

施特恩—格拉赫实验其人其事

林志忠[†]

(台湾交通大学物理研究所及电子物理系)

2020-08-19收到

[†] email: jjlin@mail.nctu.edu.tw

DOI: 10.7693/wl20210207

如果你想从整体吸取力量，必须从细微之中看到整体。

——歌德

1 引言

1922年2月7日晚上至8日清晨，德国中部城市气温低寒，下雪，法兰克福大学施特恩—格拉赫实验(Stern—Gerlach experiment)首次成功测量到了电中性银原子束在非均匀磁场中的双重分裂现象，明确印证了微观尺度世界的量子化特性本质，这是近代物理学史上的重大一笔！

实验是由格拉赫(Walther Gerlach, 1889—1979)独自进行的，因为施特恩(Otto Stern, 1888—1969)此时正短暂地在德国北部的Rostock大学任教(1921年9月至1922年12月)，遇假期时才会回到法兰克福与格拉赫讨论数据，并进一步修正和改善实验设计。根据格拉赫当时的一位博士生Wilhelm Schütz回忆说，格拉赫是一位夜猫子，喜欢晚上9点进实验室，一直工作到第二天早晨。但采用这种工作时间的部分原因，也可能是出于当时的实验条件相对简陋，以及实验室空间狭小的限制；而且实验过程必须持续运转数个小时以上，才能在冷凝玻璃盘上(a condenser glass plate)积淀出足够多数量的银原

子，以便可以清楚显影。在漫漫长夜里，如果仪器运转顺利，尤其是真空系统与装置的准直都维持正常平稳，格拉赫便会在一旁阅读文献、撰写论文，或是准备上课讲义，与今日的科学研究者的专注工作形式无异。

2 分子束方法的庞大威力

1911年，法国科学家Louis Duno-yer首度演示钠原子在真空中的运动，的确有如光子般沿直线前进，证实了麦克斯韦气体动力论的基本假设。这个分(原)子束方法/技术随后被施特恩改善、发展并广泛应用到极致，用它取得了许多项登峰造极的改写近代物理学的成就。分子束方法的原理很简单，在高真空中，把一种金属(如钠、银、铋等)在一个高温腔里加热至其沸点以上，再让四处喷射的金属蒸气(原子)从一个小孔或细长狭缝中飞出。让飞出的原子连续通过两个开有小孔或狭缝的准直挡板，就可以得到一束速度恒定的稀疏(低密度)原子，而且这些电中性原子都处于自由状态，彼此远离，没有碰撞，也不与真空玻璃管壁碰撞。因此，每

一颗原子都拥有同样的线性动量¹⁾。由于原子束的速度可以精确调控，因此施特恩马上想到了利用这项技术，在1920年验证了麦克斯韦—玻尔兹曼分子速率分布(Maxwell—Boltzmann distribution of molecular speeds)的理论函数。紧接着，他与格拉赫合作，在1922年检验了角动量空间量子化的理论预测——当时许多著名物理学家都认为空间量子化只是一种理论猜想(冥想)，或一种数学符号而已，无关物理真实。此后直到1933年，从汉堡大学主动辞职，移民美国的约10年半期间，施特恩又使用分子束方法进行了至少以下几项开拓性实验，包括：(1)利用晶体表面散射(衍射)，证实了氦原子及氢分子的波动性，并拥有德布罗意(Louis de Broglie)预测的物质波长；(2)发现并测量了质子、氘及其他数种原子的磁矩大小。由于质子质量比电子质量大了约2000倍，因此磁矩信号相对微弱了约2000倍，这是一项很艰难又精巧的实验²⁾。这些精巧实验和其不朽结果，每一项都值得被写进量子物理学史或是教科书中。

1) 研究原(分)子内在性质的另外一个重要工具是光谱学，它测量能阶跃迁过程中的光子吸收或放射，因此牵涉到激发态，测量的是两个态之间的物理量变化。分子束方法中等速度前进的电中性原(分)子，则处于最自然的状态，即基态，因此测量的是一个特定态的物理量绝对值。

2) 施特恩晚年回忆说，当他和助手准备进行测量质子磁矩大小时，受到许多理论学家同僚的“喝叱”(we were strongly chided by the theoreticians)，因为他们认为他们早已知晓答案了。

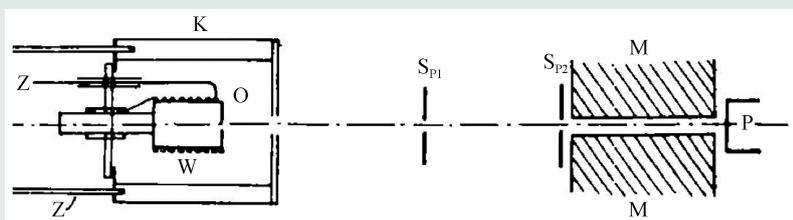


图1 施特恩—格拉赫实验装置示意图。O代表高温腔， S_{P1} 及 S_{P2} 代表狭缝1和2，M代表非均匀电磁铁，P代表由干冰或液态空气冷凝的玻璃沉积盘。在后期的实验中，狭缝的长度为800 μm ，宽度为30 μm (图片取自 <https://www.mediatheque.lindau-nobel.org/research-profile/laureate-stern>)



图2 施特恩做实验，拍摄于汉堡大学时期(1923—1933)。施特恩做实验时，经常雪茄不离口。有一个故事说，当实验结束，格拉赫拿出冷凝玻璃盘时，施特恩一手持盘凝视，另一手拿着雪茄，竟看到了银原子沉积；原来是因(劣质)雪茄中含有多量的硫，银被烟熏，反应成乌黑色的硫化银(Ag_2S) (图片来自网络)

3 施特恩—格拉赫实验的精细仪器装置与实验参数

如今，许多师生听到某项改写了科学史的旷世杰出实验时，脑海里常会不自觉地浮现出一个壮观宽敞的实验室和一台庞大闪亮的昂贵科学仪器的景象。但是，施特恩—格拉赫实验的装置，完全不是这回事。施特恩深切认识到，寻求当前最基本科学问题的明确解答，必须通过严谨技术细节，进行工匠/工艺式日复一日的操作。图1是分子束方法实验装置示意图：从高温腔

(O)到第一个狭缝(S_{P1})的距离约为3 cm，第一狭缝与第二狭缝(S_{P2})的距离约为3 cm，非均匀电磁铁(M)的长度为3.5 cm，P为冷凝玻璃盘。也就是说，整个仪器关键部分仅约12 cm，是一只圆珠笔的长度。如此袖珍的仪器主要应是受限于当时的真空技术，及电磁铁南北两极之间的可用空间大小。图2是一张历史照片，从照片中施特恩的身材，可以对比出仪器装置的大概尺寸³⁾。

高温腔中的银原子(蒸气)被加热到约1000 $^{\circ}\text{C}$ ，其均方根速度约为540 m/s。等速直线前进的电中性个别银原子对准通过狭缝1及狭缝2后，进入非均匀磁场。如果银原子拥有磁性，带有磁矩(μ)，我们先假设其大小约为一个玻尔磁矩(μ_B)，即 $\mu \approx \mu_B$ ，以进行下面估算。通过非均匀磁场(H)后，每一个银原子会各自受到一个垂直(假设为z)方向的磁力 $F_z = \mu_z \times (\partial H_z / \partial z) \approx \mu_B \times (\partial H_z / \partial z)$ 。在施格两人的实验中，非均匀磁场梯度约为 $\partial H_z / \partial z \approx$

10 T/cm⁴⁾。因此，银原子的水平(假设x)方向动量(P_x)约为49 a.u. (一个动能为13.6 eV的电子，线性动量为1 a.u.)，通过电磁铁后获得了约 ± 0.3 a.u.的垂直方向动量(P_z)，并因之产生约 $\pm 108 \mu\text{m}$ 的垂直方向偏移。所以，垂直与水平动量分量的比值，或银原子束路径上偏或下偏的角度为 $P_z / P_x \approx \pm 0.006$ ，这是一个非常微小的变化量。

实际操作上，从高温腔小孔射出的银原子束必须准直通过狭缝1及狭缝2，并从图1中显示的上半块(假设为南极)非均匀电磁铁的下沿平行前进，才能沉积在冷凝玻璃盘上。由于银原子束密度低，银原子平均自由程大于电磁铁长度，因此实验测量要维持稳定几个小时以上，沉积处的银原子数量才足够在显影后，从光学显微镜下分辨出路径的影像结构，是否呈现出如经典理论预测的连续弥散状，或如量子理论预测的双重(多重)分裂。不仅如此，加热到1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上的高温腔、狭缝1、狭缝2，和(由干冰、丙酮或液态空气)冷却的冷凝玻璃盘全部都要安装在双层玻璃真空室中(10⁻⁵ torr)，因此需要很好的真空技术，并且在持续数小时以上的实验过程中，玻璃真空室、接点或密封处都不能熔化、破裂或漏气。还有另外一项挑战是，实验进行时，双层玻璃真空室必须使用液态空气冷却。幸而，拜20世纪早期灯泡工业之赐，那时期德国工业的真空泵浦技术，如能精心采纳和运用，已足可应付这些严苛实验条件要求。

以上种种精密细节，以及实验

3) 由于实验不断的改善和精进，各组件的尺度以及每次的实验设计和参数，都可能有细微修正或调整，本文不赘述。下段仅做数量级估计，用意在于显现施特恩—格拉赫实验精巧、细心和耐心等技术与工艺特质。

4) 实际操作上，如何精确校正磁场大小及非均匀磁场梯度是一个重要问题，本文从略。

者的一丝不苟与任劳任怨，正是施特恩—格拉赫实验的实做部分，是最令人佩服与赞叹的地方。施特恩—格拉赫实验不仅证实了角动量空间量子化，还精确测量出了原子磁矩(玻尔磁矩)的大小。这是一项划时代的史诗般的实验，其设计与结果，是对大自然奥秘的直接探究，让微观世界的本征特质无所遁形。在实验结果出炉之前，无人确知答案将指向何方(连续的或分裂的路径)，因此这是一项拍板定案的“美丽实验”！(关于“这是一项很美的实验”的说法，请参考林志忠《棱镜与摆锤：探究科学实验之美》^[5]。

1922年2月8日早上，经过一夜的顺利沉积，格拉赫小心翼翼地破开真空室，拿出冷凝玻璃盘冲洗。他将薄薄一层难以目视的沉积银原子反应成乌黑色的硫化银(Ag₂S)，首次证实了电中性金属原子在磁场中的双重分裂现象——这时，施特恩远在Rostock大学任职。当天，格拉赫就寄给玻尔一张明信片，并附上实验照片(图3)。照片明确表明，在未加磁场时，银原子朝直线前进，在狭缝正前方沉积，(显影后)形成一道细长暗痕(约1.1 mm长，60—100 μm宽，图3左图)。加上非均匀磁场后，银原子的路径分裂成左右两道，而狭缝正前方(中间空白处)则无丝毫沉积(图3右图)。右图中，暗痕在上下两端重合，这是因为通过上下两端的银原子的路径已落在非均匀磁场之外，因此未受到任何磁力作用而直线前进之故——在这次测量中，格拉赫使用了一个800 μm长30 μm宽的铂制狭缝。反之，右图那道暗痕中间处的银原子是因为靠近磁场的最非均匀点($\partial H_z/\partial z$ 值最大处)，所以受力最强，偏折最多。(造成两道

分裂暗痕宽度有别的起因，有一部分可以归咎于从高温腔射出的银原子速度值有些微分布。)

4 实验经费拮据与同侪相挺助力

黄金三角组合：施特恩的学术训练背景是理论物理化学家，他擅长于选择寻求当前重大科学问题的解答，并“用大脑设计实验及规划仪器装置”，有“思想实验学家”或“实验中的理论学家”(an experimenting theorist)的味道。格拉赫则是一位经过正统训练的干练实验物理学家，他双手精巧，心思细腻，而且乐于全心全意投入，并与施特恩搭配无间。甚至在施特恩离开法兰克福之后(1921年9月)，他还独自承担实验工作，并得到划时代的观测成果。其实，读到Dunoyer的论文之后，格拉赫在1912年就对分子束方法产生极大兴趣，并且也开始有了设计大梯度非均匀磁场的念头。此外，还有一位年轻的、手艺精湛的技术员Adolf Schmidt，他乐于配合实验的无止境严苛需求，不断为施格两人制作和更换仪器零件(再交由格拉赫组装)。而实验装置的极专业性准直技术与技巧(需对准到10 μm以下的误差)，以及小体积非均匀电磁铁的设计，也获得了玻恩(Max Born)的继任者Erwin Madelung教授的关键性建议、协助与指引(1921至1949年间，Madelung教授担任法兰克福大学理论物理研究所所长)。

因此，施特恩—格拉赫实验能够完成于1920年代初期的法兰克福，事出有因。显然，

卓越学术成果常是群体脑力及体力密切合作的果实，而不是某位倚剑睥睨长空的孤独天才的偶然个人秀。即便是天赋异禀的不世出天才爱因斯坦，假如他的学术生命不是成长在20世纪初叶的德国/欧洲，有洛伦兹(Hendrik Lorentz)、普朗克(Max Planck)、能斯特(Walter Nernst)、Emil Warburg等多人的一再提携，甚至三顾茅庐，以及优秀数学家朋友在几段关键时刻的无私鼎力相助，他应也难以完成光电效应、辐射(光)的波粒二象性及相对论等卓越理论。

经费来源：施特恩—格拉赫实验主要进行和完成于1921至1922年间，这时期第一次世界大战刚结束不久，德国经济萧条，通货膨胀问题严重，大学的研究经费短缺。为了支持这项事后成为近代物理学里程碑实验的进行，玻恩不但把他主持的(规模不大的)理论物理研究所的实验室、金工厂及技术员全部归施特恩使用，他还亲自在法兰克福大学的最大讲堂里讲授一系列的相对论公众演讲，并收取入场费用——那几年，施特恩是玻恩的助手，而众多民众正痴迷于爱因斯坦的爆起大名及相对论理论的玄妙。但是演讲收入毕竟有限，所以玻恩

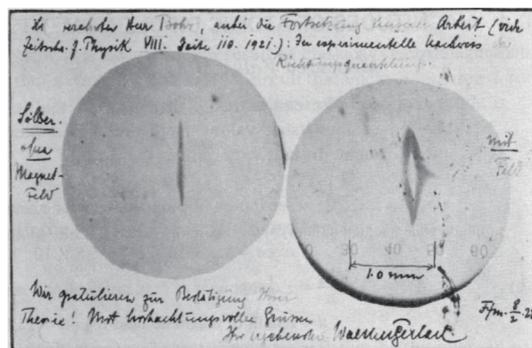


图3 1922年2月8日，格拉赫寄给玻尔的明信片，右图下方有格拉赫的签名及日期。请注意右图中有格拉赫标记的1 mm宽度(图片来自网络)



图4 2002年2月,实验完成80年之后,在当年施特恩-格拉赫实验完成的法兰克福大学旧物理馆进门处竖立的纪念牌匾(图片取自<https://physicstoday.scitation.org/doi/full/10.1063/1.1650229>)

后来又想方设法,竟意外幸运地从一位法兰克福出身、已移居美国纽约的德籍企业家,募集到了一笔可贵资金,让实验顺利完成。再者,制作非均匀电磁铁的经费,则是爱因斯坦使用由他掌管的柏林威廉皇帝学会物理学研究所(Kaiser Wilhelm Society for the Advancement of Science)的经费资助的⁵⁾。此外,制作磁铁所需要的材料以及不断消耗的液态空气等,也获得了法兰克福当地私人公司的赞助。所以,天时、地利、人和,施特恩-格拉赫实验的成功显然不是来自一时碰巧的运气,更难来自其他工业实力及科学知识贫瘠的土地!

5 人格特质

由于纳粹政府逐渐掌权,施特恩(犹太人出身)在1933年8月主动从

汉堡大学辞职,移居美国,从此也结束了他持续了约15年的分子束方法的科学发现黄金岁月。第二次世界大战结束次年,施特恩提早从宾州匹兹堡Carnegie Institute of Technology退休,此后他几乎年年搭船⁶⁾访问欧洲,参加会议,及会见如泡利(Wolfgang Pauli)⁷⁾等老朋友。他尤其喜欢停歇在瑞士苏黎世,但是却几乎终生不愿意再正式踏上德国的土地。去世前一年,他参加了1968年8月的Lindau Nobel Laureate Meeting,这可能是他唯一的一次返国公事行程。每次回到欧洲时,施特恩时常邀请朋友,有时候甚至支付他们的行旅费用,到瑞士重聚或是度假。因为战后许多德国人的生活条件极端困难,所以一旦邮路重开,施特恩也时常从美国寄送食物及生活必需品帮助旧友。他还寄了衣服给劳厄(Max von Laue),因为劳厄的房子在战争期间被炸毁了。而由于对纳粹政权邪恶作为的鄙视,施特恩退休后更拒绝领取德国(汉堡市)政府积欠他的年金。施特恩去世后,他的昔日资深同僚、同辈(包括格拉赫)、博士后研究员、学生、助理及技术员,对他的人格特质的一致评价是:施特恩心胸开阔,完全值得信赖。1933年冬,在离开德国之前,施特恩特地亲自安排完成他指导的助手Friedrich Knauer的特许任教资格程序,这是他个人的一件小事,却是密切跟随他多年的

Knauer的一件大事。

6 诺贝尔奖及身后荣誉

施特恩一生只发表了50多篇期刊论文,但一篇又一篇掷地有声,影响深广。1944年,在被提名多达82次之后,施特恩终于因其对发展分子束方法及发现质子磁矩(for his contribution to the development of the molecular ray method and his discovery of the magnetic moment of the proton)的贡献,而一人独得了1943年度的诺贝尔物理学奖。至于他的亲密搭档,格拉赫本人并不赞成纳粹分子的狂热激进,不愿意批判爱因斯坦,也不参与排犹(犹太科学)运动。但是或许因为1944年起,格拉赫担任德国原子核计划负责人,因此他被排除在诺贝尔奖名单之外。而且,诺贝尔奖委员会似乎有备而来,在公布的简短获奖理由中,完全未提及施特恩-格拉赫实验。战后,格拉赫为德国科学的重建,及倡议禁止核武器发展,做出了许多贡献。根据诺贝尔奖委员会的解释,施特恩之所以延误许多年才获奖(1934年至1940年的诺贝尔奖,因战争之故并未颁发),有两个理由:(1)索末菲(Arnold Sommerfeld)已在1916年预测了角动量空间量子化,因此施特恩-格拉赫实验的测量结果不算新颖;(2)施特恩在1933年测量到的质子磁矩大小,与狄拉克(Paul Dirac)的理论预测结果

5) 爱因斯坦当时担任所长,他与施特恩是旧识。施特恩于1912年获得博士学位后,前往布拉格(德国)大学,成为爱因斯坦的第一位博士后研究员,次年爱因斯坦就任苏黎世大学新职,他邀请施特恩一起前往。施特恩说,是他的冒险精神,使他决定跟随爱因斯坦工作。他说第一次到办公室面见爱因斯坦时,爱因斯坦的穿着像是一位意大利修路工人。

6) 一战期间,施特恩志愿入伍,担任气象观测官职务,在一次任务中他乘坐的气象观测飞机被俄军击落,虽幸免于难,但他此后似乎就避免搭乘飞机。

7) 据说施特恩很喜欢看电影,常与泡利同往,但需泡利告诉他这部电影是否先前已经看过了。施特恩晚年在美国加州柏克莱的一间电影院心脏病突发,几天后就过世了。

及拉比(Isidor Isaac Rabi)在1934年的测量结果不符。吊诡的却是,索末菲和狄拉克的理论是错的,而拉比的实验数据则误差太大,反而是施特恩在纳粹主义分子把刀子架在他们的脖子上的压力下,匆促离开汉堡大学之前提早结束的实验值,最为接近当今广被接受的正确值。

随着时代巨轮的前进,为了纪念施特恩—格拉赫实验对于近代物理发展的史诗般的贡献,德国物理学会于1992年设立了一项施特恩—格拉赫勋章(Stern—Gerlach Medal),以表彰重大的实验物理成就。该学会另外一项用以表彰重大理论物理成就的勋章,则以量子物理之父普朗克的名字命名为普朗克勋章(Max Planck Medal)。

7 科学概念汇入史册

二战期间,盟军多年猛烈轰炸法兰克福,当年进行施特恩—格拉赫实验使用的仪器装置、实验室笔记本、原始数据等等,都焚烧一光。幸而,自然科学与艺术作品有截然不同的本质,绘画、书法、雕塑等艺术传世作品,一旦毁损了就毁损了,灰飞烟灭,无可替代。但是自然科学——空间量子化及质子磁矩——的概念和测量结果,一旦确立了,就融入了科学知识的大海及科学史的长河里,历久不衰,将为数代师生所学习、赞赏、尊奉,并进一步检验。

8 尾声

2002年2月,法兰克福大学在当初施格两人进行实验的建筑物门口竖起了一面纪念牌匾(图4),并且成立了一个施特恩—格拉赫实验物理中心(Stern—Gerlach Center for Experimental Physics)。纪念牌匾上施特恩头像在左,格拉赫头像在右,被他们开发出的分子束方法示意图隔开,隐喻了他们证实的空间量子化的物理真实性。2014年,欧洲物理学会指定施格两人进行实验的旧物理馆为科学史景点,是对他们的极高推崇。

后记 本文取材于文献[1]—[4]和其他资料。在20世纪初叶的量子论/量子力学发展史上,英雄辈出,流传下来许多精彩绝伦的故事,理工师生和其他行业人士不但百听不厌,更有很多人对其中的事物及情节耳熟能详。但是,教科书和科普文章中关于施特恩—格拉赫实验的来龙去脉的叙说与阐释却不多见,施格两人名姓及事迹在科学群体间甚至显得陌生,实在令人遗憾,遑论施特恩使用简洁、直观、明确的分子束方法,一再成就了其他多项杰作。这几年来笔者在讲授《近代物理》课时,这些被众人遗忘又令人感慨浩叹的科学历程,一直萦绕在心头,如今总算了却一件心事,希望经由本文,读者对于实验物理及科学发现的本质,能获得一丝领会及启发。

参考文献

- [1] Schmidt-Böcking H. Europhysics News, 2019, 50(3): 15
- [2] Friedrich B, Herschbach D. Physics Today, 2003, (12): 53
- [3] Toennies J P, Schmidt-Böcking H, Friedrich B *et al.* Annalen der Physik, 2011, 523(12): 1045
- [4] Serge E. Otto Stern: A Biographical Memoir. National Academy of Sciences (U.S.), 1973
- [5] 林志忠. 物理, 2008, 37(10): 749



微弱信号检测 半个世纪的骄傲

Model 7210
多通道锁相放大器

全球唯一
通道之最



Model 197 光学斩波器



生产商: 阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司
电话: 010-85262111-10 传真: 010-85262141-10
Email: info@ametec.cn
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商: 北京三尼阳光科技发展有限公司
电话: 010-65202180/81 传真: 010-65202182
Email: sales@sunnytek.net
网址: www.sunnytek.net