

# 追踪电子相位相干性——想起一篇综述文章

林志忠<sup>†</sup>

(台湾交通大学物理研究所和电子物理系)

2016-03-16收到

<sup>†</sup> email: jllin@mail.nctu.edu.tw

DOI: 10.7693/wl20160507

“Truth is never pure, and rarely simple.”

——Oscar Wilde

“In physics the truth is rarely perfectly clear, and that is certainly universally the case in human affairs. Hence, what is not surrounded by uncertainty cannot be the truth.”

——Richard Feynman

日前，偶然想起一篇15年前写的综述文章，题目是“Recent experimental studies of electron dephasing in metal and semiconductor mesoscopic structures” (*Journal of Physics: Condensed Matter (JPCM)*, 2002年第14卷第R501页)。这篇文章中讨论到的几种电子相位相干机制，近年来被一些研究石墨烯、纳米结构和拓扑绝缘体等新颖人工材料中低温输运性质的文章所引用。“电子相位相干时间”似乎还未有一个较为固定的中文翻译，它的英文称呼也随着时间演变。1980年代初期，弱局域(weak localization)以及反弱局域(weak-antilocalization)现象被发现之后，低温凝聚态物理学家最先使用“electron (inelastic) scattering time”或“electron phase-breaking time”一词，随后有人使用“phase-coherence time”一词，接着有人短暂使用过“electron decoherence time”一词，最近

则大多数的文章中都采用“electron dephasing time”一词。其实“electron phase-breaking time”的叫法是有意义的，因为这里要讲的是一个导体(金属、掺杂半导体或处于正常态的超导体)中导电电子波函数的相位，在低温时会与何种低能量的元激发(elementary excitations 或 low-energy excitations)进行随机的非弹性碰撞，从而被突然搅乱，也就是电子相位的记忆时间瞬间被洗刷掉，重新归零了。

在开始进行这篇综述文章的写作之前，我已经对低维度(准一维、准二维等)之“无序系统(disordered systems)”的低温输运性质学习和研究了约15年的时间(从博士论文算起，中间间断了几年去探讨高温超导体物理)，对“电子相位相干时间”愈来愈感兴趣。从某种意义上说，所有低维度的导体都是无序的，因为真实的样品都含有缺陷或

杂质，至少存在界面。那时期有两个课题尤其是我所最用心的：一个是在1990年代初、中期时，对低维度金属中的电子—声子散射问题的探讨，比如声子有没有维度效应，以及电子—声子散射率与温度的变化关系等(电子—声子作用决定了一个金属的电阻、超导性质和费米电子气的冷却等诸多特性，是一个重要物理量)。另外一个是在1990年代末期，对当温度趋近于绝对零度，低维费米电子气处于基态(ground state)时，是否仍有某些元激发还会随机地破坏导电电子的相位，从而造成电子相位记忆(phase memory)时间之瞬间中断的问题<sup>1)</sup>。这个问题，从1997年到2000年中期之间，曾经引燃了许多争议以及一些强烈粗暴的论战<sup>2)</sup>。第二个问题等同于在问：当温度趋近于绝对零度时，电子的相位相干时间(“退相干时间”)会饱和(“saturated”)或

1) 参见马中水《介观物理基础和近期发展几个方面的简单介绍》，和林志忠《电子相位相干时间》(《物理》杂志(北京)2007年第36卷第2期)二文。

2) 这场论战是由P. Mohanty, E. M. Q. Jariwala和R. A. Webb三人的这一篇文章“*Intrinsic Decoherence in Mesoscopic Systems*” (*Physical Review Letters*, 1997年第78卷第3366页)所瞬间点燃的。争议持续了约10年的时间，战火在1999年8月的芬兰赫尔辛基举行的“第22届国际低温物理会议(The 22<sup>nd</sup> International Conference on Low Temperature Physics)”上最为激烈。Mohanty等人在文章中引用了我们的一篇1987年讨论这个问题的论文《*Electron Scattering Times From Weak Localization Studies of Au-Pd Films*》 (*Physical Review B*, 1987年第35卷第1071页)。再过10年，我和台湾交通大学物理研究所博士生黄旭明等人又对这个问题写了一篇新文章响应——《*Observation of Strong Electron Dephasing in Highly Disordered Cu<sub>5</sub>Ge<sub>2</sub>Au<sub>3</sub> Thin Films*》 (*Physical Review Letters*, 2007年第99卷第046601页)。从1987年到1997年，再到2007年，既是一个有趣的巧合，也是“十年磨一剑”的写照。

发散<sup>3)</sup>? 这些问题, 在后来的石墨烯、纳米线和拓扑绝缘体中, 应仍有其狭义的材料特性本身, 以及广义的低维凝聚态物理两方面的双重意义。

这篇综述文章写作之时, 正逢笔者全家在美国安娜堡的密西根大学 (University of Michigan-Ann Arbor) 物理系访问一年<sup>4)</sup>。我们全家于2001年8月下旬抵达安娜堡, 三个星期之后, 就发生了震惊全球的“911”袭击事件。那一年我们住在学校的有眷学生宿舍, 每天早上我送小孩上了他们的小校车之后, 便随即搭乘密西根大学的校车到学校去撰写这篇文章。因此“911”袭击纽约世界贸易中心大楼之际, 我正在校车之上, 同车的乘客和我并不知情(那些年手机还未普及)。其实我是到了接近中午时刻才知道发生重大事件了。当天早上如同平时一样, 到校之后我就直接进了研究室持续写作, 路上没有碰到熟人打招呼。到了11点半, 突然收到台湾发来的电子邮件询问平安否, 才赶快到实验室去询问出了何事。后来才知道那一天早上台湾与美国之间的电话完全占线, 许多台湾的家人是在心急焦虑地尝试拨打无数通电话之后, 才改用电子邮件联系上的(当年一般民众不大使用电子邮件)。两个星期之后, 我依照离台前的事先约定, 如期前往东北大学 (Northeastern University) 物理系演讲《极低温下电子相位相干时间的饱和现象》。当时底特律机场极为冷清,

灯光暗淡, 所有的人员表情落寞。在前往波士顿的飞机上, 乘客稀疏, 我的心情低落到了极点(李白《行路难》: “欲渡黄河冰塞川, 将登太行雪满山。”), 因为有几架被劫持的飞机就是从波士顿机场起飞的, 而美国西北航空公司的大本营则在底特律。

我对“无序系统”开始感到兴趣, 是在大学四年级将近修完《固体物理》之时。当时我们使用的课本是 M. Ali Omar 所著的 *Elementary Solid State Physics* 一书(美国 Addison-Wesley 出版公司, 1975 年出版)。书中的第 11 章讨论固体中的缺陷和非晶态(amorphous)半导体等等。在该章的第一页, 作者引用了 19 世纪爱尔兰作家、诗人和剧作家奥斯卡·王尔德(Oscar Wilde)的一句话 “Truth is never pure, and rarely simple(图 1)。”因此, 我决定要研究“无序系统”!

那时上完了一年的课, 觉得固体物理(主要是讨论晶体)“太完美了”, 可以用导带(conduction band)、价带(valence band)解释一切现象, 因此不是我想要的。——当然

这只是当时的一个大四学生的初浅看法! 但是这个看法也使得我进入普渡大学物理系研究所之后<sup>5)</sup>, 选择远远地避开了所有的半导体实验室, 因为那时候我天真地以为只要有导带、价带, 再加上统计力学的概念, 半导体物理的现象就都一清二楚了! 那时候, 还没有进过研究实验室, 也没有认真听过学术演讲的我并不知道, 二维电子气以及整数和分数量子霍尔效应的黄金研究时期, 已经(即将)登场。

大约是到了普渡大学半年多, 资格考试通过之后, 我时常到物理系图书馆去翻阅系上老师所发表的

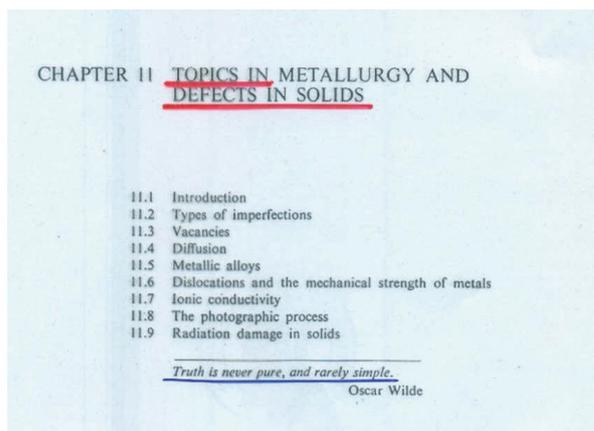


图1 大学《固体物理》课本中的第11章, 教这一门课的是郑以祯教授。郑老师1970年获得美国康乃尔大学博士学位, 在西雅图华盛顿大学进行博士后研究之后回到台湾, 先在交通大学, 之后到台湾大学任教。他教我《固体物理》、《统计及热物理》, 还有一学期的选修课《固体传输导论》。他启发了我走上“无序系统”的研究之路。在郑老师他们的青、壮年年代的台湾, 他们铺路、灌溉, 但是当进行学术研究之时, 每踏出一步, 他们都需克服重重困难。郑老师显然有他自己研读固体物理的心得与主见, 因此在选择教科书时, 他并没有随着众人直接采用最流行的 Kittel 所著的 *Introduction to Solid State Physics* 一书

3) 介观尺度的样品在低温下会表现出量子输运(quantum transport)现象, 超过电子相位相干时间之后, 电子的运动就演变成经典玻尔兹曼行为。温度越低, 电子相位相干时间愈长。直到趋近于绝对零度时, 电子相位相干时间应该持续增长(即发散), 或还是有可能被某些元激发所打乱掉, 仍是一个在理论和实验两方面都有待回答的问题。

4) 前往访问一年的主要动机之一是想让小孩去见识美国的社会, 那时我的两个小孩一个读小学二年级, 一个在读幼儿园大班。

5) 当时选择申请普渡大学的原因之一是想远离美国的东、西两海岸, 避开华人。但是离台以前完全不知情的却是那一年正是“中美联合培养物理类研究生计划(China-U.S. Physics Examination and Application, 简称CUSPEA)”开办的第一年, 因缘凑巧, 普渡物理系竟然同时迎来了7位第一批的大陆研究生(但仅我一个台湾学生), 这是我与大陆师生密切接触的开端。

论文, 想要寻找一位指导教授。有一晚, 翻到了 Nicholas J. Giordano 教授的一篇论文 “Experimental Study of Anderson Localization in Thin Wires” (*Physical Review Letters*, 1979 年第 43 卷第 725 页), 我当场决定, 一定要跟他作博士论文, 因为这是一个低维度的 “无序系统” 课题! 时至今日, 在毕业了 30 年之后, 我们依然保持联系(但次数不频繁), 我每年年底都会收到他从美国寄来的圣诞卡片。20 多年前, 我的第一个小孩出世时, 他还特地邮寄了一套婴儿衣服来。在 2015 年的圣诞卡中, 他依然亲切地写道 “I always enjoy the latest news from your lab.” (林志忠《普渡琐记——从 2010 年诺贝尔化学奖谈起》(《物理》杂志(北京)2010 年第 39 卷第 11 期)一文中, 有 N. Giordano 教授的故事。)

这一篇综述文章的合著者 Jonathan P. Bird(英国人)是美国大学的电机系教授, 他的博士论文探讨低维半导体结构中的普适电导涨落(universal conductance fluctuations)现象, 1999 年他发表了一篇量子点中输运现象的综述文章, 因此我邀请他到台湾交通大学访问, 并决定合作讨论 “电子相位相干时间” 问

题。他在英国的大学获得低温物理学博士学位, 在日本的研究机构做过 7 年的博士后研究, 然后到美国的大学任教, 这是他的国际化。但是会到日本做博士后研究, 再到美国大学任教, 应该不是预先做好的生涯规划, 而是他后来的机遇与有能力及时掌握机会。

欲研究电子相位相干时间问题, 离不开介观尺度的样品。“介观物理” 这个中文名词(在台湾)是我在 1990 年前后, 从英文的 “mesoscopic physics” 一词翻译过来的。当时的想法是基本粒子中有 “介子(meson)” 作为核力的载体, 其质量介于电子与核子之间, 而且中文 “介” 是指 “居于两者之间” 的意思。因为 “介观物理” 探讨的对象是尺度介于 “微观”(原子、分子尺度)与 “宏观”(摸得到、看得到的尺度)之间的样品, 因此称之为 “介观”<sup>6)</sup>。从 1980 年代初期低温物理学家一步步建立起来的介观物理的概念, 以及微小样品的制作和加工技术, 对后来兴起的纳米科技、石墨烯和拓扑绝缘体的输运研究, 有一定的帮助。

三四年前, 一个大陆最主流大学的一位年轻老师 “深觉惋惜” 地问我, 为何没有把这篇综述文章发

表在 *Review of Modern Physics* 之类的期刊。答案其实很简单, 因为 10 多年前, 我们并没有 “影响因子” 的概念, 那时节做研究的心思, 确实单纯<sup>7)</sup>!

**后记** 本文缘起于 2016 年 2 月底时, 在北京中国科学院物理研究所与吕力、景秀年、王云平和宋小会老师共进午餐, 席间谈起科学名词的中译问题, 有感而写了这篇随笔。感谢中国科学院物理研究所张殿琳、吕力、景秀年教授, 北京大学物理学院阎守胜、马中水教授, 和南京大学物理学院金国钧教授, 在文章发表前的仔细阅读与指正。

**年轻的梦想:** 年轻的时候, 最醉心于研究 “无序系统” 和 “多体问题(many-body problems)”, 因为这类课题最为深刻, 而且(几乎)注定 “无解”。但是精密测量的实验数据与深入理论计算之间的微细差异, 却可能正隐藏着自然界的幽微奥秘。正是吾人对这类幽微奥秘课题的执着探讨, 一步步建立了凝聚态物理学多采多姿的前沿领域和宽广视野。“事未易明, 理未易察”, “关于细节的全部知识” 实质推动了科学的进展!

6) 应是在 1992 年, 香港科技大学物理系沈平教授(当时还在美国纽泽西 Exxon Research and Engineering Company 工作)第一次访问台湾大学(那时我在台湾大学物理系任教), 在报告之前他问我 “mesoscopic physics” 的中文翻译, 我告诉他是 “介观物理”。但沈老师在演讲中还是直接使用了英文名词, 这反映了那时候大多数华人物理学家仍然无法理解或是接受 “介观物理” 这个中文名词和观念。沈教授的专书 *Introduction to Wave Scattering, Localization and Mesoscopic Phenomena* (Academic Press) 第一版, 则出版于 1995 年。另外, 由于当年海峡两岸消息隔绝, 大陆何时开始使用 “介观物理” 一词, 阎守胜教授应该会知道来龙去脉。同样是在 1995 年, 阎守胜和甘子钊主编的中文《介观物理》一书由北京大学出版社出版。

7) 改版前的 JPCM 期刊中的综述文章长度, 以 30 页之内为原则。当我们告诉主编 30 页太短时, 他很慷慨地答应我们可以有 60 页的篇幅。但是写完之后却长达 100 页, 因此我们很希望主编拒绝这篇文章, 以转投其他期刊, 如 *Reports on Progress in Physics*。可是主编却爽快地接受了, 我们的这篇文章因此可能就成为 JPCM 迄今为止最长的一篇综述文章了。这篇文章, 或许也可以考虑发表在 *Advances in Physics*, 因为当时 A. Zawadowski 教授是这期刊的编辑咨询委员(Advisory Board)。林志忠《学术与生活: A Matter of Tradition》(《物理》杂志(北京)2011 年第 40 卷第 10 期)一文中, 有 A. Zawadowski 教授的故事。