

证明查德威克之误——英国散裂中子源的40年

(中国科学院物理研究所 罗会仟 编译自 Rosie de Laune. *Physics World*, 2024, (12): 26)

DOI: 10.7693/wl20250209 CSTR: 32040.14.wl20250209

2024年是英国ISIS中子用户装置运行的40周年。自从20世纪40年代开始，中子散射已成为研究从人类细胞到量子自旋的强大实验手段。在本文中，来自ISIS中子源的Rosie de Laune和她的同事们详细回顾了中子散射技术的科学进程，并介绍了该装置在过去40年里取得的重要科学成果。

据悉，英国物理学家詹姆斯·查德威克(James Chadwick)在1932年发现中子的时候说道：“恐怕中子对任何人都毫无用处。”其实，查德威克是大错特错了！因为英国的中子用户装置——ISIS中子及缪子源如今已运行了40年，超过60000名来自世界各地的科学家建立了全球化的中子散射用户群。

在查德威克的时代，科学家们认为原子内部虽然含有质子和电

子，但大部分都是真空的。不过仍然有一些无法解释的观测结果，比如氦原子核的质量和电荷数不一致的问题。中子的发现为这个问题寻找到了确切答案。事实上，查德威克的工作不仅帮助我们更清楚认识了原子结构，而且开辟了凝聚态物理的崭新领域——中子散射。正如其他亚原子粒子，中子也具有波动性，而且它的波长与原子间距相当。这意味着，如果一束中子被物

质所散射，那么它也将形成一些特定的干涉图像。而且，由于中子是电中性的，它将比X射线和电子具有更强的穿透性，可以直达原子核并发生相互作用。

如今，诸如ISIS这样的中子源有很多，它们可以用于研究各种物质。举个例子，通过探测航天器的部件并研究宇宙线中的高能中子对太阳能电池中元件的伤害，可以帮助我们提升无人驾驶汽车和飞行器

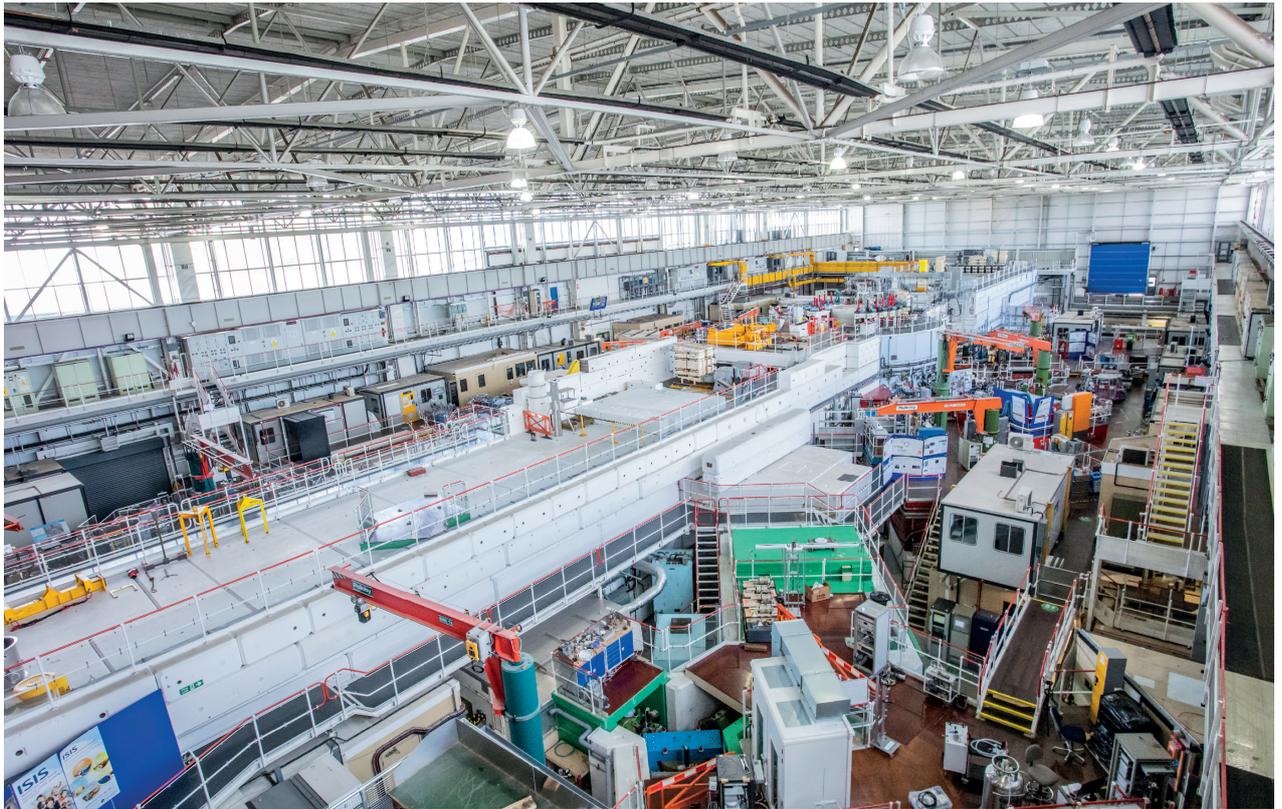


图1 英国ISIS中子和缪子源第一靶站

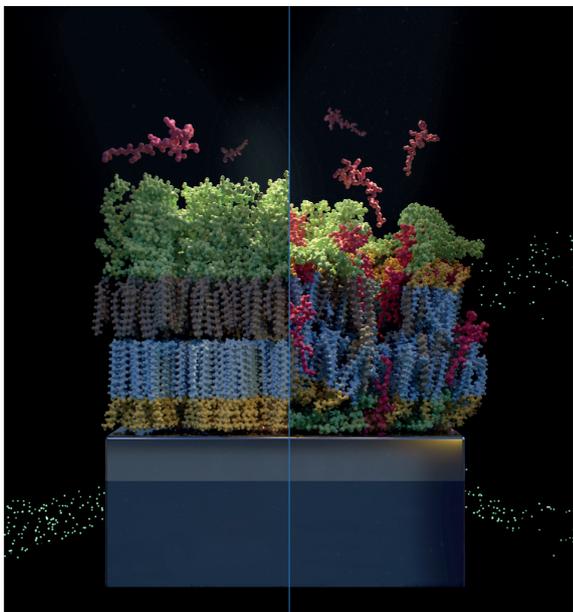


图2 关于抗生素如何在高温下穿透细菌外膜的示意图

的可靠性。

中子散射的开端

1942年12月2日，来自美国芝加哥大学的费米(Enrico Fermi)领导的科学家团队，见证了世界首个自持性链式核裂变反应堆的诞生，这改变了整个人类历史，也开启了原子能科学的新篇章。当时在现场有一位从事X射线散射的物理学家沃伦(Ernest O. Wollan)，在1936年中子的波动性被确证之后，他就意识到可以利用类似芝加哥那样的反应堆来产生中子，进而用于研究晶体中的原子位置。沃伦随后来到了位于美国田纳西的橡树岭国家实验室，在那里建造了第二台可控核反应堆。在1944年，他的团队成功观测到了氯化钠和石膏盐的中子布拉格衍射图案。几年后，舒尔(Clifford Schull)加入了沃伦的团队，改进了该技术并建造了世界首台用于中子散射的设备。舒尔在1994年因中子散射的工作而获得诺贝尔物理学奖，一起获奖的还有发明中子谱学的布洛克豪斯(Bertram Brock-

house)，遗憾的是沃伦因为十余年前已去世而未能获奖。

早期用于中子散射的核反应堆都是多用途的。首台用于产生中子的反应堆是位于美国布鲁克海文国家实验室的“高束流反应堆”(High Flux Beam Reactor)，建于1965年。紧接着的是1972年的法国劳厄-朗之万研究所的中子源，该中子源一直运行至今。ISIS走了一条不同于反应堆

的路线，采用了1970年代发明的“散裂中子”技术——借助加速质子轰击重金属靶来产生中子。高能质子与靶中的原子核发生对撞并被吸收，然后散裂出包括中子在内的许多高能粒子。第一个用于中子散射的散裂中子装置是于1980年运行的KENS装置，位于日本材料结构科学研究所。同期还有1981年运行的强脉冲中子源(Intense Pulsed Neutron Source)，位于美国的阿贡国家实验室。

随着ISIS中子源的设计和建设，散裂中子源相关技术得到了迅速的发展。该装置于1977年立项，1984年12月16日成功产生第一束中子。1985年10月该装置被命名为ISIS，由时任英国首相的撒切尔夫人剪彩。时至今日，已有大约20个反应堆或散裂中子源遍布世界各地，欧洲散裂中子源(European Spallation Source)也正在瑞典如火如荼地建造中。ISIS这个名字源自于流经牛津的一条河流，也是古埃及神话中转世女神伊西斯的名字。因为ISIS相当于NIMROD质子加速器的

涅槃重生，该装置从1964年开始运行到1978年退役，ISIS重新利用了其基建结构和许多部件。

中子与缪子的产生方式

ISIS的核心是一台800 MeV的加速器，它可以每秒产生50个高能质子脉冲。质子脉冲打到两个不同的钨靶上，被轰击的钨原子核发生散裂并产生中子飞向四面八方。在使用中子作为散射介质之前，需要将它们减速，主要通过一系列叫做慢化器的部件来实现。ISIS采用了各种不同工作温度环境的慢化器，它们可以产生各种不同波长的中子束流，以覆盖从埃米(10^{-10} m)到数百纳米(10^{-9} m)尺度的各种材料研究需求。

围绕两个靶站和慢化器的是25个不同的束线，用于引导中子到每个具体的实验站，其中大部分用于中子衍射探究各种物质的结构，包括晶体、非晶以及液体材料等。当中子被散射后，它们实际上也可能和材料内部发生了少量的能量转移，因此激发了原子或分子的振动。ISIS有7条束线站用于研究有能量转移的中子散射过程，这个技术被称为“中子谱学”。该技术可以告诉我们原子或分子的键合信息，研究比热、电阻和磁性相互作用等。中子具有自旋，所以它们对材料的磁学性质也很敏感。中子衍射亦可以用来探究诸如亚铁磁等各种磁有序态，中子谱学则可以用于研究磁激发态。

虽然中子可以测量各种短程或长程的磁有序，但对于一些磁矩非常小的局域效应，就需要用到另一种手段—— μ SR。从1987年起，ISIS也可以产生缪子束流，用于 μ SR的相关研究。在钨靶之前放置

一张碳箔，当质子穿过时就会产生 π 子， π 子随后迅速衰变成中子。不同于中子散射过程，中子会驻留在材料内部，然后迅速衰变成正电子。通过分析正电子的衰变过程，科学家们就可以探究中子难以研究的极弱静态磁矩或自旋涨落。正是如此，中子和中子技术通常作为互补实验手段，在一个大装置里实现和使用。

ISIS的负责人罗杰·埃克斯顿(Roger Eccleston)介绍道：“ISIS的设施覆盖了中子和中子科学领域的大范围研究。我们经常鼓励用户群体提供反馈意见和发展建议，这促使我们建设了4台新谱仪和5次较大的改造，以进一步提升并优化设施的性能。”他还说道：“ISIS是我毕业后的第一份工作，尽管我也在其他地方工作过，但ISIS始终是我职业生涯的重要一环。在这里，我见证了许许多多重要的科技发展和创新，促使我不断思考并最终回归。”

在过去的40年里，ISIS中子源研究的样品越来越小，也越来越复杂，但测量却变得越来越高效。现在，化学反应动力学过程甚至可以实时可视化，极端温度和压力等样品环境也能轻松实现。早期ISIS的科研工作主要集中在物理和化学领域，例如高温超导材料物性、化学材料结构、水的相变行为等等。最近，利用该装置，科研人员已经可以“看见”催化的实时过程，研究细胞膜等生物系统，改善无人驾驶汽车控制电路的可靠性等。

理解生命的基石

不同于X射线和电子，氢等轻原子核对中子的散射非常剧烈，意味着中子可用于探究水或有机材料。液态水几乎遍布我们星球，但

是其特殊的分子结构导致了它具有极复杂的化学和物理性质。在2000年左右，来自英国和意大利的科学家对水的相变行为开展了一项重要研究，他们发现，液态水在压力下会出现低密度和高密度两种不同结构之间的相变。

随着ISIS技术水平的不断提升，人们甚至可以研究水作为“生命分子”在细胞内部的行为，这是蛋白质折叠和化学反应等生命活动的重要支撑。在2023年，来自葡萄牙的研究团队利用ISIS设施来探究细胞内的水是否可以作为癌症的生物标识。因为细胞内的水受限于纳米尺度空间，它们将体现出与正常水不一样的性质。在该尺度下，水的物性对环境极其敏感，如果细胞发生癌变就会发生变化。该团队证明这个变化可以被中子谱学所探测，即在癌细胞中的水具有更强的机动性。

如果光入射到两个具有不同折射率的界面处并角度合适的话，就会发生全反射现象。同样，类似的反射效应在中子遇到材料界面时也可能发生。ISIS的中子反射谱仪主要用于测量薄膜样品的厚度、表面粗糙度和化学成分等。2018年，一个来自英国的团队利用该技术手段研究了一种作用于细菌外膜的强效抗生素，这种抗生素仅在人体体温范围内有效。研究人员发现在此

温度范围内，位于细胞外膜的抗生素分子的热运动使得它们更容易进入细胞内部，从而彻底破坏细菌结构。

探索量子世界

就在ISIS开始运行的一年之后(1986年)，瑞士IBM实验室的物理学家柏诺兹(Georg Bednorz)和穆勒(Karl Alexander Müller)发现了35 K的高温超导材料，比当时已知超导材料的临界温度记录提升了12 K。这个发现很快就在1987年获得了诺贝尔物理学奖。高温超导电性是1980年代最重要的科学发现之一，也是ISIS早期的研究重点。另一个重大突破出现在1987年，钇-钡-铜-氧(YBCO)体系被发现具有77 K以上的高温超导电性，这意味着超导不再依赖于昂贵的液氮，而仅用更低廉的液氮冷却就能实现。YBCO的材料结构就是由美英科学家在ISIS测定的。

另一个在ISIS研究的典型量子体系就是“量子自旋液体”(QSL)。我们知道，大部分磁性系统在降温之后会形成诸如铁磁序等磁有序基态，但是量子自旋液体是电子自旋强相互作用系统，即使被冷却到绝对零度，也不会形成磁有序结构。理论上，量子自旋液体表现出长程纠缠性质，从而可以用于量子计算和通讯，受到了科研界广泛的关注。但是，实验上确证量子自旋液



图3 量子自旋液体示意图

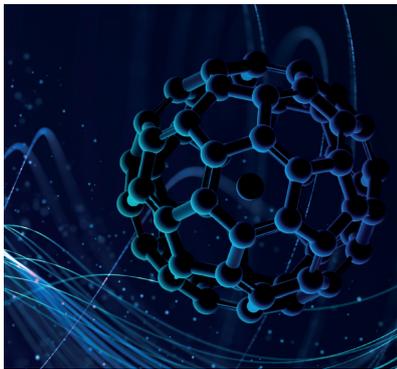


图4 巴基敏斯特富勒烯(巴基球, 即 C_{60})

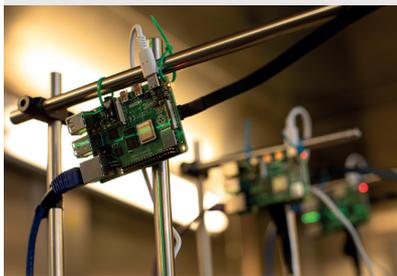


图5 芯片在高中子辐照下的短路测试

体具有很大的挑战性。最近, 来自 ISIS 的中子散射和缪子谱学研究证明一类材料可能具有自旋液体态。

开发可持续方案和新材料

多年来, 为了实现越来越极端和复杂的样品环境, ISIS 的实验装置不断改进。大约 20 年前, 一个英国研究团队在 ISIS 进行的高压中子实验表明, 他们设计的表面活性剂可以增强液态二氧化碳的溶解性, 这可能为食品和制药工业开辟出一种环保解决方案, 甚至替代传统化石溶剂的使用。

今天, 随着样品环境、探测技术和数据分析软件的进一步发展, 使我们能够实时观察化学反应过程, 而且保持原料处于与其实际应用条件非常相似的环境中。最近, 英国和德国的一个研究团队利用中子成像技术监测了一种广泛应用于化工行业的催化剂, 以提高反应效

率。很难有合适的方法能够真正观察到催化反应过程, 但中子成像技术却能够做到实时可视化。

另一个重要的发现是在 ISIS 刚开始运行时, 即著名的巴基敏斯特富勒烯, 或简称“巴基球”的发现。巴基球是一个由 60 个碳原子组成的球状分子, 类似于足球的外形。首个合成 C_{60} 分子的科学家获得了 1996 年的诺贝尔化学奖。科学家们利用中子散射等手段来研究这种碳的同素异形体, 比如把巴基球聚集在一起形成的固态晶体。在 1990 年代初期, 来自 ISIS 对晶态巴基球的研究表明, 尽管室温下相邻分子的取向随机, 但是在 249 K 以下它们形成了一种有序结构以降低体系能量。40 多年来, 富勒烯(包含巴基球在内的碳材料家族)持续带来了许多研究机遇。借助一种称为“分子手术”的过程, 合成化学家可以在富勒烯笼中开一个小口, 从而能够插入原子、离子或分子簇。最近, ISIS 的中子散射研究被用来表征困在巴基球内的氦原子。这些内插富勒烯有助于我们理解与受限粒子相关的量子力学过程, 从光伏到药物递送等方面都具有潜在应用。

中子和缪子不仅在未来应用材料研究中大放异彩, 而且在材料、方法和文化等方面具有独特的探索视角。在 ISIS, 借助中子和缪子的强穿透性和非破坏性特点, 人们研究了许多珍宝, 如古埃及的蜥蜴棺和古日本武士的头盔, 在不破坏这些珍贵文物的情况下, 帮我们认识过去的世界。

洞悉内在并展望未来

如果你想认识清楚事物为何出现结构性失效, 就必须深入其内部一探究竟, 中子对材料的强穿透能力使得工程师们能够做到

这一点。ISIS 的 Engin-X 束线站可通过测量原子晶格平面的间距来检测材料中的应力。该技术已广泛应用于航空航天、石油和天然气勘探、汽车以及可再生能源等方面的研究。

最近, ISIS 也和一些公司合作, 尝试使用中子来辐照他们的芯片, 由此模拟宇宙射线在大气中产生的高能中子, 它们可能会破坏电子设备的可靠性。所以, 当你下一次安全地飞行、开车或上网时, ISIS 也悄然提供了帮助。

过去的 40 年里有了如此之多的重要发现和技术发展, ISIS 已经成功证明查德威克当年的论断是完全错误的。该科学设施正着眼于未来数十年的中子散射研究。“要预测科研的未来是十分具有挑战性的, 不过我们仍然可以围绕几个方向来开展研究”, ISIS 的副主任朗瑞奇(Sean Langridge)认为, “科学, 通过发现、合成、调控新材料来发掘其内在社会价值。此外, 我们还将借助中子的优势来对材料功能进行工程设计和优化, 比如, 尽可能延长其使用寿命并降低对环境的影响。”

在未来, 相关需求会持续不断并越来越复杂, 相关数据也会与日俱增。在 ISIS 产生的大量数据集还可以借助机器学习技术来分析, 由此鉴定出传统方法无法找出的新现象, 进而帮助我们发现新材料。在 ISIS 的 40 周年庆典之际, 中子的利用展示了其在物理领域的巨大价值, 下一代中子和缪子源的可行性设计也正在进行中。四十年里的中子应用已超所值, 下一段数十年里, 我们对英国中子和缪子科学的发现充满无限期待。