

● 国家“十一五”重点建设大科学装置



中国散裂中子源

China Spallation Neutron Source

——建设我国首台世界一流的脉冲中子科学综合实验装置



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

前言

直到 19 世纪中叶，人们对物质世界的观察还一直停留在用肉眼看的阶段，“针尖”和“麦芒”可能是当时人们所能观察到的最微小的物体。由于观察手段的限制，人们对物质微观结构的认识也长期停滞不前。19 世纪中叶以后，光学显微镜的发明使人们对微小物体结构的观察能力提高了 1000 倍以上，观察事物的能力得到了跨越式的发展。人们发现，在一粒细小的沙子里竟然还隐藏着大千世界。更晚些的电子显微镜的发明，已经使人们可以观察到某些重金属的原子。19 世纪末和 20 世纪初 X 射线及中子的发现，使人们找到了研究物质微观结构的更强有力的工具，特别是中子的发现及中子散射的应用，使人们不仅可以通过可见光和电子束来看世界，还可以用中子来观察物质世界，从而去打开更多的未知之门。

当一束中子入射到研究对象时，与材料中的原子核或磁矩发生相互作用，被散射出来，通过测量散射出来的中子动量的变化，就可以研究在原子、分子尺度上各种物质的微观结构和运动规律，从而知道原子、分子在哪里，原子、分子在做什么，这就是用中子看世界的方式，这种研究手段就叫做中子散射技术。

由于中子自身的特性，中子散射成为研究物质结构和动力学性质的最理想工具之一，在众多学科领域中得到了广泛的应用。

“工欲善其事，必先利其器”。为使中子散射技术得到更广泛深入的应用，建设先进的中子源是首要任务。从上世纪 80 年代开始发展起来的、基于先进加速器技术的散裂中子源是目前世界上最先进的中子源。

虽然中子是如此微小，但产生强中子束的先进中子源却是异常庞大的装置，它不是一台放在实验桌上的高、精、尖仪器，而是数量庞大的各种各类的高、精、尖设备和仪器所组成的一个有机的整体。这类装置占地动辄数百亩，耗资以数十亿记。

“中国散裂中子源（简称 CSNS）”就是这样一台世界顶级水平的大科学装置，它产生的中子数量将高达每秒每平方厘米 2 亿亿个。该项目已得到国务院批准，将建于广东省东莞市。建成后，CSNS 将进入世界四大散裂中子源行列。作为发展中国家的第一台散裂中子源，它将为发展中国家做出榜样，提高我国的科学地位。散裂中子源是一个国家的科技水平、工业水平等综合实力的标志。中国散裂中子源是开展前沿学科及高新技术研究的先进大型实验平台，有望使我国在众多前沿科学及应用领域取得突破。中国散裂中子源将于 2013 年前后建成，在正常运行状况下其科学寿命将超过 30 年。

散裂中子源建设过程中所发展的一系列先进技术将为一些重要的大型科学及民用装置如质子治癌、洁净核能源（ADS）等打下坚实的科学基础，储备丰富的工程经验。CSNS 在机械加工、医药医疗、石油化工和生物工程等行业中都有着重要的应用，其成果不仅能为工业企业带来丰厚的利润，也能为人们带来安全、舒适、健康的生活。CSNS 的建设会带动和提升众多相关产业的技术进步，对我国先进工业技术的发展起到有力的促进作用，产生良好的社会、经济效益。它在广东的建设，有利于我国科技区域布局的进一步合理化，带动建设地的科技水平的进步，促进我国科学技术与社会经济更加和谐、协调地发展。

除此之外，大科学工程对社会的影响是多方面、多层次的。CSNS 的建设是一种民族自尊、自信和自强的体现，是显示国家综合实力的一

个窗口，可以大大提升我国在基础研究和高技术研究领域的国际地位。同时，作为国家重大的科技基础设施，CSNS 建设期间和建成后，将成为我国先进加速器技术和中子散射技术人才培养的重要基地，吸引海内外人才投身祖国的科学事业，稳定高科技人才队伍，在人才培养与高技术成果孵化方面带来直接和间接的社会、经济效益。

CSNS 将成为爱国主义和科学普及教育的基地，影响和教育青少年，增强他们的民族自豪感和富民强国的信心。CSNS 也将成为国际科技合作的平台，增加世界各国对我国改革、开放和发展的理解和支持，增强我国的国际影响力。

什么是中子？

中子由查德威克于 1932 年发现，是组成物质的基本粒子之一，不带电，因此被称为中子。

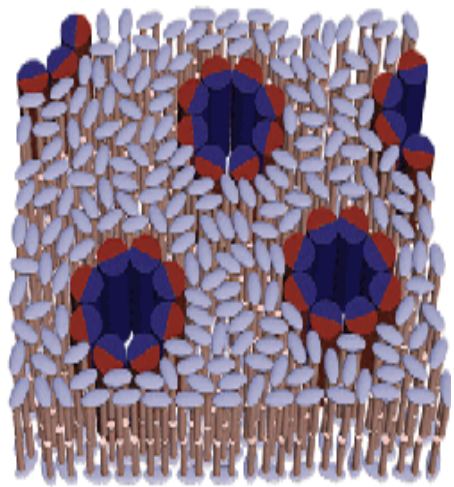


原子核由带正电的质子和不带电的中子组成

在宇宙中，中子含量非常丰富，几乎占了所有可见物质的一半。但对于物理和生物材料领域的研究来说，缺少一种足够亮度的中子源。正如我们希望能够在黑暗中有一盏明灯，照亮阅读中的书籍那样，科学家们也渴求有一种强亮度的中子源，能够“拍摄”到材料的微观结构，跟踪正在运动中的原子和分子的行为。散裂中子源应运而生，它能够产生高亮度的中子流，其中子数量将超过每秒每平方厘米 1 亿亿个。如同闪光灯那强烈的一闪，之后物体的影像就被探测器捕捉到了。中子束流打到被观测的物体上，向各个方向散射开来，就好像公园喷泉中的水喷到岩石上发生溅射一样。科学家们就根据这些中子散射的数据分析出被观测物体的微观特征。



本图为利用中子散射技术观测到的含有锌离子的两个胰岛素分子结构。为便于中子衍射研究，需将胰岛素分子晶体化。在其晶体化过程中，胰岛素分子吸附锌离子（图中的白色小球）。

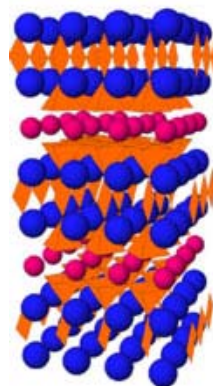


本图为在美国阿贡国家实验室强脉冲中子源上开展的利用中子散射研究某个样品的结果。该样品显示肽（圆柱体）在细胞膜中形成孔并将自身嵌入其中。

中子有哪些特性？

中子对氢原子非常敏感，能够精确测得分子结构中的氢原子位置，这对研究新的医疗制剂非常重要。由于大生物分子中含有大量的氢原子，观测大生物分子某一部分的最佳手段就是用氢原子的同位素（同位素是指那些含有相同质子数不同中子数的原子）来替代该分子中的氢原子。

喷气式战斗机的机翼中如果有很微小的裂缝或腐蚀，那么残存在其中的湿气（也就是水汽）中的氢原子也会对中子进行散射，从而帮助检修人



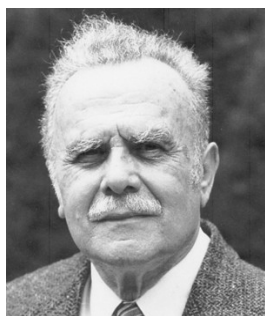
左图为钇钡铜氧化物的原子模型。钇钡铜氧化物是一种超导陶瓷材料，它的氧原子位置可由中子散射技术测定。

员迅速得知机翼的哪一部分需要及早更换或者维修。不止氢原子，中子还能定位“掺杂”在重原子中的其他轻原子。中子的这种特性帮助科学家们精确测量在高温超导材料钇钡铜氧化物（YBCO）分子中的轻氧原子的位置，为研制新一代的高温超导陶瓷材料提供了强有力的手段。钇钡铜氧化物（YBCO）有可能大幅度提高能量转换的效率，大大改善现有电动机、发电机、传输线、变压器、磁芯设备等的性能。这些高性能的电力设备被广泛地应用在加速器、医学诊断设备、磁悬浮高速列车等领域。

中子散射是科学研究的利器

中子散射能够提供固体中原子的位置、运动及磁特性的信息。利用中子探测器，科学家们可以对散射的中子进行计数，测量它们的能量和散射的角度，并确定它们的最终位置。通过这种方法，科学家们可以了解从液态晶体到超导陶瓷，从蛋白质到塑料，从金属到胶粒再到金属玻璃磁铁材料详细的微观特性。

伯特伦·布罗克豪斯和克利福德·沙尔因中子散射技术领域的杰出成就，共同分享了 1994 年度的诺贝尔物理学奖。



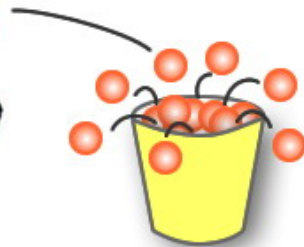
伯特伦·布罗克豪斯



克利福德·沙尔

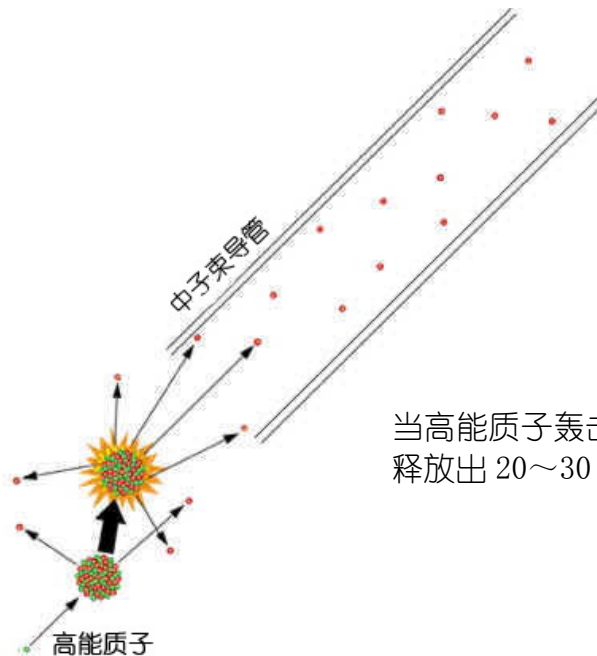
散裂：是什么与为什么

什么是散裂？



当一个高能质子，打到重原子核上时，一些中子被轰击出来，这个过程被称为散裂反应。被轰击的原子核温度升高，更多的中子就会“沸腾”起来并脱离原子核

的束缚。如果将一个垒球用力投到装满球的筐中，有一些球会立刻蹦出来，而更多的球则会弹跳并翻出筐外，散裂反应与这个过程很相似。每个与原子核相作用的质子能够轰击出 20 到 30 个中子。



当高能质子轰击重原子核时，释放出 20~30 个中子。

中国散裂中子源的设计建造者和用户群

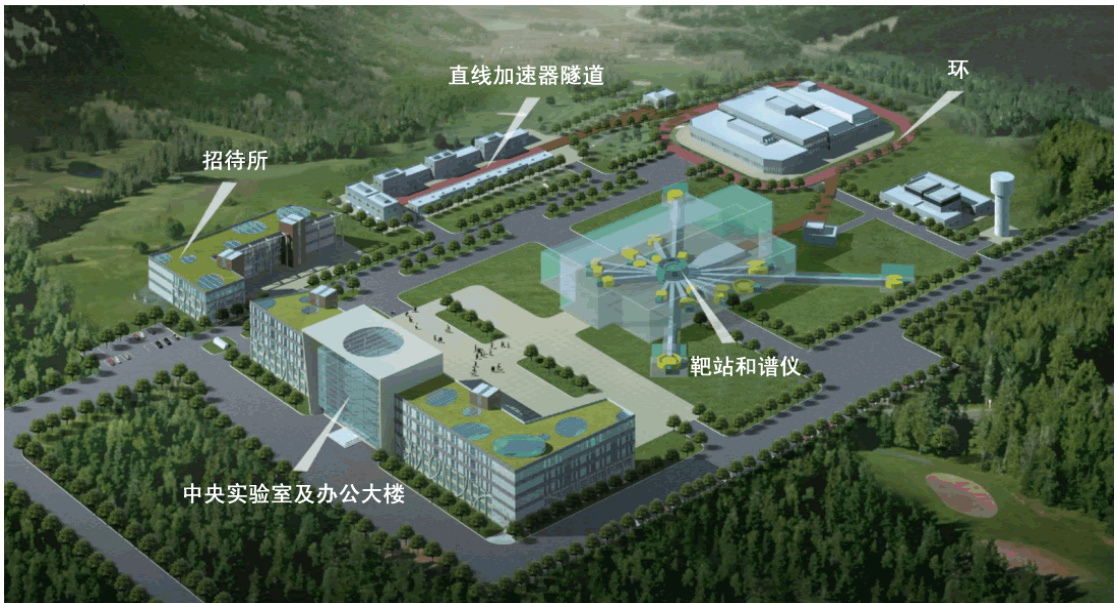
中国散裂中子源的概念设计和预制研究历时 5 年，由中国科学院主持，高能物理研究所和物理研究所的近百名专家参加了此项工作，并得到了中国科学院和国家的专项经费支持。中国散裂中子源装置将建在广东省东莞市松山湖科技产业园区，由中国科学院负责承建。

根据国内用户调查，目前已确定的首批用户包括中国科学院下属的 9 个研究所的 70 多个研究组以及科学院外 22 所大学和中国原子能科学研究院、中国工程物理研究院等研究机构的 30 多个研究组。除上述基础科学研究和应用基础科学研究方面外，中子散射在工程和工业方面的应用需求也非常大。我国在凝聚态物理、化学、材料、生物科学、聚合物和软物质、地球科学、机械加工工业、核物理、质子成像和医学应用等领域内拥有较强大的研究队伍和较好的研究基础，他们将是 CSNS 的潜在用户。



CSNS 系统组成

中国散裂中子源装置建设包括强流质子直线加速器、快循环同步加速器、靶站、中子谱仪等设施 and 科学实验测试系统，以及相应的辅助设施和土建工程等。



对环境的影响

中国散裂中子源是一台利用高能强流质子束流打靶产生中子的装置,运行时会产生 X 射线、 γ 射线和中子等。它们都具有放射性,主要为瞬时辐射。其实,辐射并不可怕,人类生活在地球上,每时每刻都受到天然存在的宇宙射线和各种电离辐射源的照射,如天然气和地热的利用以及燃煤电站排出物对居民的照射,乘飞机增加的宇宙射线的照射,放射诊断和放射治疗时受到的辐射,含有放射性或产生电离辐射的电子产品的照射等等。

装置通常安置在地下隧道内,周围用很厚钢筋混凝土墙屏蔽。装置产生的辐射,通过屏蔽体后大幅减弱,对人体产生的剂量远远低于宇宙射线产生的照射,大约只相当于宇宙射线对人体产生的剂量的 1/10。并且只要加速器一停机,这种瞬发辐射随即消失,不再对环境造成影响。

瞬发辐射对工作人员的影响也是微乎其微,一般情况下,工作人员

工作 5 年所接受的剂量与进行一次 X 射线胸部透视所接受的剂量相当。

中国散裂中子源工程建设中，将按照国家的标准与规范，采取严格的辐射防护措施，使它对环境的影响完全控制在可接受的范围内。装置不会发生影响环境的放射性事故。

应用前景

化 学

你体验过口味香甜口感爽滑的低脂冰淇淋吗？你见过能够黏附在工作于真空环境中的机械轴承上的磁性润滑剂吗（在太空中也可以的哦）？无论工业界提出怎样的古怪要求，基础科学研究都一定会朝着这个方向努力，直至为我们今天的生活奉献上各种“奇妙”的产品。中子散射技术能够为我们提供独特的信息，展示化学产品中千变万化的微观结构，尤其是诸如奶油、感光乳剂之类的油水混合物。



中子散射是了解油脂和乳剂（包括冰激凌）基本化学结构的关键。

科学家们试图利用中子来研究骨骼在发育过程中是怎样钙化的，骨质疏松时骨骼又发生了怎样的变化，以及医生建议的治疗计划是否可行。另外，中子散射技术还可以帮助人们了解某种牙膏新品中的化学添加剂是否真的有助于洁齿。

有了结构信息的帮助，研究者们开发出许多链接了无数原子的巨型分子，例如药品、塑料、用作衣料的合成纤维、化妆品、油漆、新型

建材、汽车或飞机用材、高效洗发剂或洗涤剂、优质润滑剂，以及更健康绿色的食品等。

磁学和超导

中子散射能够获得与已知磁性材料原子行为相关的多数信息。中子具有磁矩，可以揭示其他任何方法所无法获取的材料磁性特征的详细情况。这些信息对于开发高密度记录介质，如录音带、录像带、CD 和计算机盘至关重要。

研究人员曾致力于开发出体积小、重量轻而磁力更强的永久磁铁。中子散射实验有助于确定高性能磁性材料的原子结构。这些为工业界选择磁铁的最佳材料和加工工艺指引了方向。由于开展了这样的研究，我们得以利用永久磁铁制造

出很小的马达，在汽车内自动调节座椅，打开窗户。紧凑型重量轻的磁铁还可提高车辆燃料的燃烧效率。

先进的散裂中子源能提供足够多的中子，在材料向超导状态过渡时，帮助科学家们控制磁性所起的作用，从而有助于了解高温超导体如何工作，如何能在相对高温时保持其超导性。懂得了这一点，就能生产出导电性更好的超导材料，并有可能改善高功率传输线和高磁场磁铁的性能。这些基本信息可应用于设计高速的电子学设备。



未来的超导磁铁悬浮列车会比法国的 TGV 更快。

结晶材料

从炊具到计算机芯片再到处方药，我们日常生活中的很多材料都是由具有特殊特性的晶体构成的。而材料的特性则多由原子的排列方法

决定。对结晶材料来说，原子在单个晶体中如何排列和晶体本身如何排列这两者都很重要。许多现代合成材料都刻意地改变了原子或晶体的排列。

中子散射测量将使我们对重要材料基本特性的了解更加深入，例如催化剂、离子导体、超导体、合金、陶瓷、水泥、磁铁和放射性废物的形成等。另外，散裂中子源所提供的高通量中子将会大大扩展材料科学方面研究的范围。科学家们可以研究更小的样品，例如时下典型的电子学器件（比如CD播放机等）的多层薄膜结构。这种结构可用于未来的电子器件中，以改进笔记本电脑、喷墨打印机、录像机和蜂窝式电话网络的性能。由纳米粒子、纳米纤维和多层薄膜组成的新材料，也引起了人们越来越多的关注，这将是中子散射技术新的应用领域。

散裂中子源每隔几分钟（甚至几秒钟）就可以提供一个完整的中子衍射图，使得研究人员能够对发生在蓄电池中的许多过程进行时间跟踪研究。科学家们可以在分子水平追踪物质的行为，比如蓄电池或燃料电池中的快速离子导体发生了怎样的变化；对石油和化学工业中的催化剂来说，温度变化对催化剂的影响是怎样的；旋转涡轮叶片



利用散裂中子源研究薄膜的特性将有助于延长笔记本电脑电池的寿命。



散裂中子源能帮助科学家们研究用于蜂窝电话网络中超导微波器件的薄膜片这样的小样品。

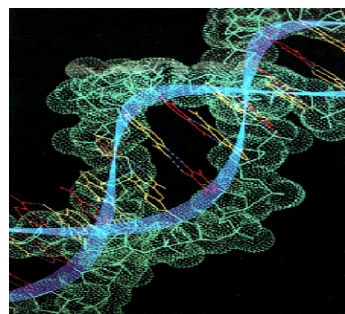
升温和变形时，其晶体结构有怎样的变化；水泥吸水时，其微粒发生了怎样的变化；以及压力升高时，置于研究地质用的多砧压具里的土层材料又有怎样的变化。

未来科技中所用的高性能材料在结构方面更为复杂，但它们能令我们事半功倍，提供更加人性化的环境，使更多的科学幻想变成现实。材料科学和结构化学属于研究的前沿，因此需要不断加强中子散射的应用。

结构生物学

了解蛋白质的工作原理是解开生命之谜的一把金钥匙。作为酶，蛋白质对活细胞的化学反应起着催化作用。作为激素，蛋白质分子能够调节机体的发育，控制器官的活动。它们能使我们抵抗病毒的感染，但如果蛋白质发生变异或者将病毒包裹起来，就会使人病情恶化，患上癌症或者艾滋病之类的重症。为什么蛋白质的作用这样独特而多变呢？这主要取决于每一种分子的复杂形状，有的是椭球形，有的像碟子一样，有的又像哑铃。

对微细蛋白质晶体来说，高亮度中子束流能够提供的信息可作为 X 射线一种补充。实验表明，这种晶体在轨道空间站上可以生长到 1 立方毫米的大小，其所包含的微分子数目足以进行中子散射的研究。同样的，结合中子与 X 射线来研究蛋白质，将引起医药行业、农业和



DNA 分子决定了蛋白质的合成，其形状和结构可由散裂中子源的中子散射获得。



利用中子散射确定主分酶的结构有助于开发更有效的治疗药物。

生物技术领域的极大兴趣。

散裂中子源有助于研究酶的活性。将某块培养基掺入氘原子，利用中子散射技术，散裂中子源能够告诉科学家酶活性区域的位置，以及某种潜在药物黏附到该区域以阻止酶不良活动的可能性。

聚合物

上世纪 40 年代开始，工业界的化学家们开始合成一种叫做聚合物的巨分子，发明出来一种强度高重量轻的材料——塑料。在过去的 60 多年中，他们取得了一系列的成功：在汽车和飞机上（比如波音 757 喷气式飞机）应用的更加强韧、更加轻便的材料；警察身上的防弹背心；纺织用的合成纤维；民航机上常见的带有预开口花生米袋等等。美国每年消耗的聚合物超过 700 亿磅（每磅约合 0.45 公斤），因此这些材料的研发引起了科学研究和工业领域的强烈兴趣。

当化学工业生产含氟聚合物，用于制造不沾锅以及地毯防污剂时，环境污染作为副产品也困扰了我们。美国的北卡罗来那大学的科学家们正在考虑如何才能更加洁净地生产塑料，以研究出一个不使用破坏臭氧的氯氟化碳、减少污水排放和有毒废物生成的绿色工艺过程。在这个绿色工艺中，将采用超临界二氧化碳（CO₂）。超临界二氧化碳已被用作非毒性溶剂（例如去掉咖啡豆中的咖啡因），并作为可随时回收的“废气”。该过程中不会有纯二氧化碳



中子散射将帮助科学家们确定最佳的聚合物混合以便生产出优质的塑料产品。

释放到大气中，加重温室效应。但是，由于许多聚合物不溶于二氧化碳，所以美国橡树岭国家实验室和北卡罗来纳大学利用中子小角度散射来分析那些能够溶于 CO_2 的聚合物的特点，并开发出能够使不溶于二氧化碳的物质悬浮在溶液中的乳化剂（去污剂），就像肥皂能够帮助油溶解在水中那样。散裂中子源所提供的详细信息，已经使科学家们了解到如何调节溶解的压力，使不可溶的聚合物变为可溶，或者在加工过程中，使它们于合适的时机从溶液中脱离开来，在新型聚合、萃取及清洁应用中达到控制溶解度的目的。



大多波音 757 飞机是由轻质量的塑料制造的。中子研究有助于制造出更安全、更快、更节能的飞机。

利用散裂中子源，科学家们可以收集有关通讯光纤、用于小型化马达和发电机的金属玻璃（铁-硼）磁铁和可能用于蓄电池和燃料电池的离子导电玻璃方面更为详细的信息。散裂中子源将用来研究受污染的土壤和其他固化在玻璃里的核废料的长期稳定性。钴钛合金由于其生物学惰性，耐磨性和抗腐蚀性被用于医学植入，强中子束流有助于研究其整体性质及表面处理情况。另外在竞相开发新材料的电子工业中，中子散射还是研究非晶半导体结构和分子水平动力学（例如硅原子的结合）的重要工具，而且需要如散裂中子源那样更强的中子束流。

复杂流体

洗发液、油漆、润滑剂和其他常用的复杂流体以及软物质具有显著的特征。当你早晨沐浴时，洗发液必须粘稠到足以停留在手里，但又要稀释到易于从瓶中流出，并散布在头发上。油漆必须粘稠到足以沾在

刷子上，但又稀释到在墙上能平滑地散开。这些特性主要是复杂流体受剪切力变薄——在某个方向施力使其厚度变薄（像两手一起搓使肥皂液散开那样）。利用中子可以看到复杂的分子流体在受剪切力变薄时的具体情况。材料厚时，分子缠结在一起，但是加上一个方向的力以后（例如用油漆刷子），分子就发生有序流动，使得材料变薄。



洗发液必须粘稠到足以停留在手里，但又要稀释到易于散布在头发里。利用中子可以看到复杂的分子流体在加上一个方向的力以后（例如在头发里揉开洗发液）是如何变化的。

复杂流体（如血液）以及软物质（如易渗透的细胞壁和其他的膜）对生命的变化过程是非常重要的。这些物质由氢和其他轻的原子组成，因此散裂中子源可用于这些物质小样品的研究。利用高流强中子脉冲在分子水平上了解这些物质可加速开发出针对身体特定部位逐渐溶解的给药载体系统。利用散裂中子源的高亮度中子束能够加速人造血液的开发。

散裂中子源提供的信息还有助于开发微乳胶（由一种液体扩散到另一种液体中的小液滴）；有助于生产用于食品加工和化妆品的胶囊；有助于控制微观流体的流动以提高润滑剂的性能；有助于合成添加剂，促进或阻止混合，以控制某些加工工艺；有助于利用微量的自组装分子迅速改变混合物的粘度。散裂中子源还可帮助研究人员了解弹性材料的结构（例如橡皮筋）与弹性的关系。

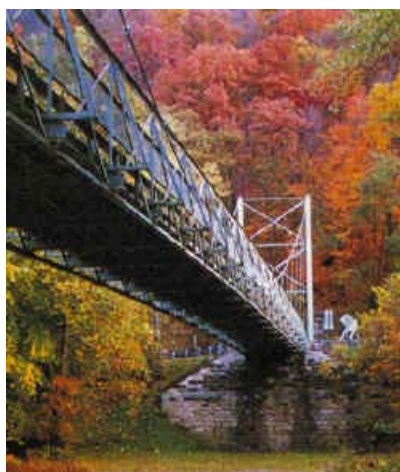
污染的土壤可用溶液冲洗，但冲洗掉了污染物的同时也破坏了土壤的肥力。改进的分离技术可利用分子薄膜在土壤冲洗过程中仅去除污染物，保留土壤肥力。散裂中子源指导我们如何制造薄膜，收集废物中有价值的化学制品，以备循环使用。

环氧树脂，其他类型的胶或涂层的粘性依赖于与结构相关的各种行为。散裂中子源有助于揭示不同分子结构对材料复杂行为的贡献，使我们深入了解如何生产出最有效的胶和涂料。

散裂中子源可用来观察复杂流体在被迫流动或受压时（例如润滑剂被反复加温和压挤到轴承上）的结构变化，使科学家们更好地了解流体结构与传输特性的关系。

工 程

随着科技的进步，中子散射在保护公众安全和环境方面也默默地发挥着重要作用。中子散射引发的技术改进，有助于预防机翼断裂、管道严重腐蚀等。通过测量原子面伸长或收缩的距离，中子可以探测到大块材料的剩余应力。这些应力是在部件的加工过程中形成的，可使部件破裂、磨损、加速化学腐蚀，甚至在使用中受外力而损坏。如果工程师们想知道某个部件何时可能发生损坏，以及能否使用不同的材料和



美国宾西法尼亚州的 Corbin 大桥是第一座桥面换为铝面的大桥（1996 年）。

加工工艺生产出一种寿命更长的部件，将中子散射结果与计算机模拟相结合，就能找到这些问题的答案。

制铝业致力于建造出像钢桥面一样坚固而抗腐蚀的铝桥面。由于铝桥面比钢桥面轻便，所以可以构建低价的支撑结构，同时铝桥面的模块结构还利于更换部分桥面。科学家们已找到用中子研究铝桥面铝焊接中剩余应力的方法。

散裂中子源将使工程师们能够测量材料中更为精细的结构细节，无论是小尺寸的样品，还是大型工程机械。它能有效地测量复合材料的剩余应力，这些材料比其他材料都结实轻便，被广泛地应用于制造切削工具、飞机结构和发动机部件。举例来说，铝和硅氮化物组合在一起，由于加工过程中它们有不同的膨胀和收缩，所以形成了剩余微应力。中子用不同方法对样品微应力的描绘将有助于选择复合材料的最佳加工工艺。

在涡轮喷气发动机的建造中，中子散射有助于了解涡轮叶片的金属合金在极端应力下的微观变化，工程的成功往往取决于中子对于微观结构的洞察力。



中子散射可用于研究如何更好地生产和焊接输油管道，以降低剩余应力，防止输油管道破裂和漏油。

感谢 <http://www.sns.gov> 及 <http://www.nanopolis.net> 提供部分图片及相关资料

中科院高能物理研究所

二〇〇七年四月