

赋予物理学持久魅力的超流*

赵小明^{1,†} 刘伍明²

(1 北京科技大学物理系 北京 100083)

(2 中国科学院物理研究所 北京 100190)

2024-04-29 收到

† email: xmzhao@ustb.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240510

量子效应无处不在，但物质的量子特性往往只在微观层面显现。超流氦却与众不同，它的一些奇异特性可以被直观观察到。在《超流体》一书中，任职于欧洲散裂中子源和隆德大学的工程师约翰·魏森德(John Weisend)阐释了这些特性，它们使得这种非凡物质成为众多尖端科技不可或缺的一部分。超流氦不仅仅是科学上的奇趣现象，目前研究人员和工程师正以吨为单位使用它。

我阅读得津津有味，在这本书中魏森德探讨了超流氦在过去100年中最重大的科学进展中所扮演的关键角色，包括在欧洲核子研究中心(CERN)发现的希格斯玻色子和宇宙微波背景辐射的不均匀性，这两项成就均荣获了诺贝尔物理学奖。

《超流体》虽主要面向非物理学专业人士，但对像我这样具有凝聚

态物理背景的读者而言，书中同样充满了引人入胜的内容。魏森德的讨论超越了物理学本身，他以清晰而简洁的方式描述了工程师如何在科学实验中应用超流氦。书中还配以原始技术图纸作为插图，增添了一种温馨和历史的感受。

低温物理学的诞生

超流氦-4(亦称液氦II)的独特性质源自量子力学规则，这些规则决定了氦原子波函数的对称性。与作为费米子的电子不同，电子不能共享相同的量子态，而氦-4原子则不受此限制。当温度降至约2 K以下时，众多氦原子能够占据能量最低的基态。

在这种条件下，氦原子汇聚成超流体，它能够克服重力向上流动，穿过极小的孔隙，并且具有极高的热传导效率，同时不会像普通液体那样沸腾。魏森德阐释了这些特性如何使氦II在冷却物体至极低温度方面显得尤为有用。

《超流体》一书的叙述始于19世纪末，当时科学家们竞相液化氧气、氮气和氢气等气体，这一

竞赛催生了现代低温学。液化氦气尤其具有挑战性，因为它的沸点仅为4.2 K，远低于其他气体。而且，氦气直到1895年才在地球上被分离出来，在1903年于天然气中被发现并开始大量供应之前，一直十分稀有。

然而，1908年的突破性进展打破了这一僵局，荷兰物理学家昂内斯成功实现了氦的液化，成为历史上首位液化氦气的人。利用这一成就，昂内斯进而冷却了多种材料并测定了它们的物理性质，最终在1911年发现了超导现象。由于他在低温物理学领域的杰出贡献，昂内斯荣获了1913年的诺贝尔物理学奖。

昂内斯在液化氦时可能已经捕捉到了超流性的初步迹象，因为他看到了液体氦的相变现象。尽管最初实验是成功的，但直到20世纪30年代，液化氦气仍然很困难，直到那时超流体的零粘度特性才首次被测量出来。这一重要发现由苏联物理学家卡皮查和加拿大研究人员Jack Allen和Don Misener独立完成。然而，对于某些加拿大物理学家，包括本文评论者而言，只有卡皮查获得了1978年的诺贝尔物理学奖是不可接受的。

氦II的一个极具魅力的特点在于，其众多独特而有益的属性可以通过一个相对简洁的模型来阐释，该模型将其视为由超流体和正常流体两部分构成。这个二流体模型是由德国出生的Fritz London和匈牙利



难以置信的是，氦II的众多特性，包括其卓越的热传导性，都能通过简洁的二流体模型得到准确阐释，这彰显了模型的简洁之美及其非同凡响的解释力

* 本文编译自 Hamish Johnston. Superfluidity keeps physics cool. *Physics World*, 2024, (4):34.

的Laszlo Tisza在20世纪30年代末共同提出的，它在阐释氦II如何进行热传递和质量转移方面表现出色。魏森德在他的著作中对这个模型进行了精彩的阐释。

苏联理论物理学家朗道在1941年完成了对氦II的全面量子力学描述，因此荣获了1962年诺贝尔奖。魏森德认为朗道的理论深奥难懂，因此在他的书中并未深入探讨。尽管物理学界在20世纪40年代就对氦II有了深入的理解，但其独特的物理特性直到60年代才被科学家和工程师广泛利用，这一点在魏森德的《超流体》一书中得到了详尽的讨论。魏森德指出，氦II的两大优势在于其极低的温度和极高的热传导性，后者归功于一种独特的“内部对流”现象。

惊人的热导率

在温度梯度中，氦II的正常流体会远离子源，而超流体会则会向热源移动。魏森德阐释道，这一过程赋予了氦II卓越的热传导性能，其散热效率是铜的近千倍。此外，由于内部对流的高效热量传输，氦II在加热过程中不会形成气泡，从而避免了剧烈沸腾的风险。

尽管氦II展现出奇异的量子特性，它在大型管道中的流动行为却与常规流体相似，使得其处理起来相对简单。然而，与正常流体不同，超流体会能够轻松穿过微小的孔洞。这种现象导致了所谓的“喷泉效应”，利用这一效应，我们可以在无需任何机械设备的情况下实现氦II的输送。

氦II能够极其高效地将众多材料冷却至超导转变温度。超导体能够在不产生热量的情况下传输巨大

的电流，在魏森德的著作中，他探讨了氦II冷却的超导体在两个极具价值的应用领域中的重要作用。

首先诞生的是超导射频(SRF)共振腔，该技术在20世纪60年代开发，主要用于加速带电粒子。SRF共振腔实质上是一个位于超导体管道内，能够与射频信号发生共振的容器。当射频能量注入共振腔，会沿管道形成一个巨大的振荡电场。若在恰当时刻将带电粒子引入共振腔，该粒子便能获得加速。实际上，当多个共振腔串联使用时，能够实现极高的加速效能。

魏森德详细阐述了美国斯坦福大学在20世纪60年代进行的SRF共振腔的开创性研究，当时建成了斯坦福超导加速器。书中还提到，20世纪80年代，科学家们在建造美国的连续电子束加速器设施(CEBAF)时，决定放弃室温加速技术，转而采用氦II冷却的SRF共振腔。进入90年代，德国DESY的太电子伏能量超导线性加速器(TESLA)项目进一步推动了SRF技术的发展，旨在为国际线性对撞机(ILC)——有望成为大型强子对撞机(LHC)的后继者——提供技术支持。

在这一时期，包括CERN在内的众多实验室也开始采用氦II来冷却SRF腔体。CERN不仅利用氦II冷却SRF，还用其冷却了大型强子对撞机(LHC)的磁体。魏森德提到，CERN等实验室所使用的磁体冷却技术最初是为了实现一个截然不同的目标而开发的，即在磁约束下产生氢等离子体的核聚变。这一技术在法国的托卡马克装置(名为Tore Supra)上得到了应用，该设施自1988年运行至2010年，随后经过升级并更名为WEST。托卡马克现位

于卡拉拉什，而那里正在建造的国际热核聚变实验反应堆(ITER)将使用普通液氦而非氦II来冷却其磁体。

魏森德在其著作中深入介绍了另一个超流体工程的杰出成就——1983年发射的红外天文卫星(IRAS)，这标志着氦II首次在太空中的重要应用。他详细说明了IRAS的设计团队是如何克服重大挑战的，特别是他们如何在低重力环境下设计出一种能够在氦气与液氦混合时有效排放氦气的机制。

IRAS在运行期间不仅发现了众多红外天体，还成功维持了长达300天的超流体冷却状态。这一成就为后续使用氦II的太空任务铺平了道路，其中包括1989年发射的宇宙背景探测器(COBE)。COBE项目的成功直接促成了George Smoot和John Mather因发现宇宙微波背景辐射的各向异性在2006年荣获诺贝尔物理学奖。

脚踏实地

《超流体》不仅回顾了氦II的过去和现状，还对未来进行了展望。魏森德提出，随着机械冷却技术的进步，能够实现更低的温度，氦II在太空应用的年代可能已经落幕。他还简要探讨了另一种氦的超流体形态——氦-3，以及它如何与氦II联合，在稀释制冷机中将物体冷却至极低温度。

尽管超流体在太空探索中的应用可能已减少，但魏森德明确指出，在地球上，氦II的应用前景依然广阔。特别是，利用氦II冷却的核聚变发电站有望助力经济的去碳化进程，而新一代的加速器也许不久后将为我们揭示超出现有标准模型的物理现象。

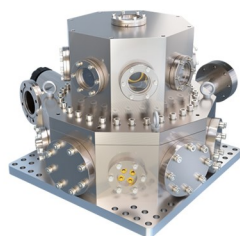
Scryo-S[®]

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

