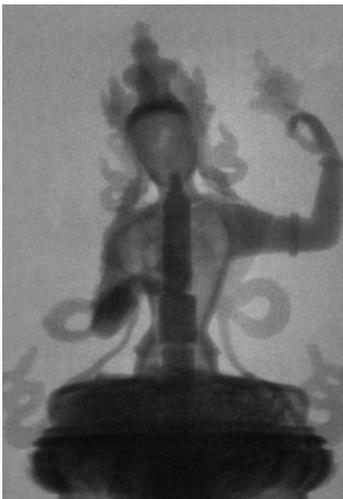


中子成像技术的进步为低功率研究堆创造了新机遇

文/Mary Albon



布拉格捷克技术大学（CTU）的中子成像系统揭示了一尊西藏苯教雕像（Chamma）内的世界轴心（连接物质世界与精神世界的标志）。（图/捷克技术大学L. Sklenka）

中子成像是一种利用研究堆或加速器中子源对内部结构进行检查的非侵入性技术。原子能机构项目副主任Molly-Kate Gavello说：“这是一种神奇的工具，在科学和工业研究与开发以及法证学和文物研究方面具有无限的潜能。”中子成像可用于测试电机、减震器和涡轮叶片，可以显示水如何在有生命的植物体内流动，或检查充满铁质岩石的恐龙头骨化石的内部情况。

尽管中子成像技术自20世纪50年代就开始使用，但直到20世纪90年代，二维胶片成像一直是主要成像方式。随着数字技术（包括先进数字照相机）的出现，中子成像现采用计算机断层扫描（CT）技术，该技术使用数百张从不同角度拍摄的图像来创建高度详细的三维（3D）图像。

直到最近，由于技术和资金方面的原因，使用CT或三维成像技术进行中子成像对于低通量中子源（如低功率研究堆）仍不具有可行性。

低功率下的高质量图像

2021年，布拉格捷克技术大学（CTU）的博士生雅娜·马图什科娃和她的导师卢博米尔·斯克伦卡展示了在研究堆功率为500瓦的情况下使用CT进行中子成像的能力，从而改变了

这一局面。

这一突破源于两个方面的发展。首先，低成本、高质量的天文相机在此十年前已经问世。其次，德国慕尼黑工业大学海因茨·迈尔-莱布尼茨研究中子源（FRM II）的研究人员意识到这些新型相机的潜力，并于2016年展示了首个用于中子层析成像（包括低功率反应堆）的迷你设施。布克哈德·施林格尔带领的团队在FRM II研究堆开发并建造了一套配备3D打印探测器外壳的低成本、高质量的中子成像系统，以及用于先进中子断层成像和射线成像实验系统（ANTARES）设施的缩小版专业控制软件。新探测器的图像质量与ANTARES设施通常使用的最先进系统相当。

马图什科娃希望用低功率中子源（如捷克技术大学的500瓦VR-1培训反应堆）测试中子成像，相比之下，20兆瓦FRM II反应堆的功率是捷克技术大学反应堆的4万倍，因此产生的中子也是捷克技术大学反应堆的4万倍。由于新冠疫情的限制，她无法进入捷克技术大学的设施进行实验，因此面临着挑战。

斯克伦卡联系了施林格尔，请他就如何复制FRM II开发的低成本系统提供建议，施林格尔通过视频通话向马图什科娃提供了建议，并向她提供

了有关系统设计和从何处采购必要部件的信息。马图什科娃一步步地在自己家里建造了一套中子成像系统，并用可见光对其进行了测试。

新冠疫情限制解除后，马图什科娃在捷克技术大学反应堆安装了她的系统，并成功生成了捷克技术大学的第一张数字中子二维图像，随后又在500瓦的功率下照射12小时进行中子计算机断层扫描成像。

马图什科娃目前正在改进捷克技术大学的中子成像系统，这是她博士研究的一部分。该系统主要用于教育目的，但也用于开展研究，例如与布拉格国家美术馆合作检查文物。

共享技术和专门知识

FRM II设施和捷克技术大学的经验表明，微型设施可用于任何中子源，包括功率极低的研究堆。施林格尔说，他的团队随时准备免费提供设计图和软件，并在国际上帮助安装和调试。

有了三维打印机制造的部件、缩小到适合笔记本电脑的软件以及天体摄影相机价格的下降，整套设备只需不到5000欧元就能组装完成，而且运

输方便。2022年，施林格尔和美国爱达荷国家实验室的研究科学家亚伦·克拉夫特带领原子能机构专家工作组，在智利核能委员会的RECH-1研究堆安装了数字中子成像系统。施林格尔用手提箱带来了组件，系统在两天内就安装完毕。

“原子能机构在为低功率研究堆提供这项技术方面发挥了关键作用。”施林格尔说，“新的灵敏探测器为这些反应堆开辟了一个全新的应用领域，这些反应堆无法为复杂的中子散射实验提供足够的中子。中子成像使它们更容易用于教育、研究和与博物馆的合作。”

原子能机构支持与研究堆的技术合作，包括专家工作组访问和设备采购。它还出版中子成像指南，提供地区培训，并正在扩大电子学习机会。2022年，通过原子能机构协调，马图什科娃在阿根廷 RA-6 研究堆工作了四个月，帮助安装和测试低成本中子成像系统。

在奥地利塞伯斯多夫的原子能机构中子科学设施也安装和调试了一个类似的中子-X射线双系统，目前正用于培训。

“新的灵敏探测器为这些反应堆开辟了一个全新的应用领域，这些反应堆无法为复杂的中子散射实验提供足够的中子。”

—德国慕尼黑工业大学布克哈德·施林格尔



卢博米尔·斯克伦卡、雅娜·马图什科娃和布克哈德·施林格尔在布拉格捷克技术大学研究堆设施合影。

(图/慕尼黑工业大学)

什么是中子成像？

中子成像是一种非侵入式方法，用于检查不透明物体的内部结构和组成。其原理与X射线成像类似。不过，X射线会被金属等致密材料吸收，而中子束则能穿透大多数金属和岩石，并且会被一些轻元素（如硼、碳、氢和锂）衰减。中子还有助于观察磁场以及技术和结构材料中的应变。