

中国散裂中子源小角散射谱仪

陶举洲

(中国科学院高能物理研究所 100049)

作为中国散裂中子源 (CSNS) 首批建设的三套谱仪之一, 小角散射谱仪用于探测物质体系在 1~100 nm 尺度内的微观和介观结构。它的实验应用范围将涵盖化学、物理、生物、材料、地质等广泛学科, 服务于国家能源、环境、生物和新材料等诸多高科技研发领域。中国散裂中子源小角散射谱仪建成后, 能为图 1 所示例的诸多科学探索与技术研发工作, 提供必需的实验方法及其技术手段。

一、中子散射技术的缘起与现状

中子散射技术的基本原理在 20 世纪 50 年代确立,

60 年代在研究用原子能反应堆上广泛应用, 70 年代末期在新一代基于加速器的脉冲中子源上得到扩展, 21 世纪以来美国 (SNS)、日本 (J-Parc/MLF)、中国 (CSNS) 和欧洲 (ESS) 更基于这一技术建成和正在建设全球一些最大的科学基础设施。这一技术领域实质上是多个科学技术源流的汇聚:

1. 核科学与技术的兴起与发展

中子是原子能的主角。1932 年发现之后的数十年间, 已被用来实现各种元素和同位素转换 (核嬗变)。1938 年核裂变发现, 之后很快链式反应发现, 1942

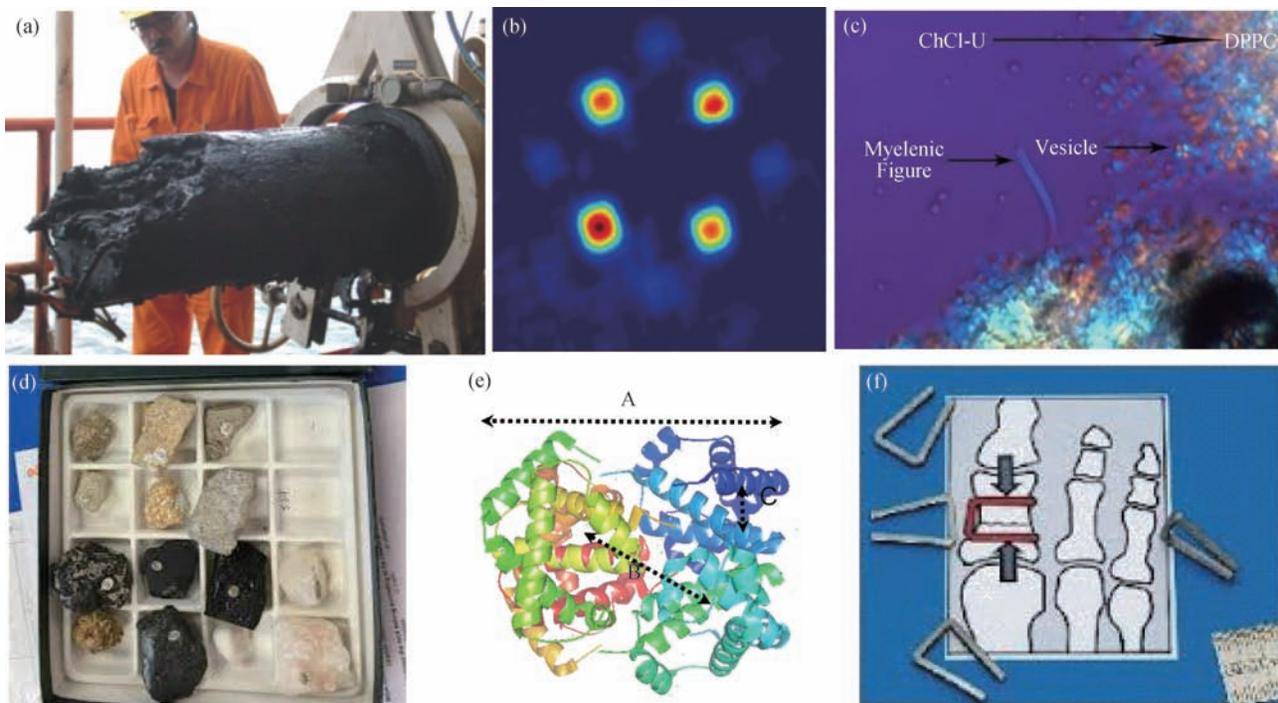


图 1 小角中子散射应用示例。(a) 研究原油中沥青质聚集现象以缓解油管堵塞, 英国散裂中子源 ISIS; (b) 直接观测高温超导体块体中的磁通涡旋结构与形貌, 美国 NIST 反应堆源; (c) 作为绿色化学载体的低共熔溶剂中的自组织现象, 澳大利亚 OPAL 反应堆源; (d) 测量沉积岩的表面粗化与分形形貌, 美国 ORNL 反应堆源; (e) 牛血红蛋白内不同尺度的亚结构可以被小角中子散射同时观测, 日本北海道大学电子加速器中子源; (f) 镍钛形状记忆合金中的纳米颗粒析出直接影响材料性能, 法国 ILL 反应堆源 (图片源自相应公开文献或公共交流)

年第一个人工核反应堆芝加哥 CP-1 实现，1945 年首次核爆，人类进入原子时代。1953 年美国启动“和平原子”（Atoms for Peace）计划，试图通过建设核电与科研用原子反应堆以开展原子能的和平利用来缓和世界对核武器的广泛恐惧。至 2012 年，全球约 11% 的电力由核反应（裂变）堆产生（相应的水电比例约为 16%）；围绕中子的产生、控制、探测和屏蔽而产生的科研与技术进步，也成为核科学与技术的核心内容。

2. 现代物理：中子与物质间相互作用

物质世界的四种基本作用模式：重力、电磁场、强相互作用、弱相互作用。在中子和物质作用时有着各自独特和有趣的表现，更惊奇的是都可以相对容易地进行宏观观测！从实验角度，中子束和实验样品“相遇”，会发生吸收、散射、衰减（前两者的综合结果）、裂变（包含特定同位素的特殊样品）。样品中的每个基本粒子都会与中子束作用，各自产生作为物质波的散射中子波；基本粒子间又存在各种相互作用，决定着散射波之间的相互量子干涉。观测这一现象，利用已知的中子与单个原子间相互作用（通常用原子的散射长度表征）来研究未知的物质内部原子间相互作用，就是在原子尺度上研究气体，凝聚态体系和材料；利用已知物质如中子光学器件内部的基本粒子间相互作用（以中子光学器件为代表）来研究未知的中子与基本粒子或场之间的相互作用，中子则成为研究重力场和量子效应等基本物理的独特手段。

3. 基于加速器技术的脉冲中子散射

借由各种基本粒子如电子、光子和质子与原子核反应而非核裂变同样可以产生中子。随着加速器物理与工程的进步，20 世纪 70 年代后期以来脉冲强流质子加速器被发展应用于产生中子束，至 90 年代这一技术达到成熟。虽然脉冲中子源依赖于造价昂贵的强流加速器，技术更为复杂的中子探测包括后端快电子学技术、和更高要求的计算处理能力，但作为射线装置而非原子反应堆，在前期投资和后期退役方面更具优势。随着 20 世纪 50 年代以来兴建的诸多研究用反

应堆逐步退役，脉冲中子散射技术得到大规模推广。

二、小角中子散射技术

20 世纪 30 年代法国的桂尼尔（Guinier）在观测 X 射线穿透 Al-5%Cu 的金属箔时，发现直接穿透的 X 射线束周围明显增强的散射信号。因散射实验的基本观测为散射信号强度随散射角度大小的变化，这一现象被称之为小角散射。图 2 示意中子散射实验的三个关键点：中子束、实验样品和探测器。中子散射信号强度以不同颜色表示，散射角则是中子束散射方向与入射方向间的夹角。其中探测器上红色区域对应的散射角度最小（通常在数个弧度以下），信号明显增大，被一般性地通称为“小角散射”或“小角散射区域”。与之相对的则被称为“广角散射”（如图中绿色区域）。

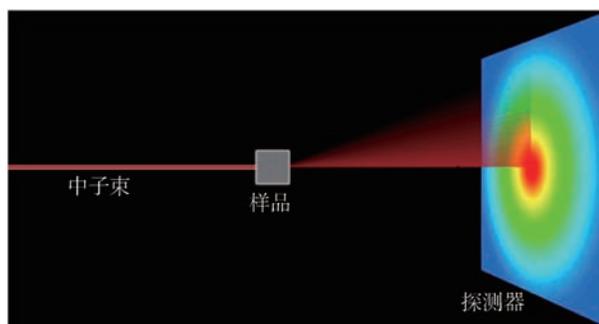


图 2 小角散射示意。样品散射中子束至探测器上不同位置。临近直通束，散射角度很小的区域被称为“小角散射”，通常反映样品在大尺度（>1nm）上的内部元素分布与颗粒密度涨落。与之相比，衍射精确地在 ~1nm 尺度上测量晶格中原子晶面间距

实际上，在光子（X 射线）、电子和中子散射中都会产生小角散射，其信号包含着三方面信息：1）样品内部颗粒与基体间的衬度（类似于黑白照片的灰度）。衬度是颗粒与基体之间散射能力的差别，而散射能力则取决于原子密度和单个原子对不同粒子的散射能力；2）颗粒的形状和尺寸；3）颗粒间的平均空间分布（关联）。小角散射实验即是基于实验测定的样品散射信号强度，研究凝聚态或材料体系内颗粒的形状、尺寸、密度与平均分布。其中，样品是中子束的作用对象和中子散射实验的研究对象；中子散射的本质是实验而非测试，这意味着往往需要针对具体科研问题，考虑谱仪性能和实验条件，准备特定样品。

1. 1~100 纳米尺度介观物质的探索

现代科学的主要成就之一，是对不同时空尺度上的自然世界的观测，对于不同的“物理”，或“科学”，它们的观测、描述和范式各不相同。从这一角度，化学研究的核心范围位于 10^{-9}m 附近 (1\AA)，生物则为 10^{-5}m (老鼠细胞大小)，粒子物理在 10^{-15}m 以下 (1 费米)，而地理在 10^3m 左右，天文则在 10^7m 以上 (地球半径)。受中子源亮度和中子探测器分辨率的约束，小角中子的探索范围，大体在 $1\sim 100\text{nm}$ 尺度。而这正是一些被寄予厚望的新材料，新能源和生命科学等高新技术的聚焦领域。

2. 独特优势与缺陷

与中子小角散射技术最为接近的物质探测与结构表征手段，是透射电子显微镜 (TEM)。与之相比，中子小角散射实验不需要损伤或消耗样品，可以不受视场限制观测尺寸在毫米以上的块体样品，并适合进行各种原位、特殊环境和动力学实验；但实验装置造价昂贵并数量稀少，分辨率差，作为散射实验则数据无法直观化，物理分析非常依赖模型。由于氢元素的电子散射能力很弱而中子散射能力独特，对富含氢元素的样品，可以通过氘代引入新的实验自由度，这种被称为“衬度变换” (contrast matching) 的技术使得中子小角散射在一些含氢体系的研究中，有着特殊应用；类似的是中子与磁性样品间发生通常原子核散射之外的磁散射。图 3 以不同颜色分别代表基体、颗粒外壳与颗粒内核的散射能力。通过同位素取代，通常是氘代，可以调整基体 (实际中也可以是颗粒) 的散射能力分别与颗粒外壳或颗粒内核相同，使得“衬度”，即散射能力差别在两种极端情况下各自消失，则对于中子而言只有衬度未消失的结构部分可见，从而使得中子小角散射方法获得独到的“鉴别”能力。

3. 依赖技术与发展方向

中子小角散射技术依赖于足够亮度的中子源和新的中子探测技术而发展，世界范围内这一领域目前处于平台期和推广期。有趣的是随着更高流强大型加速器中子源的建设 and 更先进中子光学器件包括超镜导

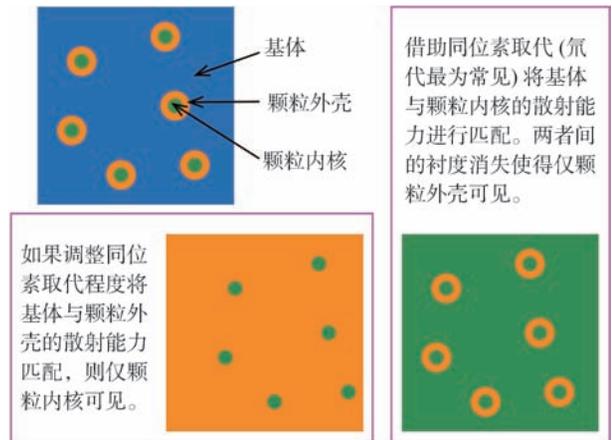


图 3 衬度变换示意。基体由蓝色分别改变为绿色 (与颗粒内核接近) 或橙色 (与颗粒外壳接近) 后，只有颜色不同 (衬度未消失) 的部位可见

管和斩波器的研发应用，新一代脉冲中子小角散射谱仪有回归传统反应堆中子小角散射谱仪设计特点的趋势。同时，在富含氢的生物或软物质体系中应用中子小角散射方法，有着相当科研潜力与前景。

4. 应用领域

中子小角散射谱仪的科研应用领域按样品种类大体分四类：高分子科学与工程，胶体与界面化学，合金、陶瓷与液晶等凝聚态材料，生物大分子。实际上，几乎任何可以用颗粒 (particles) + 基质 (matrix) 模型描述的凝聚态和材料体系，只要颗粒大小在 $1\sim 100\text{nm}$ 左右尺度 (数量级)，样品的中子小角散射数据都可以提供独特的微 (介) 观信息。

5. 小角中子散射实验

小角中子散射实验观测得到的信号强度通常为：

$$I = \sum_i \varphi_i \Delta\Omega_s \frac{d\Sigma}{d\Omega} V_{\text{sample}} T \eta \Delta\Omega_d$$

其中 φ_i 为特定中子波长 i 下的源通量， $\Delta\Omega_s$ 为样品所包含的中子源立体角， $\frac{d\Sigma}{d\Omega}$ 为单位体积的样品中子散射截面， T 为样品透过率， η 为探测器效率， $\Delta\Omega_d$ 为探测器所包含的样品立体角。样品中子散射截面由样品中原子的中子散射长度和平均分布，即样品结构决定，随散射波矢 $q = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda}$ 而变化，是中子散射实验的基本测量对象。

小角中子散射实验的核心内容，是测得特定样品的小角中子散射截面 $I(q)$ 后，通过数据分析获得其中所包含的样品颗粒形状、大小和密度等结构信息。源本身的中子谱特性，中子光学和探测技术水平，以及实际样品中粒子相关长度的大小决定了小角中子散射的 q 值范围，散裂源上的小角散射谱仪 q 值范围目前在 $10^{-3} \sim 1 \text{ \AA}^{-1}$ ，对应着 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 的实空间观测尺度。小角散射谱仪设计和建造的关键科学目标，即为用户提供满足其所需 q 值范围内准确、可靠、高效地测量样品中子散射截面的实验手段，和相应的数据处理分析工具。

三、中国散裂中子源一期小角谱仪

中国散裂中子源 (CSNS) 一期小角谱仪 (SANS) 是我国首套脉冲中子小角散射谱仪，它将与已建成的北京原子能院 CARR 堆中子小角散射谱仪和中国工程物理研究院反应堆中子小角散射谱仪技术互补并友好竞争，共同服务国内科研用户，推进国内中子科学与技术的进步。CSNS 和 SANS 同时有着更大的参与国际合作与竞争的潜力。

1. 设计思想与技术指标

CSNS 设计为一期束流功率 100 千瓦，升级潜力 500 千瓦，频率 25Hz 的用户实验装置，三个慢化

器中的耦合液氢慢化器提供最高的长波中子通量，是 SANS 的实际工作中子束来源。权衡谱仪运行可靠性、工程实施 (或升级改造) 灵活性与性能指标先进性三者间的关系，参考国际上散裂中子源小角散射谱仪运行和建设的经验教训，着眼国内用户的科研需求与相关工程技术经验，我们选择了短直束线设计，确定 CSNS 小角散射谱仪的基准技术指标为： q 范围不小于 $0.01 \sim 0.5 \text{ \AA}^{-1}$ ，分辨率在最小 q 值处不低于 35%，样品处计数率不低于 $10^5 \text{ n}[\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$ 。

2. 主要部件介绍

沿中子束入射方向小角谱仪束线主要由入射直光路、实验样品空间和探测器系统三部分构成。入射光路中的准直器约束束斑发散度；中子斩波器选择合适的实验中子波段；光阑精确控制束斑大小；监测器测量入射中子束强度；由约 100 根 8 mm 直径，约 1 m 长位置灵敏 ^3He 管二维阵列组成的主探测器测量散射中子束强度；主要由于空气中 ^{14}N 的较强散射会破坏入射发散度和产生本底信号，全部光路都设计位于 10 Pa 左右低真空中；内层铁和外层混凝土屏蔽中子与 γ ，提供辐射安全保护同时防止其他中子进入束线产生本底；由屏蔽隔墙组成的样品室是用户进行中子散射实验的工作空间，换样和基本样品环境设备设置

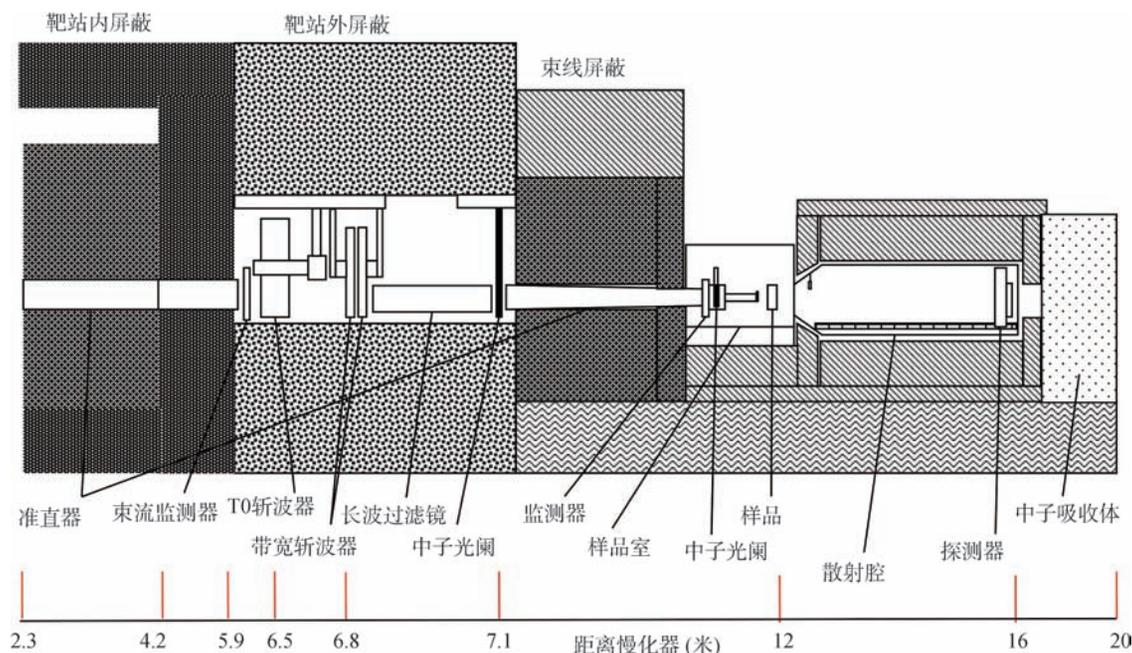


图4 中国散裂中子源中子小角散射谱仪束线主要部件示意

在这里完成后，用户离开样品室，完成安全清查与锁定，远程开启和监控实验。靶站出口距慢化器约 6.5m，样品距慢化器为 12m，探测器距样品一般为 4m；通常样品厚度 1~2mm，直径 8~12mm。

3. 工程建设

CSNS SANS 已完成物理设计、初步设计和工程设计，进入部件加工制造阶段，计划 2016 年春季完成基本土建施工并开始束线安装，2017 年 9 月得到第一束中子产生数据。在总长约 20m 的束线即中子入射飞行方向上，沿束线横截面即垂直中子束方向约 60cm 范围内保证和保持 0.1~1mm 的部件结构与安装精度，需要大量系统细致的工作；而 8mm 分辨率、 $1 \times 1\text{m}$ 面积、工作在真空中，需要提供宽动态范围和直接承受可能的快中子直射束的二维探测阵列作为目前国际先进水平的中子探测技术，其工程实现更是我们需要解决的主要技术挑战。

4. 前景展望

CSNS 计划服役期为 30 年，每年运行时间 3000~5000 小时左右，产生海量中子散射数据，进入

世界 4 大脉冲中子源，一举填补我国在中子散射领域的诸多技术空白。CSNS SANS 项目力争在 CSNS 上建设一套通用、可靠、高效的小角中子散射用户装置，成为 CSNS 这一国家重大科技基础设施的核心部分，为中国科技的世界创新作出应有贡献。

四、总结与思考

被称为晶体学家中的物理学家的桂尼尔，最初发现小角散射现象源自他采用当时新型的弯曲石英单色器自制“Guinier 相机”，应二位材料学家的要求为观测硬化合金材料的结构进行合金样品的 X 射线散射实验。可见中国散裂中子源小角散射谱仪建设的诸多要素，包括多学科交叉、科研需求驱动、技术手段创新、科学工程实施等，自有源渊。我们服务于国家的科技创新需求期望与任务布局、以更大规模地重现这一进程。

中子散射少见地汇聚着现代物理的三个主要领域：凝聚态、粒子物理和原子与光学物理；它的基本原理植根于凝聚态物理，技术手段依赖实验粒子物理，实验方法类似原子与光学物理。中子小角散射进而以物理方法服务于物质科学，是全面掌握、检验和应用现代物理知识的绝佳领域。

封二照片说明

深切缅怀谢家麟院士

中国科学院院士、国际著名加速器物理学家、2011 年度国家最高科学技术奖获得者，九三学社社员，中国科学院高能物理研究所研究员、原副所长谢家麟先生因病于 2016 年 2 月 20 日 8 时 12 分在北京逝世，享年 96 岁。

谢家麟 1920 年生于黑龙江省哈尔滨市，1943 年毕业于燕京大学物理系，1951 年在美国斯坦福大学获博士学位，回国途中受阻，被迫返回美国。1955 年，他冲破重重阻力回到祖国，先后在中国科学院原子能研究所和高能物理研究所工作，曾担任高能物理研究所副所长、“八七工程”加速器总设计师、北京正负电子对撞机总设计师和工程经理、粒子加速器学会理事长、高能物理学会副理事长、国家 863 高技术主题专家组顾问。1980 年当选为中国科学院学部委员（院士）。

谢家麟是我国粒子加速器事业的开拓者和奠基人

之一，为我国高能粒子加速器从无到有并跻身世界前沿起到了至关重要的作用，对我国高能物理实验基地的建造做出了卓越贡献。他带领团队研制成功我国第一台大科学装置——北京正负电子对撞机，亚洲第一台自由电子激光装置，我国第一台高能量电子直线加速器，世界第一台以高能电子治疗深度肿瘤的加速器和世界第一台紧凑型新型加速器样机。他荣获国家最高科学技术奖、国家科技进步特等奖、国家科技进步二等奖、全国科学大会奖、中国物理学会胡刚复物理奖、何梁何利科技进步奖等十余项奖励。为纪念谢家麟在粒子加速器科学技术上的卓越贡献，国际天文联合会将一颗国际编号为 32928 号的小行星正式命名为“谢家麟星”；亚洲未来加速器委员会决定将其颁发的国际粒子加速终身成就奖命名为“谢家麟奖”。