

验证电子衍射及波长：戴维森—革末实验

林志忠[†]

(台湾阳明交通大学电子物理系 新竹 30010)

2024-05-29收到

[†] email: jilin@nycu.edu.tw

DOI: 10.7693/wl20241207

CSTR: 32040.14.wl20241207

“电子的干涉实验图样从明显随机出现的个别斑点到逐渐成形，令人难以忘怀，那就
仿若薄暮时分，细小星辰在你眼前映现(逐渐)构成银河。”

——外村彰 (Akira Tonomura)

1 前言

能量和速度相同的电子，一个接一个通过尺度适当的双狭缝，在屏幕上形成一道道明暗相间的条纹，是微观世界最难以捉摸又令人叹为观止的奥妙之一。比经典杨氏可见光双狭缝实验跨出了更惊心动魄的一步，“电子双狭缝实验”展示了电子神秘的“波粒二象性”。文前那一段引言是日本物理学家外村彰在日立研究中心演示电子双狭缝干涉的绚丽影像时，不禁脱口而出的一句赞叹话语。

首位利用实验证实电子具有波动行为(具有物质波长，像水波一样行进)的科学家，是美国人克林顿·戴维森(Clinton J. Davisson, 1881—1958)。戴维森身体羸弱，大器晚成。当他高中毕业获得一年奖学金赴芝加哥大学就读时，已20岁。一年后，因学费无着落，密立根遂介绍他短暂到普渡大学，接着前往普林斯顿大学担任助教，而于暑假期间返回芝加哥大学完成学业，他花了六年时间才获得大学文凭。

之后，戴维森前往普林斯顿大学跟随里查森(Owen W. Richardson, 1879—1959, 1928年诺贝尔物理学奖得主)攻读博士学位，1911年毕业时已30岁。之后在匹兹的卡内基理工学院教书，每周上课18小时，没有时间和资源做研究。第一次世界大战期间，他因体格不符入伍要求，

遂前往西方电器公司(贝尔实验室前身)参与战备研发工作。

战后，戴维森期盼能有时间从事科学研究，因此选择留在贝尔实验室而不回学校。此时他虽已年近不惑之龄，却还从未做过任何一项像样的学术研究工作。但是当参与战时工作的同僚在战后纷纷高升，担任各种主管或接任各式行政职务时，他却坚持只要求一个单纯的研究员位置。非常幸运的是，戴维森的选择(作为一位纯粹研究员)获得了贝尔实验室首任研发部门主管Harold D. Arnold的赞赏与支持。Arnold在之后几年的几次关键时刻，都能意识到戴维森实验的开天辟地属性，数度及时又无私地调动一流助手/合作者和优秀技术人员，协助戴维森突破了好几道严峻实验关卡，为建立近代物理学基石以及贝尔实验室的科研传统与崇高声誉，共同立下了汗马功劳——戴维森是贝尔实验室的首位诺贝尔奖得主。

接下来的几年，戴维森持续利用电子束轰击并探讨二次电子发射(secondary electron emission)现象，进展和成果有时亮丽，有时令人费解，乃至迷航或停顿。1926年秋冬，在因缘际会、心中疑团茅塞顿开之后，戴维森重起炉灶，精心规划了一系列崭新实验。他精密设计及制作仪器和样品，并与合作者耐心操作，精细测量。1927年初，他们把一束被低偏压加速的低能量电

子打向一块镍单晶，发现了(如X射线般的)散射现象，即在特定角度出现了定量“弹性反射”电子，证实电子具有波长，内禀“波粒二象性”。这时戴维森已接近知天命之龄。

1937年，戴维森获得了诺贝尔物理学奖。他和雷斯特·革末(Lester H. Germer, 1896—1971)定量证实了电子具有一如德布罗意预测的波长，进而为1926年薛定谔提出的革命性波动力学理论奠定了无可置疑的事实基础，即(微观)物质都以波动形式行进/运动。后来，革末曾获得26次提名，但不知为何始终与诺贝尔奖无缘。戴维森和革末把电子加速到几十至数百电子伏特，属于低能量“低速”电子。1937年的诺贝尔物理学奖同时颁给了乔治·汤姆孙(George P. Thomson, 1892—1975)，他使用被加速至数万电子伏特的高能量“高速”电子对多晶金属薄膜进行散射实验，也证实了电子具有德布罗意波长。近代物理学史上著名的一段佳话是：父亲J. J. 汤姆孙(1906年诺贝尔物理学奖得主)证实了电子的粒子特性，儿子G. P. 汤姆孙则证实了电子的波动特性。

2 戴维森—革末电子散射实验

如“验证量子能级量化的里程碑：弗兰克—赫兹实验”^[1]文中所

述, 19、20 世纪之交, 气体放电、阴极射线、X 射线和热发射等现象, 是当时实验物理学的重点研究方向, 目的在于厘清射线的本质(波或粒子)、原(分)子的游离行为、带电粒子的性质和它们的应用前景等, 这些实验都在袖珍高真空玻璃(放电)管中进行。战争结束后, 戴维森在贝尔实验室的研究课题是探讨金属表面及包覆氧化层的镍丝的热发射, 及其被正离子撞击后产生的二次电子放射现象, 那时物质波假说尚未诞生, 遑论波粒二象性概念及量子波动力学理论。

图 1 是戴维森的实验装置示意图^[2], 右上角的电子枪产生电子束, 电子被加速向左撞击镍靶。左下是一个电子收集器, 电子进入后形成电流流过检流计。电子收集器可沿弧形阴影区域移动, 以收集被镍靶散射到不同角度的电子。电子收集器是一个双层金属盒, 两层金属之间可加反向偏压。在戴维森的设计里, 反向偏压大小调整为接近于右上角的加速电压, 因此只有被镍靶“弹性反射”的电子才会进入电子收集器。当时科学家认为, 基于经典力学理论预测, 入射的电子会以各种不同能量, 即非弹性碰撞, 被均匀散射到各个角度。但戴维森在专注测量时发现(他没有忽略掉细节!), 约有千分之一数量的电子被镍靶弹性、而不是非弹性散射了。这一个小信号, 最终导致电子波(长)的发现。

图 2 是 1921 年戴维森与助手康斯曼(C. H. Kunsman)发表在 *Science* 的早期实验结果^[3], 当时他们以为可以比照卢瑟福的 α 粒子散射实验, 利用这些弹性散射电子来测量镍原子的电子结构(原子核外的电

子分布)。这是一个极坐标图, 图中入射电子束由右向左, 作为极轴, 入射电子与多晶镍靶碰撞处设为原点, 通过数据(小圆圈)的曲线表示在该角度测量到的相对电流强度。图 2 显示加速偏压为 150 V 时的实验数据, 此时在 75° 处相对电流强度出现一个极大值, 在 65° 处出现一个极小值。

这张图在实验上的不凡意义如上面所说, 实验测量的是相对电子数(或相对电流), 即单位时间内被镍靶弹性反射的电子数除以轰击镍靶的总电子数。图上横轴显示, 测量的电子数能解析到入射电子数的万分之几, 因此这是一项极高分辨率要求的实验技术。除了对小立体角(solid angle)和对小电流极为灵敏的电子收集器的设计及制作, 玻璃管中也需达到极高真空度, 否则弹性反射电子可能被残留气体原(分)子碰撞而无法进入探测器的微小开口, 造成严重观测误差。虽然定量分析不易, 这张图对于理论方面的重大意义则在于 3 年后当德布罗意提出物质波假说后, 玻恩等人随即意识到图中的极大值可能就是入射电子波被镍原子晶格

衍射造成的(单调曲线则是电子波被多晶镍靶原子散射造成的)。

有趣的是, 在接下来四、五年的持续镍靶散射实验中, 戴维森和合作者测得的散射强度曲线都比图 2 中平滑得多, 随着角度变化, 并未出现明显的电流极大值和极小值, 因此实验一度陷入了胶着, 乃至停摆状态。戴维森等人未能重复图 2 的原因, 应可归咎于他们一直使用多晶镍靶做实验, 而每一个靶是由数目庞大的纳米尺度晶粒组成, 这些小晶粒的晶面方向错乱不一, 因此只是在很偶然的情况下, 他们才幸运地意外获得了如图 2 中

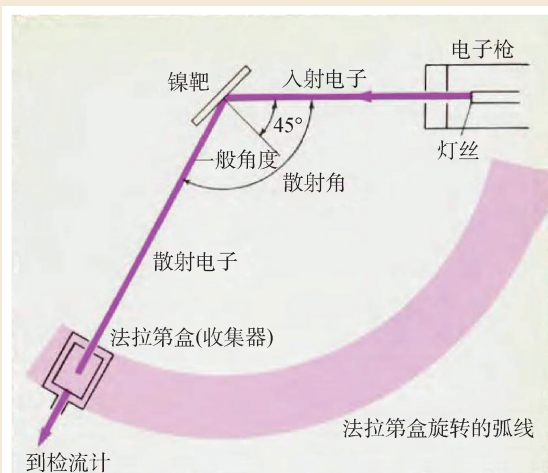


图1 戴维森实验组的电子束对镍靶散射的仪器装置示意图^[2]

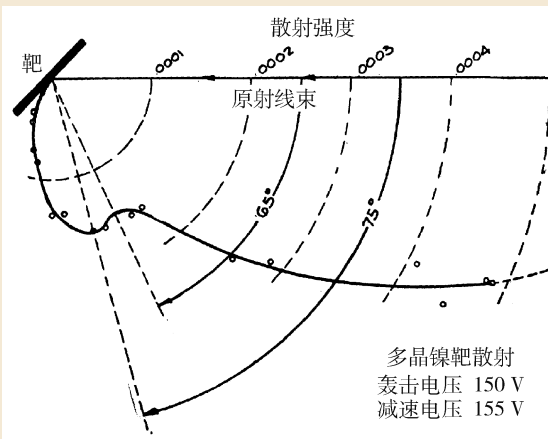


图2 戴维森和康斯曼于1921年11月发表在 *Science* 上的电子束对多晶镍靶散射的实验数据^[3]

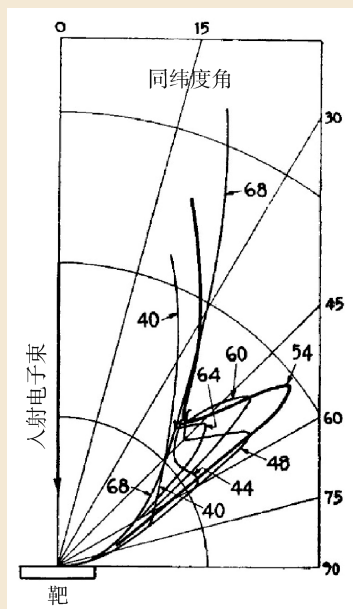


图3 戴维森和革末于1927年4月发表在 *Nature* 上的电子束对单晶镍靶散射的实验数据^[4]

的散射强度随反射角度的起伏变化。而一直使用多晶镍的原因，如上所述，是因为至此为止，戴维森心中一直以为可以利用弹性反射电子来测量镍原子结构。接下来的两年内，既充满了科学发展过程的戏剧性，也应验了俗语说的“机会只会留给准备好了的人”。

1925年年初，在一次例行实验中，玻璃管因故破裂，瞬间注入的空气使得正处于高温状态下的镍靶严重氧化。极端幸运的是，这一次戴维森和革末并没有如往昔一样直接更换新靶，而是决定在高真空和高温下，采用长时间退火过程来清除旧靶表面的氧化层，而就是这一个高温退火过程，无意间让一些相邻小晶粒原子重新排列形成较大晶粒。清理之后再次测量，他们竟发现随着角度变化散射强度又出现了许多个高低起伏的极大和极小值，虽然他们仍无法解释这些复杂数据，但很快意识到使用单晶靶测量

的重要意义。此时，他们的镍靶中含有数目少(约10个)、尺度大的晶粒，但戴维森还未想到可以利用镍靶作为一个光栅让电子波产生衍射，因此实验仍处于半迷茫状态，尚未进入最后揭开谜底的阶段。

1926年暑假，戴维森夫妇前往英国度假，他顺道参加在牛津举行的一个英联邦科学促进会议。会中，戴维森意外听到玻恩在演讲时指出，包括图2中的曲线变化可能是德布罗意物质波的散射结果，于是他们(戴维森、玻恩、弗兰克、哈特利等)在会场进行了深入讨论，并检视戴维森随身携带的新数据。同时在这个会议上，戴维森才首次得悉薛定谔在数月前发表了波动力学论文，因此在返回美国的轮船上，戴维森凭借一本向里查森借来的德英字典，钻研这些新鲜“新奇”论文(论文也是向里查森借来的)，试图了解量子力学。回到贝尔实验室时，戴维森心里已经大致笃定，他明白加速电子束作为一个实验工具，最值得并最迫切需要测量的，并不是镍的原子结构，而是镍晶格的原子排列。这时，Arnold也即刻明白这将是一件非同寻常、具有划时代意义的关键实验，于是除革末之外，他又再指派一位助手C. J. Calbick以及一位手艺精湛的技术员，全力协助戴维森制作仪器和展开新一轮实验。Arnold的高瞻远瞩与无私领导，不禁让人想起“千里马常有而伯乐不常有”，贝尔实验室能够建立和维持尔后在全球科学界的数十年崇高声誉与对尖端人才的强大磁吸效应，岂是偶然！Arnold是芝加哥大学物理博士，论文指导教授是密立根，后者对美国纯粹与应用科学的兴起，举足轻重，功不可没。

图3是1927年戴维森和革末发表于 *Nature* 的两页长文章中的散射结果^[4]，这篇短论文确立了戴维森与G. P. 汤姆孙共享1937年诺贝尔物理学奖。(极坐标)图中显示，电子束由上往下垂直射向一块被仔细固定和对准的镍“单晶”的一个选定晶面，曲线画出了在各个角度测得的(被一组原子平面)弹性反射的相对电子数目(电流)，上X轴和右Y轴旁的数字表示电流收集器与极轴构成的角度。在设计这一个关键实验时，戴维森心中已有很明确的目标，想要利用镍晶格的周期性原子排列及其适当大小的原子平面间距，使入射电子波散射，以产生由布拉格反射造成的衍射现象。每条曲线旁的数字，表示电子束的加速偏压大小，偏压不同时，电子的动量/波长不同，因此曲线形状(散射结果)各异。最值得注意的是，当偏压为54 V时，在50°处测得了一个极大相对电流/电子数，一旦偏离50°，电流很快减小，犹如特定角度处的X射线衍射亮纹。从这一反射角度和已从X射线测得的精确镍原子平面间距，便可准确计算出入射电子波长，并证实其与德布罗意的波长预测高度吻合。接着，戴维森等人将在同一晶面下的镍单晶沿着方位角/极轴旋转360°进行散射实验，他们明显看到镍晶体(面心立方)的三重对称性，进一步确定了电子的衍射行为和波长大小。(注：能量高的X射线能够穿透数百层以上原子平面，犹如含数百条狭缝的光栅，可以形成锐利的衍射亮纹。戴维森使用的低速电子只能穿透少数原子层，就像只含数条狭缝的光栅，因此亮纹强度随角度变化的比较平缓。戴维森—革末实验数据的定量解释牵涉许多细节，请参考文

献[5]。)

3 戴维森—革末实验的启示

天时、地利、人和：在戴维森进行电子束散射实验之前几年，劳厄、Walter Friedrich 和 Paul Knipping 利用晶体散射证实了X射线的(电磁)波动性质，布拉格父子则几乎同时把X射线晶体学建立并发展成为一门新兴且庞大的物质学科。这些研究确立了“原子”是真实存在的物质实体(entity)，而不仅是一种想象或理论中的虚构单元。因此，当1927年实验进入紧锣密鼓的关键环节，戴维森选定一系列不同晶面的镍单晶作为电子束的散射靶时，科学家对镍晶体结构的知识，包括对称性和各方向的原子平面间距等，已极为完备，而且贝尔实验室在技术上也能生长并精准切割极高质量的镍单晶样品供戴维森实验组使用。图4中戴维森和革末手上拿的玻璃管，真空度可以高达至少 10^{-8} 毫米汞柱(约 10^{-11} 大气压)。就是这个看似不起眼的一百年前的仪器装置，测出了(低速)运动电子的波长，如果没有他们这一系列非常精致、详尽又耗时的实验，薛定谔方程或许要多等待些年后，才会被科学界严肃看待。图5是戴维森—革末实验玻璃管中的原始镍单晶靶座与散射仪的照片，这是深思熟虑设计的戴维森加上贝尔实验室巧夺天工的技术人员，密切合作制作出来的精湛工艺结晶。1927年论文(图3)发表后约半年，适逢后来被当代科学史家视为宣告量子力学诞生的第五届索尔维会议在比利时召开，会中戴维森—革末实验获得玻尔、德布罗意、玻恩、海森伯、朗缪尔和薛定谔等人的一致高度赞扬，认为该实验不仅证实了波动力

学的一般概念，也验证了波动力学方程式的正确无误。从1900年普朗克提出黑体辐射公式至此，可谓已瓜熟蒂落，量子力学正式成为了一门物理科(显)学，而戴维森—革末实验起了临门一脚的作用。

欧洲电子波散射实验的功亏一篑：1924年德布罗意提出物质波长方程式 $\lambda = h/P$ 之后，其中 λ 为波长， h 为普朗克常数， P 为(微观)粒子动量，他也曾提议可以使用金属晶体让电子产生散射来验证，但起初并未引起资深科学家的重视。反而，欧洲好几位年轻科学家很快就有了利用惰性气体或金属薄膜来检验电子衍射的想法，并且付诸实验。只可惜一方面由于他们的实验设计、操作能力和测量技巧还不够纯熟，也未能获得他们各自的指导教授，如Maurice de Broglie(德布罗意的哥哥，一位X射线实验学家)、卢瑟福和弗兰克等的鼓舞以及在仪器设备上的全力支持，因此进展有限，不了了之，最终让意志坚定的戴维

森和装备一流、又有前瞻性领导眼光的贝尔实验室摘得了桂冠。(注：戴维森使用的低速电子的波长，可写为 $\lambda = \sqrt{150/V} \text{ \AA}$ ，电压 V 的单位为伏特。一个有趣的假设性问题是，如果德布罗意的哥哥积极投入探测物质波长的实验，他们两人会不会成为一对最早，且是迄今为止唯一可能获得诺贝尔物理学奖的兄弟档?)

这几位开创量子科学的法国、



图4 戴维森(右)和革末(左)，拍摄于1927年(取自 Wikipedia)

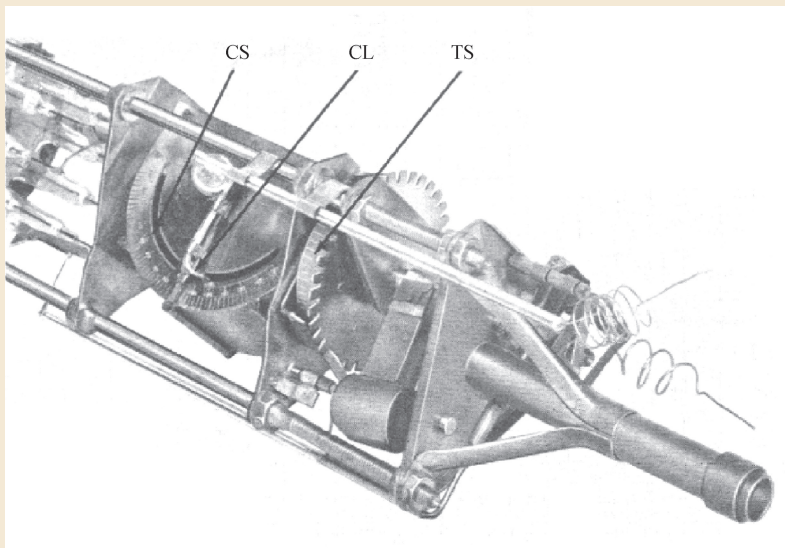


图5 戴维森—革末实验的原始散射仪照片。TS用于旋转镍单晶靶的方位角，CS用于把电子收集器旋转到不同散射度，CL是电子收集器^[5]

英国和德国宗师们未能及早严肃看待，并鼎力支持他们实验室的年轻研究员去大胆测试德布罗意假说，似乎反映了在科学发展进程中人性可能带来的局限与难题，但又不可简单一概而论。这些欧洲著名实验室失去先机，等到(或许在1926年秋牛津科学促进会议之后)想要积极追赶时，戴维森实验组已经“走得很远了”。这个大西洋两岸竞争的故事，带给我们一些看法和启示，试说明如下。

(1)这几位大师们各自随时都有“重要”课题在手，因此不愿意轻易调整或改变实验方向及资源，以免减缓既定研究课题的进度。另外，卢瑟福似乎还认为当时剑桥大学卡文迪许实验室的真空技术，难以支撑进行电子束散射实验所需的极高真空度要求，而这点正是贝尔/工业实验室得天独厚的优势。所以我们几乎可以说，若没有真空技术的发明和持续改良，也就没有近代物理的诞生。此外，戴维森—革末实验也要求极高的电流分辨率。

(2)自然科学的本质常在于创新，老手虽然功力更深，更加精进，但新手则更有改变方向的勇气与冲劲。不过，这点似乎不太适用于戴维森，因为如前文所说，图3的结果发表时，他已经46岁了。另外，密立根也是年近40岁才决意展开前瞻科学课题的探讨，他的油滴实验开始于41岁时，光电实验则开始于46岁时，都早过了所谓“青年才俊”之龄。

(3)汤川秀树于1929年大学毕业后的几年间，觉得量子力学已经发展成熟，他的起步太晚了，因此有了研究原子核和宇宙射线的想法，因为他觉得很少有人做这样的研

究。到了1938—1939年，其他科学家也开始进行各种类似的研究，但他胸有成竹，认为“我已经沿着我认为可能的路线走得很远了”。戴维森参加牛津会议后，应已意识到了欧洲的数个实验组将会积极投入验证德布罗意波长，因此他说服Arnold首肯支持，又将实验结果(图3)刻意发表在*Nature*杂志而非美国期刊，他的十年辛苦终于开花结果。这让我们想起了(唐)杨巨源《城东早春》绝句：“诗家清景在新春，绿柳才黄半未匀。若待上林花似锦，出门俱是看花人。”费曼说：“如果你的研究方向和其他人一样，那么就需要超越一大票人。”汤川秀树则早已在自传《旅人》中写道，他要做一个“陌生土地的遍历者，荒野开拓者”。

(4)德布罗意物质波理论一经提出，立即获得爱因斯坦的肯定与支持。1925年初，戴维森和革末在因高温退火意外获得大晶粒的镍靶后测得的新数据，曾引起玻恩和弗兰克的兴趣，弗兰克因此提议可让电子束入射到多晶金属薄膜并研究其散射图形。可惜弗兰克指定了一位刚来到哥廷根大学的新生埃尔泽塞尔(Walter Elsasser)进行这项实验，虽然埃尔泽塞尔兴致高昂，对德布罗意的预测充满信心，但因经验不足，未能做出明确结果。两年后，G. P. 汤姆孙使用同样的方法，测得了如同X射线衍射般的电子衍射图形。然而，科学发展的轨迹毕竟是曲折蜿蜒的。当德布罗意物质波理论一经发表，最先(略早于或与玻恩同时)想到图2可能就是电子波衍射现象的，应是21岁的埃尔泽塞尔。他很快向爱因斯坦解释他对图2及戴维森早期数据的理解，此时盛名已如日中天的爱因斯坦回

答说：“年轻人，你正坐上了一座金矿。”

4 结尾

戴维森去世后，曾经担任贝尔实验室研究总监和董事会主席的Mervin J. Kelly写了一篇30页长的戴维森传记^[6]，文章内容温馨且对戴维森充满敬意，除了描述戴维森的生平与详尽解说戴维森—革末实验的来龙去脉，他更赞誉说戴维森可以被称作“贝尔实验室基础研究之父”，这句话是对戴维森的极崇高礼赞。自戴维森首开记录迄今，贝尔实验室已经获得了10个诺贝尔奖及5个图灵奖。戴维森自己回忆说，他的成功是因为他从密立根和里查森两人那里学到了“物理学家的观点、他的心态习惯、他看待事情的方式”。薪火相传，革末则回忆说，他从戴维森身上学到的太多了，包括如何做实验、如何思考这些实验、如何写出这些实验(结果)，以及了解别人曾经做过哪些相关工作了，等等。

致谢 感谢杨仲准教授、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] 林志忠. 物理, 2024, 53(7): 496
- [2] Gehrenbeck R K. *Physics Today*, 1978, 31: 34
- [3] Davisson C, Kunsman C H. *Science*, 1921, 54: 522
- [4] Davisson C, Germer L H. *Nature*, 1927, 119: 558
- [5] Calbick C J. *Physics Teacher*, 1963, 1: 63
- [6] Kelly M J. Clinton Joseph Davisson: A Biographical Memoir. National Academy of Sciences, 1962
- [7] Russo A. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1981, 12: 117