7693/w.120240708

“他们发现了一个电子撞击一个原子时所遵循的定律”

——1925年弗兰克与赫兹获得诺贝尔物理学奖时的颁奖词

## 1 引言

古斯塔夫·赫兹(Gustav Hertz, 1887—1975)于1911年从柏林洪堡大学获得博士学位之后,詹姆斯·弗兰克(James Franck, 1882—1964)随即邀请他一起在柏林大学进行气体放电相关实验。他们的合作只持续了三年,到了1914年第一次世界大战爆发,两人随即入伍服役,并都曾在战争期间身受(罹)重伤(病),幸而妥善疗养之后都痊愈了,两人得以重返教研岗位。他们在1914年4月撰写的实验论文,成为量子力学发展史上的一座里程碑,为玻尔原

子论模型(发表于1913年7月)预测的电子能级分立(离散而不连续),提供了坚实的测量证据,使该项革命性理论预测,从看似不可思议的异想天开(奇想),摇身成为确凿的微观世界的“事实”,“弗兰克—赫兹实验(Franck—Hertz experiment)”一词,从此写入近代物理学课本中,他们两人并因这一项丰功伟绩,共同荣获1925年诺贝尔物理学奖。

19世纪下半叶,照明以及电气的使用日趋广泛,工业及民生需求大幅度增加,研究和解决低压空气漏电问题及气体放电现象因此成为显学。同一时期,阴极射线于1859

年发现之后将近40年,直到1897年,汤姆孙(J. J. Thomson, 1856—1940, 1906年诺贝尔物理学奖得主)才确定其为电子(粒子)流,而非传播于以太中的某种波动。在理论方面,以麦克斯韦和玻尔兹曼为首的气体动力论和统计力学也逐渐发展成形,趋于完备。这些主客观条件,都构成了弗兰克—赫兹实验的研究动机和学理支柱背景。简言之,当时许多科学家致力于测量低压气体放电管中的电子及离子平均自由程、离子迁移率、电子能量分布和电子结合能,其主要动机在于研究各种(惰性)气体及金属原子的电离势(ionization potential)或电离能(ionization energy),希望了解电和物质的本质。弗兰克和赫兹则企盼建立一个关于气体中的电子的动力学理论(a kinetic theory of electrons in gases),未曾想到探究物质的结构。当时,除放电管之外,科学家也使用X光、紫外光和辐射等来照射原(分)子,使其产生电离现象,但他们对原子和分子的内部结构仍一无所知,脑中完全没有能级分立,遑论能级间之跃迁(transition)和激发(excitation)的概念。

从1911年到1914年间,经过一系列实验,伴随着逐步改良和细致化他们的仪器设计与装置,弗兰克与赫兹意外地测量到了通过低压汞原子蒸气的电流大小与电压成周期性起伏,周期为4.9 V,图1即是他们发表于1914年的原始数据。随后,弗兰克与赫兹又非常警觉地测量了放电管外围的光谱,发现了一条波长为253.6 nm的紫外光谱线。他们惊讶地发现,这条谱线的对应频率乘以普朗克常数 $h$ ,正好等于4.9 eV( $e$ 为电子电荷)。这个定量吻合,显然蕴含深意,即普朗克黑体

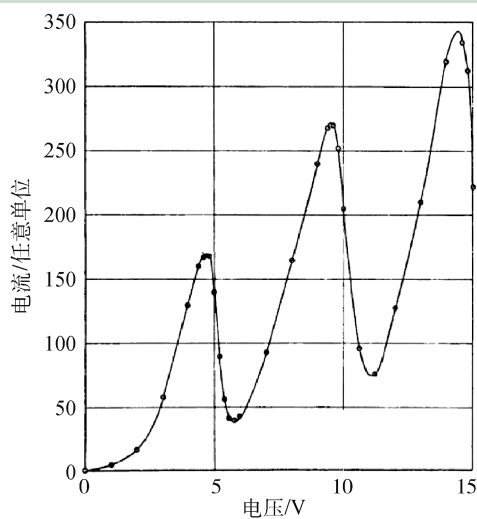


图1 弗兰克—赫兹实验中,低压汞原子蒸气通电实验数据,电流极大值呈周期性出现,峰值间距为4.9 V<sup>[3]</sup>

辐射能量量子化的概念和电子—(汞)原子碰撞必定隐含千丝万缕的密切关系。但是, 弗兰克和赫兹以及当时身在柏林的许多位近代物理学先驱, 如普朗克和爱因斯坦等大家, 竟都没能及时意识到这就是原子的能级量子化现象的直观反映, 虽然此时他们应已知晓玻尔发表了氢原子模型理论。

在近代物理学教科书里, 弗兰克—赫兹实验结果经常紧接在玻尔原子模型之后, 只被简短描述, 有时一笔带过, 仿佛它的作用仅在于为量子理论背书。笔者认为, 这种教学以及教材编辑方式, 可能助长学生在潜意识里养成轻忽实验的态度, 甚至产生实验总是轻而易举, 并顺理成章印证理论计算结果的印象。下面我们检视弗兰克—赫兹实验的仪器装置, 以及分析他们两人之所以能够摘得桂冠, 而其同时代许多优秀实验学家之所以功败垂成、失之交臂的要素。

## 2 弗兰克—赫兹实验装置及操作要素

图2是弗兰克—赫兹实验的仪器装置示意图, 放电管是一个玻璃制圆柱形管。其中, 灯丝(D)为负极, 温度约为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在圆柱轴上, 栅极(N, 正极)和集电极(G)为同心空心圆柱。灯丝与栅极相距约 $4\text{ cm}$ , 栅极与集电极相距约 $1\text{—}2\text{ mm}$ , 后者间距大致相当于实验条件下的电子平均自由程长度, 因此只要到达栅极并且能量大于 $0.5\text{ eV}$ 的电子就能被集电极接收(见下文)。与简单直线型放电管相较, 使用同心圆栅极与集电极, 可以收集到更多的电子, 即能够获得较大的电流, 使测量更精确, 信号变化(起伏)更明显。进行实验时, 灯丝放出

的(热)电子被加速, 撞击玻璃管中的汞原子蒸气(蒸气压约为 $1\text{ mm}$ 汞柱或更低)。在弗兰克和赫兹的设计中, 栅极电压(相对于灯丝电压)可调范围为 $0\text{—}15\text{ V}$ , 所以电子能量/动能不高, 与阴极射线管中的

电子相比属于低速电子。栅极和集电极之间则接上一个小的反向电压( $0.5\text{ V}$ ), 所以在栅极处能量很小的被加速电子(小于 $0.5\text{ eV}$ )将无法抵达集电极以形成电流。实验时, 集电极接检流计, 再接地。(注: 阴极射线中的电子能量高得多, 碰撞后会使得原(分)子电离。此外, 在弗兰克和赫兹的一系列实验中, 电极的间距和汞原子的蒸气压常随测量重点不同而有所调整。)

如前所述, 在19、20世纪之交, 进行实验测量及理论解释各种气体和金属原(分)子的电离势, 是一个重大科研课题。然而, 当时实验上还未能准确测出不同气体的电离势值, 如J. S. Townsend的理论模型也仍是建立在古典物理学之上, 因此形势呈现浑沌胶着状态。与众不同, 弗兰克和赫兹两人得以出类拔萃的原因, 在于他们极端注重实验细节, 并且能面面俱到。他们细心又耐心地一次次纯化气体, 一步步改善和提高玻璃放电管中的真空度(包括管壁的清洁和灯丝的选材、加温与除气(degassing)等), 落实密封通过玻璃管的电极导线, 并谨慎处理电线接地(以避免产生回路电流)等实验细节。为了提高真空度, 他们还在旋转机械泵与放电管之间加装了液态空气冷阱(cold trap), 以吸附机械泵油气, 避免它们污染放电管中的被测气体或金属

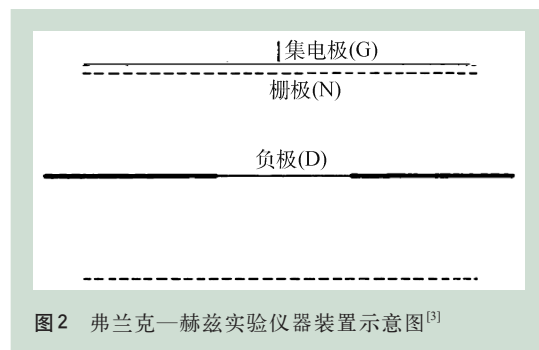


图2 弗兰克—赫兹实验仪器装置示意图<sup>[3]</sup>

原子蒸气。这些实验手段, 仍是今天实验物理学家要做出漂亮结果的必备手段和操作要求。反之, 在弗兰克和赫兹之前, 许多实验室的待测气体纯度不够, 又受到机械泵油气倒灌污染, 因此即如著名的莱纳德(Philipp Lenard, 1862—1947, 1905年诺贝尔物理学奖得主)实验室的测量值也常常难以重复或合理定量。事实上, 为了达到最高测量精度和数据准确度, 弗兰克和赫兹采用了1905年才发明的最先进的Gaede真空机械泵, 并特地请了玻璃吹制技术人员制作放电管, 他们实验时的金属原子蒸气压常能控制到 $0.03\text{ mm}$ 汞柱以下。

除了逐步精进实验设计和注重操作细节之外, 弗兰克和赫兹两人还明智又巧妙地发挥了一流实验学家的本色。在设计实验和分析数据时, 他们直接忽略低能量(小于 $4.9\text{ eV}$ )的低速电子与汞原子碰撞时损失的能量, 即他们假设这时的碰撞都是弹性碰撞, 之后又以实验测量印证这项空前假设。(当时的主流Townsend原(分)子电离理论假设所有碰撞都是非弹性碰撞, 电子每次与原子碰撞之后都损失了全部能量。)弗兰克和赫兹的弹性碰撞假设建立在深具启发性的物理基础之上, 一则是因为电子与汞原子质量相差巨大, 因此无需考虑每次碰撞之后的极微小电子动能变化。例

如,假设碰撞前汞原子静止,因动量守恒,碰撞后它获得了一个微小动能。两人大胆果断判定,既然这些微小能量转移在实验测量误差范围之内,讨论该项能量转移显然没有意义。因此,虽然电子从阴极D被加速到正极N的过程中,经过了上百乃至上千次碰撞(视实验条件如汞原子蒸气压而定),但在N极处的能量总是等于电子电荷乘上N—D两极间的外加偏压值(电流则随偏压/电子漂移速度增大而增大)。直到外加偏压为4.9 V时,才发生第一次非弹性碰撞,电子在N极附近把能量完全传递给了汞原子。这时,电子因缺乏足够克服G—N极间的0.5 V反向偏压的能量,无法抵达G极,电流因此急剧下降。同理,如果N—D极间的偏压为9.8 V,则电子将在D极和N极中点处发生第一次非弹性碰撞,丧失所有能量;之后又再次被加速,并在N极处发生第二次非弹性碰撞,因此产生两个电流峰,如图1所示。所以,弗兰克和赫兹实验得以留名青史,并非两人只是运气好,一朝浪得虚名之故。

因为弗兰克和赫兹测量的是相邻峰值之间的距离,而非出现电流峰值处的绝对外加偏压值,因此可

以很准确地测得产生非弹性碰撞所需的能量。如果实验测量的是电流峰处的偏压绝对值,则会受到电线和接点电阻上偏压降的影响,造成数值误差。

### 3 弗兰克—赫兹实验结果的重大意义

简要言之,弗兰克—赫兹实验结果的重大意义有三个层面。(1)验证了玻尔原子模型的普适性意义,即玻尔模型不是一个仅适用于描述氢原子光谱线的特殊性理论;玻尔提出的革命性能级量子化概念是微观世界的本质,是自然界的事实。(2)验证了普朗克提出的革命性黑体辐射能量公式 $E = hf$ ,其中 $E$ 为(某种谐振子)能量, $h$ 为普朗克常数, $f$ 为谐振子或电磁波频率。弗兰克和赫兹两人更进一步反向操作,他们利用测得的图1中的峰值间距(4.9 V)和放电管周边测得的光谱线波长(253.6 nm),实际订定出当时尚待精确测量的普朗克常数值。令人不禁赞叹的是,弗兰克和赫兹的 $h$ 实验值,与现代被接受的数值相差在1%之内。(3)与卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871—1937, 1908年诺贝尔化学奖得主)的一系列著名 $\alpha$

粒子散射实验大约同时,弗兰克和赫兹两人把原本集中于单纯测量电离能的放电管及阴极射线实验课题,拓展成为一个以研究电子—原(分)子碰撞行为的广阔新兴实验领域。他们的这个撞击实验方法(the bombardment method),与卢瑟福高喊的“击碎原子(Smash the atom!)”口号并肩,构成探究微

观物质结构的先锋利器,更开启了连绵一个世纪以上的加速器物理学研究的康庄大道。

弗兰克—赫兹实验结果发表时,不但未曾在文章中提及或引用玻尔的1913年论文,当时交流频繁的欧洲近代物理学大师们,竟也没能很快意识到这个实验正是以一个简洁明晰的测量手段,图像化的结果,直截了当验证了(令人心中起疑的)玻尔原子模型能级量子化的预测。玻尔本人则在1915年,已基本看出弗兰克—赫兹实验测量到的就是汞原子的电子激发,他认为4.9 eV应是激发能而不是众人多年认为和角逐测量的电离能(图3)。而且,玻尔认为253.6 nm谱线即是受激原子跃迁回基态时所放射出光子的波长。弗兰克和赫兹两人,到了1919年,才如梦初醒,敞开胸襟,热烈接受玻尔的解释,并成为玻尔模型的鼓吹手。其中缘由,除了能级量子化概念的出人意料,横空出世,令人难以置信,而且理论本身缺乏自洽与严谨度之外,或许也由于战争期间,生活艰困,人心惶惶,导致众人无法沉淀和静思深刻科学问题所致。随着战争结束,玻恩(Max Born, 1882—1970, 1954年诺贝尔物理学奖得主)或许曾很快地、又努力地说服并向弗兰克和赫兹解释玻尔原子模型的意义和重要性。到了1921年,施特恩(Otto Stern, 1888—1969, 1943年诺贝尔物理学奖得主)评论弗兰克—赫兹实验说:“这一个基础性发现,开启了把谱线系列与量子链接的研究。”(注:汞原子跃迁回基态时,放射出的253.6 nm紫外光会照射G极,产生光电效应和光电子,形成电流,使电子—原(分)子碰撞实验的数据分析格外丰富与复杂。)

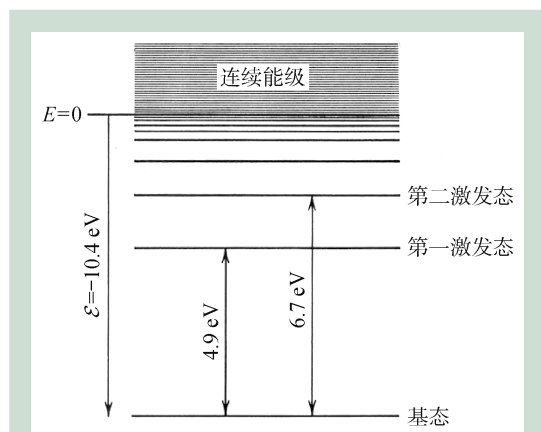


图3 汞原子能级示意图。基态到第一(第二)激发态的能量差为4.9 eV (6.7 eV), 电离能为10.4 eV<sup>[6]</sup>



#### 4 玻恩与弗兰克的长年友谊

玻恩与弗兰克同年，他们又同一年进海德堡大学就读，因此结识。从此，两人成为一生的挚友。玻恩后来写道：在他的人生旅途中，最重要的并不是当时学校的教授和海德堡的浪漫氛围，而是与弗兰克的友情。1920年，玻恩和弗兰克同时成为了哥廷根大学的教授，前者主掌理论物理研究所，后者主掌实验物理研究所，两人合作无间。在这一段战后经济艰困时期，玻恩无私地奋力为弗兰克争取购置实验仪器的经费，他们也获得过爱因斯坦的鼎力相助。此后10多年间，玻恩和弗兰克把哥廷根大学打造成为当时全球量子物理学(原子的电子结构研究)的重镇；直到1933年，他们因纳粹执政而不得不双双仓促离开德国。在玻恩与爱因斯坦的230页来往书信集中(请参考：林志忠·“科学家之间——从《玻恩—爱因斯坦书信集》谈起”。《物理》，2016年45卷9期600页)，竟有40多次提到弗兰克的名字。迈特纳(Lise Meitner, 1878—1968)也是弗兰克的长年好友(图4)，她提到当爱因斯坦(可能是在一战结束前后)在柏林听完弗兰克的弗兰克—赫兹实验结果演讲后，对她说：“这结果太漂亮了，令人想哭！(It's so lovely, it makes you cry!)” (注：弗兰克对(双原子)分子的转动和振动能级及谱线的研究，也贡献卓著。)

逃离纳粹德国后，弗兰克迁徙美国，先任教于约翰霍普金斯大学，最后落脚于芝加哥大学。由于他对光合作用研究领域的开创性贡献和积极参与并履行社会责任(他关心如种族平等、科学家遭受迫害和核武器管制等议题，并付诸具体行

动)，在他去世后，芝加哥大学的化学物理与固体物理跨领域研究所，即改名为詹姆斯·弗兰克研究所(James Franck Institute)，以资缅怀和纪念。

#### 后记四则：

(1) 玻恩的为人：玻恩想必是位谦谦君子，在“施特恩—格拉赫实验其人其事”(林志忠，《物理》，2021年50卷2期125页)一文里，我们曾经描述在一战后的德国科学艰难重建时期，玻恩如何说服爱因斯坦一起鼎力帮助在法兰克福大学任教的施特恩筹措购买仪器和进行实验的经费。大战期间，德国著名化学家哈伯(Fritz Haber, 1868—1934, 1918年诺贝尔化学奖得主)受命发展致命毒气，以在战场上协助德军取胜。哈伯曾经邀请玻恩参加该项计划，但被玻恩拒绝了(弗兰克则在哈伯手下服役过一段时间)。注定成为人类文明长河中的智慧支柱之一的“量子力学”一词，是玻恩于1924年在一篇论文中首次命名的。(玻恩提出“量子力学”一词的论文，请参考玻恩著、曹则贤翻译的“论量子力学”，《物理》，2024年53卷2期99页。)

(2) 19、20世纪之交的实验：图5拍摄于1912至1913年间柏林大



图4 赫兹(左)、迈特纳(中)和弗兰克(右)三人从20世纪初年起，建立了超过半个世纪的友谊。照片拍摄于1964年，弗兰克和迈特纳一同越过柏林围墙，前往东柏林探望当时任教于莱比锡大学的赫兹<sup>[3]</sup>



图5 赫兹正在做实验，拍摄于1912至1913年间(取自：Gustav Hertz. Photographic Archive : The University of Chicago (uchicago.edu) )

学实验室，坐者是赫兹。奠立量子力学大厦深厚基础的关键拍版定案实验，如验证原子能级量子化的“弗兰克—赫兹实验”及发现电子自旋的“施特恩—格拉赫实验”，都是在玻璃放电管中进行，并无壮观亮丽的惊人大型仪器设备与豪华宽敞的实验室空间。这些玻璃管的长度只约15 cm或更短，直径也不到4 cm，当时的真空技术和气体及金



# 光学全产业链 展示及交流平台

**精密光学展 & 摄像头技术及应用展**  
PRECISION OPTICS EXPO & CAMERA EXPO

**2024年9月11-13日**  
深圳国际会展中心(宝安新馆)

**第25届中国国际光电博览会**  
240,000M<sup>2</sup> 展出面积 | 120,000+ 专业观众 | 3,700+ 参展企业

**同期展会**

- 信息通信展  
INFORMATION COMMUNICATIONS EXPO
- 激光技术及智能制造展  
LASER TECHNOLOGY & INTELLIGENT MANUFACTURING EXPO
- 红外技术及应用展  
INFRARED APPLICATIONS EXPO
- 智能传感展  
INTELLIGENT SENSING EXPO
- 光电子创新展  
PHOTONICS INNOVATION EXPO
- 新型显示技术展  
DISPLAY TECHNOLOGY EXPO

  
展会小程序

属纯化技术与今日相比，完全不可同日而语。他们这些开辟今日量子计算机科技基础的前驱(包括实验成果和实验学家)，恍如当年寂寥著书黄叶村的曹雪芹为后世带来了斑斓绚丽的《红楼梦》，亘久照耀人类文明。

(3) **弗兰克的成就**：Stuart A. Rice 和 Joshua Jortner 曾在2010年为美国国家科学院 Biographical Memoirs 档案库合写了一篇回忆弗兰克的文章“James Franck: 1882—1964”<sup>[4]</sup>。文章开宗明义指出，著名科学家赢得声望通常来自三个方面，一是科学成就，二是道德勇气，三是科学应用的政治立场(即社会责任)。作者说，只有极少数科学家能在这三方面都做出重大贡献，而弗兰克是其中之一。弗兰克的科学成就来自于他的实验解开了原子和分子的量子结构(以及光化学反应和光合作用的物理过程)，他的道德勇气表现于1933年纳粹当政时率先众人果断冒着人身危险辞去哥廷根大学教授职位，他的科学应用的政治立场则展现于领导反对使用原子弹与倡议控制核武军备竞赛。弗兰克的这三项成就，有如立德、立功和立言，三项皆备。(注：曼哈顿计划末期，弗兰克主张同盟国邀请日本在沙漠或无人岛展示原子弹的威力，不要直接投掷人口密集的大城市。这项主张虽然受挫，但弗兰克的另外一些建议后来被写入了美国国家核武使用章程里。)

(4) **地球极光**：2024年5月10至12日间，地球不少地区出现强烈极光，照耀天空。极光的起因源自太阳风(电子、光子等)进入地球磁场后，撞击高层大气层中的氧原子和氮分子，使得氧原子激发及氮分子激发或电离，这些受激原子或分子跃迁返回基态，及被电离氮分子捕获电子时放出红色、绿色与蓝色光，形成人类眼中的美丽极光，所以极光是原(分)子能级量子化的天文见证。费曼的妹妹乔安·费曼(Joan Feynman)也是一位物理学家，她对阐释极光的复杂形成机制之谜有重要贡献。

**致谢** 感谢中央大学杨仲准教授、天津大学李志青教授和辅仁大学吴至原副教授仔细阅读文稿及提出修正意见。

### 参考文献

- [1] Franck J. Nobel Lecture, 1926
- [2] Hon G. Physics in Perspective, 2003, 5: 150
- [3] Gearhart C A. Physics in Perspective, 2014, 16: 293
- [4] Rice S A, Jortner J. James Franck: A Biographical Memoir. National Academy of Sciences, 2010
- [5] Williams R. APS News: This Month in Physics History, 2017, 26(4): 4
- [6] Eisberg R, Resnick R. Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles. 1985