

《低温实验导论》：低温物理实践要领的总结与推广

姬扬[†]

(浙江大学物理学院 杭州 310027)

2025-07-07收到

[†] email: jiyang2024@zju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250811

CSTR: 32040.14.wl20250811

林熙是北京大学物理学院的教授，在低维材料和介观器件的量子输运方面做了很多工作，在低温物理实验和制冷技术方面有着丰富的经验。《低温实验导论》就是他总结自己多年来的教学和实践经验，为低温实验工作者写的入门教材和参考书。全书分上下两册，总计800页。

我不做低温物理实验很多年了。低温物理实验，我曾经高强度地做了4年，那时候我在以色列魏兹曼研究所做博士后(1998—2002)，在稀释制冷机提供的几十毫开尔文的极低温环境下，研究半导体二维电子体系中电子的波粒二象性。在那段时间前后，各有几年做了一些液氮温度下的半导体光学测量，但是由于实验条件的限制，真正用液氮工作的净时间并不太多，后来更是因为液氮价格的急剧攀升，基本

上不做这方面的工作了。

我和林熙是中国科学技术大学的校友，但比他早几届。所以，我们都在物理系的低温物理中心做过几次高年级物理实验，也了解那里的工作。只是后来我转向了，而他一直坚持在极低温的条件下工作，无论是在美国留学期间，还是2012年回到北京大学量子材料中心工作以后。他刚回国不久，我去过他的实验室，那次参观给我留下了很深的印象，看得出来他是认真做实验、做事情的人。因为我已经不做低温实验了，所以只是偶尔还关心一下，隔几年会听到一些他的消息，比如《中国科学报》最近报道(2025年5月26日)：在国家自然科学基金委员会的国家重大科研仪器研制项目“拓扑量子计算超低温实验仪器”支持下，北京大学量子材料科学中心教授杜瑞瑞、林熙打造了两台无液氮消耗的制冷机，达到

了0.1 mK，创造了不消耗液氮进行制冷的“干式制冷仪器”所能达到的最低温度纪录(图1)。

低温物理实验要用到液氮，实验条件很苛刻，而且很花钱，所以经验很重要，很多知识和经验都要靠周围的人“传帮带”。但是如果完全靠“传帮带”，对

课题组的要求就太高了，这里有很大的规模效应。所以，如果有课可上，有书可读，就会方便得多——我在中国科学技术大学时也学过一些课，读过阎守胜和陆果老师的《低温物理实验的原理和方法》(科学出版社，1985年)，觉得就很有帮助。2002年当我回国时，在伦敦的书店里见过怀特的那本书《低温物理实验技术》(*Experimental Techniques in Low-Temperature Physics*, 4th ed., G. K. White, P. J. Meeson, Oxford University Press, 2002)，后来还考虑过把它翻译成中文，但是一方面比较忙，另一方面我发现里面很多内容也读不懂——没有实践经验，就不容易读懂。如果你没做过，光看别人书是很难学会的，更别说翻译了。

虽然我知道林熙在北京大学讲授这方面的研究生课程，但我完全没有想到他写了《低温实验导论》这么两本书。物理是实验的科学，而实验有很多窍门。总结前人的经验，给出自己的建议，对于推动实验科学发展是非常重要的。把自己的这些经验总结下来，对所有人特别是新人会有很大帮助。他每年都在上课，这本书就是总结——这个非常不容易，因为我在这方面干过几年，很清楚做低温实验的人有多忙，平时有多少事情要做。看了他的前言，我才知道为什么他竟然有时间写书：“幸运的是，作为一位大学老师，我每天都有加班的自由。”

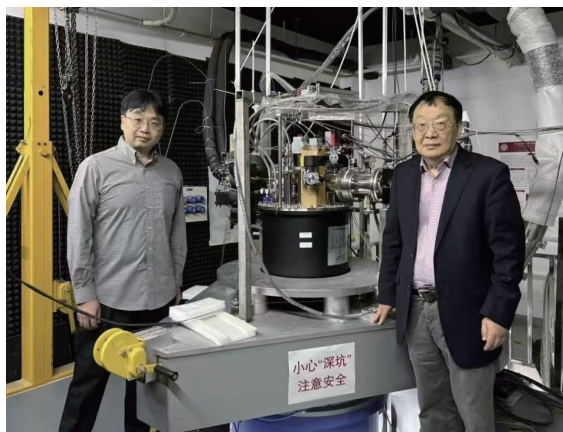


图1 杜瑞瑞(右)和林熙在“拓扑量子计算超低温实验仪器”前留影(取自《中国科学报》，2025年5月26日)

很冷峻的幽默，隐藏得很好呀——以前我还真没有看出来。

《低温实验导论》有上下两册(图2)，上册介绍了低温实验的基本知识及相关物理原理(上册包括前言、第0章和第一至三章)，下册探讨了制冷技术的发展历程，并提供了与实验操作相关的实用建议(第四至六章，以及附录)。

前言写得很好，讲清楚了这本书有什么内容以及为什么要写这本书。短短的几页纸，界定了低温物理学的范围，介绍了低温实验的特殊之处以及低温实验技术和商业化仪器设备，更重要的是，写作这本书的缘由、目标、内容和志向，“……像科普读物一样为读者提供实验世界的地图，……像工具书一样成为读者便于查阅的信息来源。”我觉得如果有可能的话，应该把这个前言放到网上，方便更广泛的传播。

第0章“通往绝对零度之路”是一篇很好的科普文章，包括三个小节“不存在的永久气体”、“永久液体和低温之路”和“咫尺天涯”，大约40页纸的样子，很好地对低温物理和低温技术的历史、现状和未来进行了科普。目前，第2和第3小节已经发表在《物理》2025年第6期和第7期，肯定会帮助更多的人了解低温物理这个领域，也方便他们知道这本书。

接下来每一章的内容，我觉得任何要做低温研究的人，都应该认真地读一读，如果有条件去北京大学物理学院学习“实用低温物理与技术入门”课程(假如你碰巧在中关村附近)，当然很好，但是这样的课程在国内开设的并不多，许多时候只能靠课题组里的“传帮带”，那么这本书还真是有必要认真读一下。

至少应该知道这本书有什么内容，以后用到的话就可以去找出来。

第一章“低温液体”关注低温实验工作者需要优先了解的部分低温液体，按照液体的种类讨论它们在低温下的物性，重要是

液氦(氦4，氦3，以及氦4—氦3混合液)，也包括液氮和液氢。第二章“低温固体”按照物性的分类讨论常见的低温固体，主要讨论物性与温度的关系，为了方便查阅数据，作者归纳和整理了很多常用的低温信息。第三章“温度测量”主要介绍低温下的温度测量方法以及如何尽量准确地获得温度的数值，还介绍了国际单位制和国际温标，重点解释温度这个单位的特殊性，以及如何获得热力学温标意义上的温度数值，作者在这里指出：“在低温环境下准确测量温度的难度远远高于第四章将介绍的如何获得低温环境”。

第四章“低温制冷”讨论获得4.2 K(含)以下低温环境的主要制冷技术，帮助低温仪器设备的使用者和搭建者了解相关信息，强调“4.2 K以下的制冷方式有非常强的温区针对性，因此，获得一个极低温环境的制冷方法需要涉及多种不同的物理原理”。第五章“辅助技术”讨论低温实验中常用的一些辅助技术，包括真空的测量与获取，密封和检漏，热交换，低温容器，液氮和液氮的传输，磁体的使用、制作和保护，最后还强调了低温实验和安全——这是新手必须优先了



图2 2025年北京大学出版社出版的《低温实验导论》上下册

解的内容。第六章“测量和设计实例”讨论低温环境下的测量，并提供一些实际设计的例子，都是作者参与过的低温测量和设计实例，特别点出了经验的重要性：“测量不仅依赖实验工作者对图像的理解和合理的设计，还依赖于双手的具体操作，每一个小操作的细致程度都影响实验的最终成功率和数据质量。”这一章有很多内容跟电测量有关，还有相当的篇幅讲述“干式绝热去磁制冷机”——当然与前面提到的最新进展有关。最后是附录，包括扩展阅读、物理量和常用物理量、数值前缀和单位换算。

林熙在低温实验领域拥有丰富的实践和教学经验，讲解的方式便于低温实验的初学者迅速掌握相应的基础概念和知识框架，为研究生和高年级本科生提供开展实验研究所需的储备知识。这本书还包含很多低温材料性能方面的数据，便于经验丰富的科学家和工程师参考。

这本书的参考文献很多(但是中文书只有9本，除了前面提到的《低温物理实验的原理和方法》，我只读过张裕恒老师的《超导物理》)，还有很多的图表(443张自绘图和138张表格)。许多来自不同文献的数据，作者把它们抽取出来，然后重新绘

制在一张图上，这样不仅看起来美观，更方便读者查阅比较。

书中还有很多具体的建议，比如说，第186页讲怎么增加热导的时候，他说：“我不推荐在极低温度下使用真空油脂，因为真空油脂本身是绝缘体，它让界面变差。”也有作者的固执，“制冷指‘refrigeration’，它以前在中文环境中也被称为‘致冷’，考虑到我们如今的称呼和书写习惯，本书统一采用‘制冷’”。这让我想起金庸小说《白马啸西风》的结尾：“那都是很好很好的，可是我偏不喜欢。”

当然，我觉得这本书也有一些可以改进的地方。内容摘要应该更详细一些，稍微讲一下每章有哪些内容。其实现在的每章开头，已经有很好的总结，把它们汇总一下就可以。另外，文字表达方面，似乎没必要用很多被动语态——“虽然本章所涉及的物理相对简单，但它们值得被我们额外关注”，可以说“它们值得额外关注”；“它在室温下被搭建，却主要在低温环境下被使用”，也完全可以说“它在室温下搭建，却主要在低温环境下使用”。

在《低温物理实验的原理和方法》出版40周年之际，《低温实验导论》出版了。这标志着我国在低温物理和低温技术领域有了巨大的进步，不仅体现在超导量子计算的前沿研究方面，以及自主研发稀释制冷机的基础技术方面，还体现在总结教学和实践经验的教材方面。我看到北京大学出版的“基础课序列”教材里，已经有很多书都是第二版了，我也希望林熙这本书将来也会有第二版乃至第三版，就算每二十年更新一次，也是完全没有问题的嘛。



Q: 为什么无法从粒子物理出发推导出凝聚态物理?

A: 听过一个讲座，临结束时报告人问了一个问题：大家都知道“More is different”，那有人知道这篇文章还有一个副标题是什么吗？全场鸦雀无声。查阅后得知副标题是“Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science”，翻译过来就是“破缺的对称性与科学层级结构的本质”。看似非常简单的一句话，却有力地支撑了“More is different”这一观点。

1972年，凝聚态物理学家安德森在他著名的论文“More is different”中提到了不同于还原论的另一种世界观——演生论。还原论认为复杂系统的性质可通过其底层组成单元的性质及相互作用完全解释，如果该理论成立的话，我们只需要研究基本粒子及其相互作用就能洞察整个世间万物的规律。安德森文中批判了这种理论，指出还原论的假设从未隐含“建构论”的前提——即便具备将万物还原为简单基本定律的能力，也并不意味着能从这些定律出发重建整个宇宙。事实上，基本粒子物理学家对基本定律的性质揭示得越多，这些定律就越难关联到其他科学领域的实际问题，更

无法用于解决社会层面的课题。演生论则相反，认为复杂系统会涌现出无法仅通过底层单元解释的新性质，很多情况也的确如此，比如我们几乎不能从粒子物理的规律推导出社会科学的结论，事实上，复杂性会带来新的定律、概念和原理。

那么复杂性是怎么来的呢？文中用“对称性破缺”理论来解释复杂性的来源。以氨分子(NH_3)为例，它具有三角锥形结构，由一个带负电的氮原子和三个带正电的氢原子组成，因此具有电偶极矩。然而物理定律告诉我们，没有任何系统的定态存在电偶极矩。这就意味着如果氨分子开始时是带有偶极矩的非对称态，那么它无法保持该态很长的时间，通过量子隧穿效应，氮原子可以通过氢原子组成的三角形泄露到另一侧，将棱锥颠倒，出现“反转”。真正的定态其实是三角锥和其反转的等权叠加，这样一来定态的偶极矩确实为零，也意味着氨分子存在宇称对称性，即左右手性是等价的。

如果延伸到更复杂的分子就不一样了。比如含有40个原子的糖分子，在这种尺度下，再讲分子反转没有意义，此时糖分子左手性与右手性不等价，也就不具备宇称对称性，所以用量子力学方法去研究糖分子便失效了。这一过程并没有违背微观对称性原理，而是因为系统复杂性增加导致了“对称性破缺”。超导现象是宏观物体发生对称破缺最突出的例子，反铁磁体、铁电体、液晶和许多其他态的物质也都服从这一规律。对称性破缺让我们看到，整体不仅大于部分之和，而且迥异于部分之和。



* Q&A选自中国科学院物理研究所微信公众号每周五发布的《问答》专栏。受篇幅所限，这些答案难以善尽美，欲深入了解其中缘由的读者请同时参阅相关专业书籍。

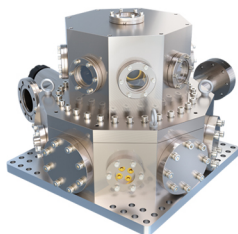
Scryo-S[®]

系列低温恒温器

Scryo-S 系列低温恒温器 (Scryo-S) 具有降温速度快, 变温范围大, 震动小, 噪音低, 设计灵活, 样品可置于真空或超高真空中, 制冷剂使用效率高, 无需定期维护等特点, 并可与 Qcryo 形成不消耗液氮的干式低震动低温系统。



Scryo-S-100
通用型低温恒温器



Scryo-S-200
超高真空低温恒温器



Scryo-S-300
紧凑型显微低温恒温器



Scryo-S-400
超高真空(UHV)低温插件



Scryo-S-500
显微低温恒温器



Scryo-S-600
UHV JT插件

Scryo[®] 系列低温恒温器典型特性

类 型	S-100 低温恒温器	S-200 低温恒温器	S-300 低温恒温器	S-400 低温插件	S-500 低温恒温器	S-600 JT插件
样品环境	真空	超高真空	真空	超高真空	真空	超高真空
温度范围	<1.8K-500K	<2.2K-475K	<1.8K-475K	<1.8K-500K	<1.8K-475K	<1.3K-500K
震动水平	-	<5nm	<10nm	-	<5nm	-
漂移水平	-	<2nm/min	<3nm/min	-	<2nm/min	-
温度稳定	<25mK	<10mK	<10mK	<25mK	<10mK	<10mK
典型应用	紫外 / 可见光 / 红外, THz, 基质隔离, 穆斯堡尔谱, 高压 / 高能物理等	STM、AFM、离子阱、原子 / 分子冷阱、近场光学椭圆仪和高能物理等	显微 / 近场光学、低维材料、磁光、拉曼 / 红外光谱、高压、X-ray 和高能物理等	STM、AFM、ARPES、椭圆仪、红外、超快、X-ray 和高能物理等	显微(磁光)、低维材料、拉曼/傅里叶/布里渊散射、高压和高能物理等	STM、AFM、ARPES、椭圆仪、红外、超快、X-ray 和高能物理等

