

兹游奇绝 穷理有容

——忆 Stephan von Molnár 教授

李永庆[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2020-11-30收到

[†] email: yqli@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210108

磁性半导体是半导体物理与磁学和微电子学的一个交叉领域, 相关研究不仅产生了许多重要的基础物理发现, 而且还可能带来革命性的信息技术。Stephan von Molnár 教授是磁性半导体领域的开创者之一, 并深耕于此近60年。本文从受其指导的研究生的角度回顾 von Molnár 教授的学术贡献, 分享对他言传身教的体会, 并试图解释为什么他能在长达一个甲子的时间里一直保持对科研的热忱。

1 引子

2020年11月17日, 磁性半导体物理研究的开拓者, Stephan von Molnár 教授, 在美国佛罗里达州塔拉哈西市走完了他85年绚丽多彩的传奇人生, 离开了他深爱着的这个世界和众多深爱他的人。凡是接触过他的人, 哪怕只是短暂的交谈, 都能感受到他不同寻常的个人魅力。Stephan 热情、友善、幽默和富有艺术气息, 被几乎所有认识他的人津津乐道。作为他培养的一名研究生, 我能有机会近距离感受他酸甜苦辣的科学人生和处世态度, 不能不说是一件极其幸运的事情。这些体验随着自己年龄的增长愈发珍贵, 不知不觉中早已把 Stephan 视为人生楷模。

1935年6月26日, Stephan 出生在德国, “二战”结束后移民美国, 他的早年经历波折而奇特(请见本期

赵建华的文章)。1960年, 具有艺术天赋的他最终选择攻读物理。1965年博士毕业后, Stephan 来到位于纽约的 IBM J. Watson 研究中心工作, 对第一代磁性半导体的输运性质进行系统研究。他的学术才华很快绽放, 制备出了首个磁性隧道结^[1], 发现了巨负磁电阻效应^[2], 并与 Tadao Kasuya 一起提出了磁极化子的概念^[2-4]。1970年, Stephan 开始担任合作现象研究组的主管, 并继续在磁性半导体及相关领域深耕, 在关于金属-绝缘体相变和磁极化子的研究中成就斐然^[5, 6]。1989年, Stephan 成为 IBM 新结构部门的高管, 发明了霍尔差分磁强计^[7], 参与了首个 III-V 族稀磁半导体 (In, Mn)As 的发现^[8, 9], 为十年后磁性半导体研究的全球性热潮奠定了基础^[10]。

20世纪90年代初, IBM 因在个人计算机及操作系统的发展决策上出现致命失误而面临巨大困境。许多在 IBM 工作的科学家前往高校工作, Stephan 也成为其中的一员。1994年, 他来到佛罗里达州立大学 (FSU) 物理系任教, 并担任材料研究和技术中心 (MARTECH) 主任。已经接近退休年龄的他继续保持了对科研的热情, 利用有限的资源, 为 MARTECH 建立了一套涵盖低维材料制备、样品微纳加工、结构和物性测量的设施。Stephan 组织了几个研究小组在自旋电子学领域开展

研究, 并做出了不少有国际影响力的工作。虽然 Stephan 在这个阶段的研究涉及不少新兴主题, 但他对磁性半导体的兴趣从未间断, 直到今年还与他在 FSU 的长期合作伙伴熊鹏教授合作发表了有关论文^[11]。

Stephan 攻读博士学位期间的一个主要工作是利用磁共振方法研究磁性半导体 EuS^[12]。从那时算起, 他对磁性半导体的研究接近60年, 深入研究过全部三代磁性半导体, 亲身经历了该领域的整个发展历史。我读研究生期间, 因为没有从事组里大多数成员主攻的半导体自旋电子学方向, 对 Stephan 在这个领域的学术地位缺乏深入了解, 但知道他曾在一个5人专家小组里担任主席, 负责调研全世界自旋电子学领域的发展动态, 并向美国政府提交长篇报告^[13]。从2013年起, 我开始对第一代磁性半导体材料 HgCr₂Se₄ 进行研究^[14-16], 在仔细阅读了 Stephan 关于磁性半导体的许多论文之后, 才明白为什么 Stephan 在半导体自旋电子学领域赢得那么多的推崇和尊重。

2 主要学术成就

磁性半导体研究是 Stephan 学术生涯最为核心的内容, 他在这方面的成就也是理解他在其他方向的工作以及他科学精神的关键所在。因此, 有必要回顾一下 Stephan 在这个领域做出的几项具有深远影响

的工作。

(1) 磁性隧道结。1967年, Stephan与IBM的同事Phil Stiles和Leo Esaki报道了世界上第一个磁性隧道结^[1]。Stephan使用薄膜沉积方法制备了金属/EuSe异质结, 巧妙地利用磁性半导体EuSe表面肖特基势垒高度对磁化状态的依赖, 展示了改变温度或磁场能大幅调控场发射电阻(即Fowler—Nordheim隧穿电阻)。这被Hideo Ohno等人认为可能是历史上第一个自旋电子学器件^[17], 原因是这个器件在铁磁状态下的隧穿电流因势垒的自旋过滤效应而发生自旋极化。

(2) 巨负磁电阻效应。1967年, Stephan和S. Methfessel在研究Gd掺杂的EuSe时发现, 施加1 T的磁场就能使样品电阻减小超过1万倍, 他们把这个现象称为巨负磁电阻^[2]。1993年, 德国一个小组在锰氧化物中也观察到类似的负磁电阻^[18]。后来, 锰氧化物中的这个现象被命名为庞磁电阻, 引起了非常广泛的关注。1999年, Stephan在一篇综述文章中介绍了这两类体系中负磁电阻之间的联系^[19]。

(3) 磁极化子。为了解释在掺杂EuSe中观察到的巨负磁电阻, Stephan与Kasuya提出了磁极化子的概念, 并用它解释了其他第一代磁性半导体的输运性质^[2-4]。1987年, Stephan与David Awschalom合作, 利用光学激发结合磁性测量方法研究了第二代磁性半导体(Cd, Mn)Te, 获得了存在局域磁极化子的有力证据^[6]。

(4) 磁场驱动的绝缘体—金属相变。1979年, E. Abraham和P. W. Anderson等人发表了著名的标度理论^[20], 预言三维体系在发生金属—绝缘体转变时电导率连续变化, 这

与N. F. Mott之前预言的电导率跳变互相矛盾。虽然很快有实验报道支持标度理论, 但这些工作不能排除是否有电子—电子相互作用的影响。1983年, Stephan在相互作用效应可以忽略的磁性半导体 $Gd_{3-x}S_x$ (x 表示Gd空位量)中, 利用磁场诱导绝缘体—金属相变, 发现电导率从金属态连续线性变化至绝缘态, 而Mott预言的最小金属电导率并不存在^[5]。该实验提供了明确支持标度理论的证据。

(5) III—V族稀磁半导体。1989年, Stephan与IBM的同事Hiro Munekata和Hideo Ohno等人合作, 利用分子束外延方法(MBE)制备出了第一个III—V族磁性半导体(In, Mn)As, 指出只有低温生长的样品才能获得均匀相, 而高温生长则会带来铁磁性的MnAs团簇^[8]。1992年, 他们又成功制备出铁磁(In, Mn)As, 并确认铁磁性来自Mn的均匀掺杂相^[9]。Ohno回到日本后, 1996年用低温MBE方法制备出铁磁性的(Ga, Mn)As^[21], 并很快使其居里温度达到110 K^[22]。作为第三代磁性半导体的代表性材料, (Ga, Mn)As引发了磁性半导体的全球性研究热潮^[10]。值得一提的是, 在2000年后追求室温稀磁半导体的努力中, 许多研究小组被样品中Stephan及合作者早就仔细研究过的铁磁团簇问题所困扰^[23]。

3 传道授业

与Stephan出色的学术成就相比, 他的个人魅力同样值得称道和怀念。他善于表达, 感染力强, 每逢小组成员取得一些进展, 哪怕是些小的技术性进步, 他总是毫不吝夸奖。Stephan的嗓音清晰并富有磁性, 生动的面部表情会令被表扬者顿觉此前所有辛苦都很值得, 并使

他们对未来的工作信心倍增。即使没什么特别的事情, 他幽默的语言和夸张有趣的肢体动作也不时为实验室带来轻松和谐的气氛。

Stephan尊重关爱每一位小组成员。但凡有客人参观实验室, 他总不忘介绍所有在场的人, 语气中带着自豪。有一次, Stephan邀请Phil W. Anderson教授来FSU物理系做Mott讲座。演讲结束后, 他带客人参观实验室, 我恰好在那里, Stephan就把我介绍给Anderson教授, 并让我讲述自己的研究工作。我有些吃惊, 因为那时我还不能用英语进行流畅的学术交流。看着Stephan鼓励的目光, 我开始了有些紧张的讲解。好在Anderson教授表现出极大的耐心, 安静地听完我的介绍, 并且还提出了建议, 可惜当时我没能记录下来。

Stephan虽然对年轻一代宽厚包容, 但偶尔也会表现出严厉的一面。有一次, 一名毕业于国内顶尖高校的学生刚刚入组, 在自我介绍时说:“希望能尽快发表一些好的论文”。Stephan立刻生气地纠正, “不, 你不应该说这些, 这不该是研究的动机”, 会后他还进一步解释说科研的首要目标是解决科学问题。

然而, 这并不意味着Stephan不重视发表论文。我进入实验室两年半之后, 终于在测量单个磁性纳米颗粒方面取得突破。当我还在想着如何做进一步的测量时, Stephan对我说:“我知道你热爱探索, 但你应该让别人了解你的好结果”。2008年初夏, 我到德国马普固态研究所做博士后已有两年多, 他利用休假的机会在斯图加特停留, 我带他参观实验室, 兴奋地介绍在量子霍尔自旋物理学方面的工作, 并说我即将到中科院物理所崔琦实验室工



图1 von Molnár 教授参加固体自旋输运国际会议时的合影(2011年摄于北京西郊宾馆)

作。在那次交谈的最后, Stephan 平静地问了我一句:“你发表这方面的论文了吗?”也许是因为马普所的学术环境过于宽松,我当时有一种被惊醒的感觉,马上意识到在博士毕业之后发表的论文的确有些少。我想, Stephan 丰富的阅历使他更深刻地理解了“publish or perish”这一隐含的学术生存法则。

Stephan 对年轻一代的关爱还表现在总是鼓励我们到美国物理学会三月会议(APS March Meeting)以及磁学和磁性材料大会(MMM Conference)这样的大型会议上作报告,并推荐好的成果候选邀请报告。每逢他自己做学术报告,总是不厌其烦地介绍每一项工作具体是由哪个小组成员来完成的。目前在德国马普化学物理所任职的 Steffen Wirth 曾对我说,他特别感激 Stephan 总是把成果首先归功于手下人。

在 Stephan 的学术报告中,他还尽量公正地提及前人或别的小组的重要工作,并要求其他小组成员也这样做。在一次组会上,我不无得意地介绍自己在改进霍尔磁强计上取得的进展,主要是在 Stephan 1993 技术设计的基础上做了些改进,包括器件的小型化和结构优

化、测量电路的完善等。在我想表述“比之前的初级设计有一些优势”时,很不恰当地使用了“primitive”这个词。会后, Stephan 单独把我叫到他办公室,郑重地告诉我不应该使用这个词,并说我们都应该尊重前人的工作。我向他道歉,说“我的确用词不当,那不

是我想表达的原意”。印象中,这是我读研期间 Stephan 在学术方面对我仅有的一次严肃批评。其实,即使是用“初级”来描述以前的设计也不合适。这个教训我铭记至今。

Stephan 注意为学生保留一定的自由空间,让他们有机会体验探索发现的乐趣。这不等于 Stephan 撒手不管,他会仔细倾听,并提供必要的帮助。2001 年末,我在测量单个纳米颗粒的磁性时意外地发现,改变栅极电压能显著提高霍尔传感器的信噪比。我向 Stephan 提出想通过测量电子噪声谱来弄清楚其中的物理机制,他没有马上答应。但第二天早上告诉我:“这是个很挑战的方向,如果你愿意做,我支持你,但不要从零开始摸索,我介绍你咨询法国图卢兹大学的 Bertrand Raquet 教授,他是这方面的专家”。有些幸运的是,熟悉频谱分析仪的任聪博士很快来到 FSU,我们在测量半导体二维电子气霍尔器件噪声谱方面的进展比预想顺利很多,相关结果^[24]成为我博士毕业论文的一个重点。

4 壮心不已

客观地说, Stephan 在 1994 年迁至佛罗里达后由于研究条件的限

制,已经无法与比他年轻一两代的优秀同行进行正面竞争。那时,关于半导体自旋电子学的研究十分热门,但需要许多昂贵的大型设备去支撑前沿研究,属于他的时代大门正在慢慢关闭。现在想来,曾习惯于引领磁性半导体发展潮流的他,在那时一定有些英雄迟暮的感觉。然而,令人敬佩的是, Stephan 很少在研究组里表现出失落感。他依旧充满热情地鼓舞小组成员利用有限的条件开展有特色的研究,用渊博的知识和深刻的洞察力去引导年轻一代奋力探索。

在我记忆中,仅仅有一次例外。那是在 2000 年末,一次外出开会回来后, Stephan 发现实验室的一个房间处于脏乱状态,并且一台核心低温设备出了故障。他批评了负责这个房间的小组成员,并坦率地描述了自己的心情:“在回塔拉哈西的航班上,我遇到了刚刚获得 Heisman 奖杯的 FSU 橄榄球明星 Chris Weinke。对比实验室现在这个样子,实在令人沮丧”。Stephan 最后说,“我不想成为一名失败者”。也许,“烈士暮年,壮心不已”能够描述他当时的心境。我想,他深厚的涵养和乐观豁达的心态,使他很少公开流露失落情绪。回过头来看,那时的 Stephan 就像北宋文豪苏轼那样,既能做到随遇而安,又能积极争取有所作为。对于我们这些对将来有强烈不确定感的年轻学子来说,他的存在既像一座避风的港湾,又如同一座坚定的大山。

5 尾声

我博士毕业后仅回过两次母校。最后一次是在 2017 年 3 月, Stephan 已经从 FSU 退休,行动需要拐杖,但仍保留了在物理系的办公



图2 von Molnár 教授与作者在其公寓合影，他在那里度过了生命中的最后几年时光(2017年摄于塔拉哈西)

室。他的房间和我读书时几乎没什么变化，办公桌后面的墙上依然挂着 N. F. Mott 爵士的肖像，以及他与 P. W. Anderson 等人的合影。他告诉我每周都会来办公室几次，参加熊鹏教授的组会，并对过去几年能与中科院半导体所赵建华研究员开展卓有成效的合作感到欣慰。他还告诉我：“最近读了你和 Jens Müller 关于 HgCr_2Se_4 中庞磁电阻和磁极化子的论文^[15]，这篇论文很棒，希望你们继续合作”。我说：“很高兴能够继续研究您 50 年前提出的概念，还

有不少有趣的物理值得去发掘”。

那天，我们还谈论了很多其他话题。我惊奇地发现，Stephan 很熟悉关于拓扑近藤绝缘体 SmB_6 的争议，他还根据以前在稀土金属化合物的研究经验提出了很有见地的观点。我们的讨论最后又回到了金属—绝缘体转变。Stephan 拉

开文件柜，找出了他 1983 年用磁性半导体证明不存在最小金属电导率的那篇论文^[5]，并说道：“Mott 当年曾迫不及待地想知道我的实验结果，但实验却最终支持 Anderson 等人的标度理论，Mott 当然很失望，但这并没有影响我们长久的友谊”。值得一提的是，Mott 和 Anderson 虽因电子局域化方面的工作获得 1977 年诺贝尔物理学奖，但关于最小金属电导率的理论预言并不是 Mott 获奖的原因。我想，没人愿意看到自己珍视的想法被否定，这是科学探

索不近人情的一面。令人尊敬的是，Mott 教授最终体面地接受了这个事实。

Stephan 去世的消息在 11 月 19 日早上传来。从那时起，他那圣诞老人般的微笑和讲演时奔放的热情就不时在我脑海中浮现。更忘不了的是我遇到挫折时他给予的鼓励：“Kiddo, you are a fighter. You will be fine”。我开始翻看关于他的照片和资料，猛然在他 2003 年给我的毕业赠言里，找到了他为何能保持 60 年科学激情的答案：

“These pages, written in Albert Einstein’s own hand, are to remind you, just as he struggled to understand the physical world around him, that your own strivings in physics will bring you the joys of discovery...”

致谢 感谢佛罗里达州立大学熊鹏教授、中科院半导体所赵建华研究员、中科院物理所王皖燕博士、以及我的妻子颜丽提出的宝贵修改建议。

参考文献

- [1] Esaki L, Stiles P, von Molnar S. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, 19:852
- [2] von Molnar S, Methfessel S. *J. Appl. Phys.*, 1967, 38: 959
- [3] Kasuya T. *Rev. Mod. Phys.*, 1968, 40:684
- [4] von Molnar S, *IBM J. Res. & Dev.*, 1970, 14:269
- [5] von Molnar S, Briggs A, Flouquet J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1983, 51: 706
- [6] Awschalom D D, Warnock J, von Molnar S. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58:812
- [7] Kent A D, von Molnar S, Gider S *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1994, 76:6656
- [8] Munekata H, Ohno H, von Molnar S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 63: 1849
- [9] Ohno H, Munekata H, Penney T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68:2664
- [10] Dietl T, Ohno H. *Rev. Mod. Phys.*, 2014, 86:187
- [11] Liu T H, Wang X L, Wang H L *et al.* *ACS Nano*, 2020, 14:15983
- [12] von Molnar S, Lawson A W. *Phys. Rev.*, 1965, 139:1598
- [13] Awschalom D D, Buhrman R A, Daughton J M *et al.* (Eds). *Spin Electronics*. Springer, 2004
- [14] Guan T, Lin C J, Yang C L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115:087002
- [15] Lin C J, Shi Y G, Zhang L *et al.* *Phys. Rev. B*, 2016, 94:224404
- [16] Yang S, Li Z L, Lin C J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 123:096601
- [17] Ohno H. Preface to a special issue on spintronics. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2008, 77(3)
- [18] von Helmolt R, Wecker J, Holzapfel B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71:2331
- [19] Coey J M D, Viret M, von Molnar S. *Adv. Phys.*, 1999, 48:167
- [20] Abrahams E, Anderson P W, Licciardello D C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1979, 42: 673
- [21] Ohno H, Shen A, Matsukura F *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69:363
- [22] Ohno H. *Science*, 1998, 281:958
- [23] Chambers S. *Nat. Mater.*, 2010, 9:956
- [24] Li Y Q, Ren C, Xiong P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93:246602