

核科技知识丛书

中子散射技术

孙 凯 韩松柏 陈东风 等 编著



中国原子能出版社
China Atomic Energy Press

| 核 | 科 | 技 | 知 | 识 | 丛 | 书 |

中子散射技术

孙 凯 韩松柏 陈东风 等 编著

中国原子能出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

中子散射技术 / 孙凯, 韩松柏, 陈东风等编著. —北京: 中国原子能出版社, 2017.4
ISBN 978-7-5022-8013-0

I. ①中… II. ①孙… ②韩… ③陈… III. ①中子衍射 IV. ①O571.56
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 084652 号

中子散射技术

出版发行 中国原子能出版社 (北京市海淀区阜成路43号 100048)

特约编辑 金 铮 李梹雄 范淳钰

责任编辑 张 琳

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 880 mm × 1230 mm 1/32

印 张 1.75 字 数 32千字

版 次 2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-8013-0 定 价 23.00元

网址: <http://www.china-nea.cn/>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

序 言

核科学技术的出现、发展和应用是人类科技史上取得的重大成就，为我们打开了微观世界的大门。20世纪40年代以来，核科学技术理论体系逐步完善，核科技工业也随之发展起来，人类进入了开发和利用核能的新时代，核能在军事、能源、社会生活等许多领域产生了革命性的影响，生动地体现了科学技术作为第一生产力的重要作用。随着核科学技术的发展，公众对核科学技术也产生了浓厚的兴趣，但历史上美国、前苏联和日本三次核事故的发生再次给核科学技术蒙上了神秘的面纱，公众的“恐核心理”和核邻避效应由此而产生，不可避免地给核能和核技术的推广应用带来阻碍。



习近平总书记在2015年中国核工业创建六十周年之际指出，核工业是高科技战略产业，是国家安全的重要基石，要坚持安全发展、创新发展，坚持和平利用核能，全面提升核工业的核心竞争力，续写我国核工业新的辉煌篇章。为了更好地贯彻总书记的指示精神，做好民族自强的核脊梁，核工业人要自觉地张开核科技创新、核科学普及的“双翼”。一方面要进一步提高核安全保障和自主创新能力，勇于担当，积极推动核工业由大变强；另一方面要进一步加强核科普工作，提升核科学技术知识的普及率，让更多人科学而理性地认识、了解和接受核科学技术，从而为核工业的发展营造良好的社会氛围。

为此，中国核工业科技馆组织编写了核科普系列丛书，邀请相关领域的专家通过较为通俗易懂的语言介绍核科学技术的相关知识，希望希望引导公众科学、客观的了解核及其应用领域，尽力减少由于“不理解”而引发的误解。在此，对参与本套丛书编写的单位和专家表示衷心的感谢！

目 录

第一章 如何了解我们的世界.....	01
1.1 工具——了解世界的好帮手	02
1.2 微观探针——探寻物质内部的世界	03
第二章 中子：洞察微观世界之眼	07
2.1 查德威克与中子的发现	08
2.2 散射技术的起源	10
2.3 中子散射有什么用	13
2.4 中子从何而来	15
第三章 中子散射在生物领域的应用	22
3.1 DNA里面有什么？	22
3.2 开发新材料	24

第四章 中子散射在工业领域的应用	26
4.1 应力分析——保障安全	26
4.2 晶体织构——完善产品质量	29
第五章 中子散射/照相在能源领域的应用	32
5.1 高效电池研发	32
5.2 清洁能源利用	34
第六章 中子散射/照相在国防领域的应用	37
6.1 航空航天中的无损探伤	37
6.2 核燃料和火药检测	38
第七章 中子在基础科学研究中的应用	40
高温超导机理的认知	40
第八章 结语	44
参考文献	46
后记	48

第一章 如何了解我们的世界

阳光普照，大千世界的色彩赏心悦目；
泉水叮咚，美妙自然的回响娱心悦耳；
微风习习，芬芳四溢的鲜花清香扑鼻；

.....

我们生活在一个五光十色、丰富多彩的世界里，通过视觉（眼睛）、听觉（耳朵）和嗅觉（鼻子）等来感知周围的事物，但我们所能感知到的其实远不是全部的世界。拿我们的眼睛来说，人眼仅仅能够感知波长在390到750纳米之间的光线——“可见光”，也就是彩虹的“赤橙黄绿青蓝紫”，观察的距离范围从最大的几十公里到最小尺寸0.1毫米左右。对于浩瀚的宇宙和微小的原子，人类的眼睛只能望洋兴叹。再比如说我们对时间的感知最大不过我们区区百年的寿命，而最小也不过0.1秒左右，相比于我们已知的宇宙140亿年的年龄和原子能级跃迁的飞秒（ 10^{-15} 秒），同样是非常有限的。

1.1 工具——了解世界的好帮手

虽然人类感知的能力如此局限，但其伟大之处在于可以利用智慧创造工具来拓展我们的能力。利用哈勃空间望远镜，可以看到宇宙巨大星系绚丽斑斓的色彩和引人遐想的形状；利用天文望远镜，可以看到太阳黑子和木星美丽的光环；利用光学显微镜，可以跟踪细胞甚至细菌的形态和生命活动；利用电子显微镜，可以观测到更小的病毒、蛋白质分子甚至单个原子的图像；而利用高能的加速器，科学家甚至可以观察到原子结合成分子以及原子核破碎等过程。

在对时间的测量上，借助工具和技术同样可以让我们超越自身的局限。根据光的传播速度是有限的这一原理，利用哈勃太空望远镜，我们目前能看到的最远的宇宙边际是140亿年前的景象；利用地层中的同位素含量，可以推断几亿年前的地球上发生的故事；根据原子跃迁知识制成的原子钟，精确度可以达到几十亿年误差不大于1秒，保证GPS和北斗导航系统的准确定位。

为了了解外面的世界，必须扩展我们的能力；为了扩展我们的能力，必须借助工具；而要发展工具，则必须基于对相关科学道理的正确理解。为了研究这个世界不同的特性，我们需要不同的工具，或者叫做探针。通过它们，我们可以从尺寸、速度、能量、时间、内部结构等各方面去了解这个世界。我们可以了解宇宙的历史和演化，知道星星有多远，有多大，甚至可以预测它们未来的命运；可以了解所生存生

活的星球和环境，更好地认识自己的家园，为我们对资源能源的利用和环境的保护提供帮助；也能够了解生命体内物质的结构和性质，理解生命的过程，看到大自然的神奇和优美。

1.2 微观探针——探寻物质内部的世界

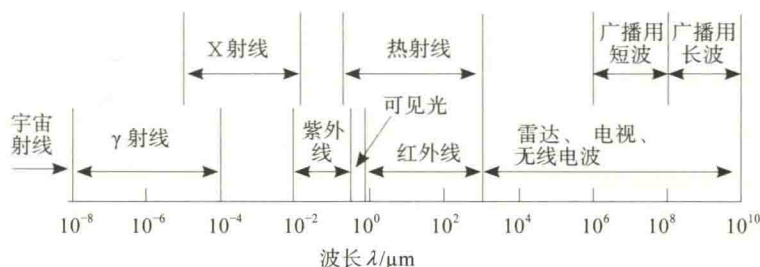


图1 不同光（射线）的波长对比

利用微观探针研究物质的结构和特性不仅可以满足我们的的好奇心和求知欲，更可以极大地改善我们的生活。从发展新的药物到更好地利用能源，从制造更轻巧坚固的材料到设计更优秀的芯片和存贮器，都离不开对物质本身的探索。在这些探针中，光是我们最常用、最普遍的一种，除了五颜六色的可见光之外，也包括能用于体检的X射线甚至能量更高的 γ 射线，还有看不见的紫外线红外线，以及能够穿透建筑物进行通信和雷达探测的无线电波。这些光是根据它们的波长分类的，波长是指光（电磁场）在空间中波动着向前传播一个周期所经过的距离，它就是分辨不同光的“指纹”。目

前，我们可以产生和精确控制大多数波长或者能量的光，用以研究物质世界和生活中跟我们息息相关的物体或者事件。除了光，还有几种粒子经常用作在原子和分子尺度上探测微观世界的重要探针，包括电子、中子等。

那么，这些探针是怎样测量物质结构的呢？这要从粒子的波动性说起。在原子那样尺度的世界里，所有的粒子都可以称为波，因为他们同样具有像水波一样的特性。当我们站在海岸边看海浪的时候，我们看到海浪一波一波的撞到岸边，反弹回去，跟后面新来的波浪叠加起来，使得有的位置水位特别高，而有的地方很低，这就是入射水波和反射水波之间的“干涉”。通过分析水位的高低或者叫做“干涉图样”，我们可以知道海岸的形状和是否陡峭等信息，这个过程跟我们利用微观探针探测物质结构的过程是非常相似的。

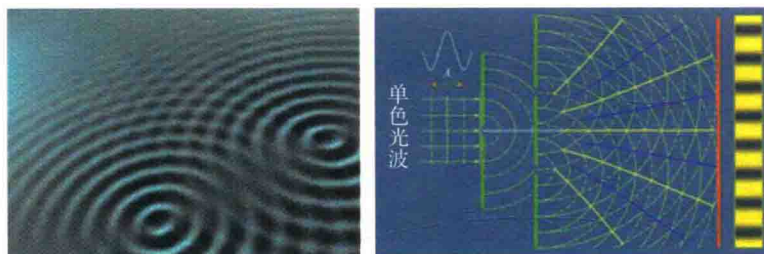


图2 水波及光的干涉条纹

物质中包含了大量的原子，就像一段海岸的不同部分，而我们人为照射到物质上的光就像海浪，撞击到这些原子上，像被反弹的海浪一样反弹散开，离开物质后在不同位置重新叠加起来，便构成了一个与叠加的海浪类似的“干涉图

样”。通过详细研究这些干涉图样，我们就可以获知原子的分布，也就是物质的结构了。

那么我们又为什么需要这么多种探针呢？相比于光，电子和中子既难以获得，又难以操纵和控制，为什么还要使用它们呢？这是由于不同粒子本身具有不同属性，与物质相互作用所获得的信息也不相同，能满足我们的不同需要。光具有非常好的特性，很容易调整和控制，因此我们在选择探针的时候最先考虑的就是光。但任何事物都有两面性，光也有一些不足的地方。例如，光很容易被散射，这虽然使它探测很少的物质就能给出好的信号，却也导致它很难穿透较厚的物质而获取其内部的信息。此外，光对物质的磁性不敏感，对于含电子比较少的元素也不敏感，例如对生命体特别重要的H、C、N、O等元素，光子经常视而不见。电子和中子则不同。带电的电子几乎是所有粒子中最容易被精确控制的，通过它可以研究很小范围内的材料的形貌、成分和结构，电子显微技术已经成为最常用的物质表征技术之一，但电子束也有能量太高和在物质中射程很短的问题。中子由于不带电，因此散射能力较弱，但却因此能够穿透较厚的物质得到内部信息，并且可以感知物质的磁性分布，因此可以说是磁性材料研究最重要的手段之一。同时，中子对元素的轻重没有明显的选择性，加上没有能量损伤，因此非常适合用来进行生命相关的研究，如蛋白质、生物薄膜以及药物的研究。所以说，这些探针有各自优缺点，我们应该根据具体问题的需要来选择探针。

通过上面的文字，相信大家已经了解了探针的作用，下面就让我们开启探索物质结构和特性的快乐旅程吧！

第二章 中子：洞察微观世界之眼

在浩瀚的宇宙中，有一种奇特的星体，它的密度仅次于神秘的黑洞，是水的一百亿倍，如果把地球压缩成类似的星体，地球的直径将只有22米。这种星体的形成与恒星有关，当质量是太阳8倍以上的恒星寿终正寝时，由于无法阻止引力的影响而发生塌陷，电子和质子被挤压形成不带电粒子——中子，中子和中子的距离是如此接近，以至于星体的密度接近原子核的密度。换句话说，这个奇特的星体就像是一个硕大的原子核，当然人们给它一个更恰如其分的名字——中子星。

中子的发现是打开核能利用之门的钥匙，1938年，德国科学家莉泽·迈特纳（Lise Meitner）和奥托·哈恩（Otto Hahn）用中子轰击铀-235，结果作为炮弹的中子自己壮烈牺牲，但铀-235也四分五裂（裂变成两个或多个质量较小的原子核）。铀-235的一部分质量转化成能量，同时大约2~4个新生中子从裂变的铀-235里跑了出来，继续撞向其他

的铀-235，这就是我们所说的链式反应，可以说，中子就是引发和维持核燃料以及原子弹裂变反应的星星之火。

那么，中子是怎么发现的呢？这就要从英国科学家查德威克说起了。

2.1 查德威克与中子的发现

查德威克(James Chadwick)1891年10月出生于英国柴郡，他中学时并不是大家想象的那种聪颖的“牛娃”或“学霸”，反而默默无闻、成绩平平。但他在学习上认真严谨，做作业从不应付了事，一定要全部吃透才会下笔完成。正是借助这种踏实求知的作风和锲而不舍的精神，他第一个发现了中子，荣获诺贝尔物理学奖，作为现代物理学的先驱者而名垂青史。

1911年，年仅20岁的查德威克以优异成绩毕业于曼彻斯特大学物理学院，之后跟随著名科学家卢瑟福从事放射性研究并获得硕士学位。1919年，卢瑟福通过用 α 粒子轰击氮原子放出氢核，发现了质子，在1920年的一次演讲中，他又预言了“中子”的存在。

1930年，德国物理学家博特和贝克尔发现金属铍在 α 粒子轰击下，产生一种穿透性很强的射线，他们推断这是一种高能量的硬 γ 射线。1932年，约里奥-居里夫妇^①重复了这一实验，令他们惊奇的是，这种未知射线的能

^① 著名的居里夫人的女儿和女婿。居里夫人一家堪称诺贝尔奖“专业户”。她于1903年与丈夫皮埃尔·居里共同获得物理学奖，1911年获得化学奖，他们的女儿伊雷娜·约里奥-居里和女婿弗雷德里克·约里奥1935年同获化学奖。

量大大超过了天然放射性物质发射的 γ 射线的能量，而且用这种射线去轰击石蜡，竟能从石蜡中打出质子来。约里奥-居里夫妇把这种现象解释为一种康普顿效应^②。但是打出的质子能量高达5.7 MeV，按照康普顿公式，入射的 γ 射线能量至少应为50 MeV，这在理论上是解释不通的。

查德威克注意到了这一情况，很快重复了上面的实验。他用 α 粒子轰击铍，再用铍产生的射线轰击氢、氮，结果打出了氢核和氮核。由此，他断定这种射线不可能是 γ 射线，因为 γ 射线不具备将从原子中打出质子所需要的动量，只有假定从铍中放出的射线是一种质量跟质子差不多的中性粒子才能解释。

查德威克用仪器测量了被打出的氢核和氮核的速度，并由此推算出这种“神秘粒子”的质量。他还用别的物质进行验证实验，得出的结果都是这种未知粒子的质量与氢核的质量差不多，由此证明了中子的存在。虽然中子首先敲响了博特、贝克尔以及约里奥-居里夫妇的房门，但他（她）们没有作出正确的解释，与中子失之交臂，错失了发现中子的机会。而查德威克面对未知世界，保持一颗去伪存真之心，没有随波逐流、盲目跟从，而是大胆推测、细心求证，重复约里奥-居里夫妇的实验后不到一个月就发现了中子，并因此在1935年荣获诺贝尔物理学奖。

中子的发现及其应用是20世纪最重要的科技成就之一。

② 1922—1923年康普顿研究了X射线被石墨、石蜡等较轻物质散射后光的成分，发现散射谱线中除了有波长与原波长相同的成分外，还有波长较长的成分，这种散射现象称为康普顿效应或康普顿散射。

中子诱发核裂变的发现导致了核武器的研制和核能源的开发，利用中子生产的人工放射性同位素、中子活化分析、中子掺杂生产半导体器件、中子辐照加工等已被广泛应用于医疗和工业，并产生了巨大的经济效益。此外，中子也是研究物质结构和动力学性质的理想探针，作为与X射线相辅相成的表征手段，中子散射技术已被广泛应用在材料和物质的微观结构和动态研究之中。

2.2 散射技术的起源

1994年，两位白发苍苍的老人，美国科学家沙尔（Clifford G. Shull）和加拿大科学家布罗克豪斯（Bertram N. Brockhouse）在瑞典因开创了中子散射实验技术荣获诺贝尔物理学奖。诺贝尔主委会这样评价他们的工作：“他们卓越的工作帮助我们回答了材料中原子在哪里和它们在做什么。”

散射一词听起来十分高深，但其实它在我们生活中无处不在。最常见的例子就是天空，天空本身其实是无色的，我们常说的蔚蓝的天空就是太阳光散射的结果。当太阳光进入大气时，波长较长的色光（如红光）透射力大，能透过大气射向地面，而波长短的紫、蓝、青色光碰到大气分子、冰晶、水滴等时，就很容易发生散射现象。被散射了的紫、蓝、青色光布满天空，就使天空呈现出一片蔚蓝了。在夜晚打开手电筒，我们会看到一束光束射出，物理中把它称作光