

# 细节与专家——Bardeen 马失前蹄？

林志忠<sup>†</sup>

(台湾交通大学物理研究所及电子物理系)

2017-07-16 收到

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

DOI: 10.7693/wl20171007

Josephson 对 Bardeen 说：“你详细计算过了吗？没有吧？我计算过了！”

Cohen 总结说：“他们两人似乎说着不同的语言。”

在《准晶体发现者 Shechtman 给年轻科学家的忠告》(《物理》杂志(北京)2017年第46卷第6期)一文中，笔者写了这几句话：“Shechtman 的坚持是有其学养依据的，因为他认为 Pauling 虽然是一位当代最伟大的(美国)化学家，却并不是电子显微镜(术)专家。他斩钉截铁地说，Pauling 闯进了别人的学术专业领域，所以做出了不够专业(外行)的错误判断。”这种初出茅庐的无名年轻研究员与已经功成名就的“大师”之间的对垒故事，还可以举出一例，就是“Josephson 隧道结(Josephson junction)”的故事。Josephson 隧道结是一种“超导体—绝缘体—超导体”三层结构，中间的绝缘层(通常是金属氧化物，如氧化铝，但是也可以用普通金属取代)，厚度必须在几纳米以下，才可以产生量子穿隧现象——对参与配对的费米能级附近的电子而言，薄绝缘层形成了一个位能屏障。

文前点出的那句话“你详细计算过了吗？没有吧？我计算过了！(Did you calculate it? No? I did!)”是 1962 年 9 月于英国伦敦举行的第

8 届国际低温物理会议上，Brian D. Josephson 与 John Bardeen 的论辩中的精彩一句<sup>1)</sup>。那一年，22 岁的 Josephson 是剑桥大学二年级的研究生，54 岁的 Bardeen 刚刚在 1956 年获得了他的第一个诺贝尔物理学奖(发明晶体管)，而且他的超导体理论(Bardeen-Cooper-Schrieffer theory, 简称 BCS theory)也已经在 1957 年堂皇发表。此时期的 Bardeen 意兴风发，被公认为是该时代国际上最受尊崇的最重量级固体物理学家之一。这时候，Philip W. Anderson, Sir Nevill F. Mott 和 John H. van Vleck 等三人，还不知道再隔 15 年之后，他们也会因为对磁性和无序系统的电子结构的研究而荣获诺贝尔物理学奖<sup>2)</sup>。

Josephson 和 Bardeen 之争论的焦点在于超导体—绝缘体—超导体隧道结的“穿隧电流(tunneling current)”，或称“屏障电流(barrier current)”问题。Bardeen 根据他的理论图像思路和采用的数学处理方式，得到的结论

是超导“电子对(Cooper pairs)”不可能“成双成对”地穿隧通过薄绝缘体(或金属)层。他相信，穿透进入绝缘层中的电子波函数的形式，一定就像正常态金属内的“单电子”波函数的形式，而绝对不可能保有超导态的电子对波函数形式。换句话说，他认为隧道结的电流来自于单电子穿隧(single-particle tunneling)过程。Josephson 则是立定在 BCS 理论的架构内(!)，但使用了 Gor'kov 理论的非局域性(nonlocal)思路和数学形式，从详细的计算中得出结论说，超导电子对会越过超导体/绝缘体(金属)界面，出现在

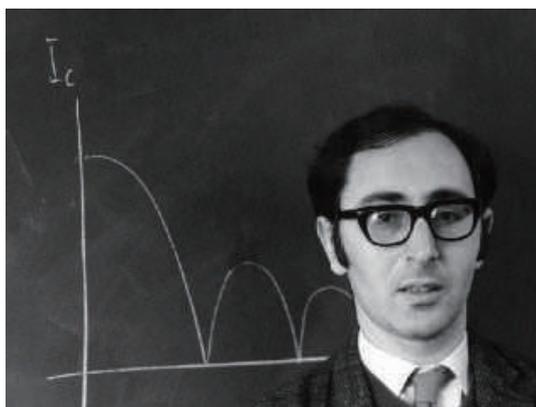


图1 年轻时的 Brian Josephson (摘自网络)

1) 邀请 Josephson 和 Bardeen 前来面对面辩论宏观量子现象(macroscopic quantum phenomena)的该场会议主持人，是时任美国哈佛大学的 Paul Martin 教授。无私邀请巨擘与新秀平起平坐，就事(学术问题)论事，各抒己见，是欧美优良学术传统的开放精神！那天，研讨会上 Josephson 独力应战 Bardeen。A. Brian Pippard (Josephson 的博士论文指导教师，一位实验物理学家) 和 Anderson (已结束在剑桥大学的访问，返回美国) 两人都未出席。Bardeen 欣然赴约，并不觉得跟一位研究生公开论辩谁的理论模型和计算结果才是正确的，有何丝毫不妥！

2) 关于 Anderson 等三人的获奖工作，请参阅林志忠《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。该文中也提及 Bardeen 等人发明电晶体(晶体管)的故事。



图2 年轻时的 John Bardeen, 1930 年代中期(摘自网络)

薄绝缘(金属)层中。因此,绝缘层中的穿隧电子保留了超导电子对的特性和宏观波函数形式<sup>3)</sup>。

超导体理论是物理学史上最重、影响最深广的理论之一,不仅局限在固体物理学。Bardeen也因此成为了100多年以来,唯一在同一项学术专业领域获得过两次诺贝尔奖的人<sup>4)</sup>。但是,为何一个伟大理论的创造者(真正的专家!),竟然“马失前蹄”,从熔铸了自己(和博士后与学生)无数心血所建构起来的理论中,“推测”出与实验不符的错误结论呢?从当时的一些超导学家的事后回忆以及分析(事后诸葛?),

应可以总结为是由于 Bardeen 在“估算”穿隧电流时,忽略了“细节”所致。

测量和计算隧道结的穿隧电流,在1960年代初期是一个新兴的热门课题。Bardeen以他对固体物理学和量子穿隧效应的掌握与熟练,很快地,就半定量地估算出绝缘层中的波函数,并且斩钉截铁地说“超导电子对不可能出现于绝缘(金属)层中”,因此通过隧道结的电流必定是来自于未配对的、单电子的穿隧行为。但是,Bardeen错了!在这个微妙问题上,Josephson 经过踏踏实实的仔细计算和反复验算之后,发现超导波函数会延展进入薄绝缘层中(虽然绝缘层中超导能隙消失了),从而产生可观的超导穿隧电流,其大小足以用实验明确检验。这位年轻研究生的理论所预测的效应(Josephson effect),奠定了半个世纪以来的超导电子学的广泛应用基石,包括凝态物理学家所高度倚赖的“超量子干涉仪(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)”。

Josephson 的正确无误来自于他采用 Gor'kov 的非局域方案进行过详尽的数学计算,Bardeen 的“大意失荆州”则似乎部分来自于他的付诸物理图像的直觉与推论,觉得没有必要去考虑一个更加完整的“穿隧汉弥顿量(tunneling Hamiltonian)”。

这一次,物理概念的逻辑演绎(大架构)输给了按部就班的数学计算(细节)!幸而,Bardeen 和 Josephson 仍有相似之处,他俩对于所有超导体实验的细节与进展,都密切留意。Bardeen 一生坚信,成功的固体物理学理论必须能够解释真实物质(real materials)——而非止于模型简化的理想材料(ideal materials)——的性质。

1962年7月,Josephson(唯一作者)的论文发表于新创刊的 *Physics Letters*, 题目是 *Possible New Effects in Superconductive Tunnelling*。1963年3月,明确验证了 Josephson 超导穿隧电流预测的实验论文(作者是 P. W. Anderson 和 J. M. Rowell)发表于 *Physical Review Letters*, 题为 *Probable Observation of the Josephson Superconducting Tunneling Effect*。这两篇论文的题目,都很谦卑<sup>5)</sup>。1961—1962年间,正是由于 Anderson 的对称破缺(broken symmetry)超导理论概念,启发了 Josephson 寻得“超导波函数相位(phase)作为一个可实际测量之物理量”的重大意义!而后,Bardeen 也立即接受了 Anderson 和 Rowell 的实验证据,相信 Josephson 的预测是精确的——在实验数据出炉之前,有些精微隐晦的物理概念会深埋于数学式子的行列间,欠缺清晰的图像,迷惑了最顶尖的科学家。这个故事给了我们

3) 美国芝加哥大学 M. H. Cohen、L. M. Falicov 和 J. C. Phillips 针对“金属—绝缘体—超导体隧道结”的穿隧电流的理论计算论文的及时出现,对 Josephson 能够取得决定性的进展有关键性的影响。他们三人的论文正式发表于1962年4月的 *Physical Review Letters*, 万般幸运的是在刊发之前几个月,Josephson 已经从 Anderson 处获得了预印本,并仔细阅读过。对于两人的穿隧电流理论争论,Cohen 的总结是:Josephson 和 Bardeen “似乎说着不同的语言”(the debaters seemed to speak different languages)。

4) “术业有专攻,道有时而穷。”时常被认为是人类史上最伟大的10位物理学家之一的费曼(Richard P. Feynman),曾经花费无数时间,尝试了各种(计算)方法,却始终未能以他作为粒子物理学“专家”和20世纪物理学宗师的身份,解开超导性之谜。这一点足以反面印证,Bardeen 确实有他的独到——“天才”——之处。1956年12月,Bardeen “很不情愿”地上路,出发前往斯德哥尔摩领取他的第一个诺贝尔物理学奖,因为此时他已经看到了BCS理论即将建构完成的曙光,他心里非常担心 Feynman 是否会捷足先登,率先提出一套正确的超导体理论。

5) Josephson、Pippard 和 Anderson 三人,或许都对“宏观波函数(macroscopic wavefunction)的相位(差)产生了穿隧超导电流”的计算结果感到些许不安,因此没有把论文投递到 *Physical Review Letters*。1961—1962年,Anderson 从美国贝尔电话实验室(Bell Telephone Laboratories)到剑桥大学进行休假研究一年。在他的固体和多体物理课堂上,Josephson 首次学到了对称破缺的概念。Anderson 回忆说,有 Josephson 在课堂上听课,让他每堂课都讲得“胆颤心惊”。

一个启示：让实验数据拍板定案。

Josephson 聪颖早慧，他的超导隧电流理论预测的盛大成功，并不是仅凭着一时的好运气而爆得大名。Anderson 曾经告诉美国康乃尔大学的 Vinay Ambegaokar 教授说，他总是相信 Josephson 的判断和计算结果。Josephson 的其他经历与事迹，不在本文的讨论范围之内。

后记：(1)本文取材于美国物理学会会刊 *Physics Today* 中 Donald G. McDonald 的文章 *The Nobel Laureate versus The Graduate Student* (2001 年 7 月号第 46 页)，Philip W. Anderson 的文章 *How Josephson Discovered His Effect* (1970 年 11 月号第 23 页)，以及 Lillian Hoddeson 和 Vicki Daitch 合著的 Bardeen 传记 *True Genius—The Life and Science*

*of John Bardeen* (Joseph Henry Press, Washington, D. C., 2002)。(2)每一篇关于科学史公案的文章，都反映了作者个人的旨趣和对于该事件与科学内涵的理解程度，许多“细节”都未被提及或简化了，因此“我们只记得我们所(愿意)理解的”！本文是从一位低温物理“实验学家”的观点来写的，或许理论学家会有不同角度的切入点与诠释。

## 无需输入动力，实现自然冷却

使用新制备的材料薄膜遮挡空间，将能提供冷却而无需输入功率。新制备的材料薄膜是人工超构材料，由玻璃微球聚合物和银制成。它发射红外线辐射，也反射太阳光。美国科罗拉多博尔德大学的团队在能源部 300 万美元项目经费的支持下，发明了这一新材料薄膜。

辐射冷却是物体以红外辐射的形式散热的自然过程。在室温下所有材料都发射红外线，波长为 5—15  $\mu\text{m}$ 。然而，这样的过程通常不是很有效，因为外部热的因素，如阳光和空气流，会加热需冷却的空间。不过，空气的红外辐射以及吸收的功率很小，相应的波长范围恰好是 8—13  $\mu\text{m}$ 。于是，在夜间地球可以通过这个“大气窗口”向太空发射红外辐射，从而冷却自身。

研究人员感兴趣的是，开发新材料，加强上述自然的冷却过程，使冷却对象通过大气窗口更有效地发

### 物理新闻和动态

射红外辐射。从理论上讲，新材料可以提供一种简单的方法，冷却建筑物，而不需要高功率耗电的机器。

尽管用于夜间的辐射冷却材料，已开发成功，但白天仍有问题：材料吸收阳光，迅速超过冷却功率，导致加热表面。因此，博尔德大学研究人员面临的挑战是，创建一种材料，既反射阳光，也允许红外发射。他们发明了一种双层柔性薄膜材料：一层是包含有(随机分散的)二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )玻璃微球(8  $\mu\text{m}$  直径)的聚合物(聚甲基戊烯)膜，另一层是 200 nm 厚的银涂层；两层总共只有 50  $\mu\text{m}$  厚。

聚合物微球膜对整个太阳光谱透明，但对红外辐射不透明。在微球膜内，宽频带的集体共振可保证：膜在 8—13  $\mu\text{m}$  区间具有高的红外发射率，因此增强了自然的辐射冷却。同时，阳光穿过聚合物微球膜后，会被银膜反射回来，这防止了任何太阳能加热。研究者开发的薄膜制备工艺，十分成功：他们能够在短短几分钟内生产大面积的材料。当规模生产，估计材料成本只有 0.50 美元/平方米。据透露，该膜的平均制冷功率大于 110  $\text{W}/\text{m}^2$ 。即使在正午的太阳光下，也能达到 93  $\text{W}/\text{m}^2$ 。这大致相当于在同一地区相同面积太阳能电池板产生的电能。

但是把这样的膜应用到建筑物上，并不像在屋顶上铺一块塑料布那样简单。如果这样做的话，在炎热的夏天可使建筑降温，在寒冷的冬季或夜晚也会降温。因此，对于防暑降温来说，需要建造一个热力系统：使用水围绕建筑流通。新材料膜覆盖水槽，类似于热水供暖系统，温度可控制。

(戴 闻 编译自 *Physics World*, Feb. 13, 2017)

