

# 中子三轴谱仪的原理、技术与应用

李世亮<sup>1,†</sup> 戴鹏程<sup>1,2,3,††</sup>

(1 中国科学院物理研究所 超导国家重点实验室 北京 100190)

(2 田纳西大学物理与天文系 美国 田纳西 37996-1200)

(3 橡树岭国家实验室中子散射中心 美国 田纳西 37831-6393)

**摘要** 中子作为一种具有独特性质的亚原子粒子,在很多研究领域都具有重要且无法替代的优势.中子三轴谱仪通过能量守恒和动量守恒原理就可以测量某一系统的弹性或非弹性散射性质,从而获得该系统的结构或动力学信息.中子三轴谱仪得名于其3个核心部分:单色器、样品和分析器,每一部分都可以独立转动.由于三轴谱仪在物理学尤其是凝聚态物理学研究中所发挥的重要作用,中国科学院物理研究所将联合中国原子能科学研究院,在后者新建成的中国先进研究堆搭建一台现代化的热中子三轴谱仪.文章结合该谱仪,介绍了中子三轴谱仪的基本原理、技术以及应用范围.

**关键词** 中子散射,三轴谱仪

## The principle, technology and applications of the neutron triple-axis spectrometer

LI Shi-Liang<sup>1,†</sup> DAI Peng-Cheng<sup>1,2,3,††</sup>

(National Lab for Superconductivity, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Department of Physics and Astronomy, The University of Tennessee, Tennessee 37996-1200, USA)

(Neutron Scattering Science Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831-6393, USA)

**Abstract** As a subatomic particle, the neutron has unique properties which allow it to play an important and irreplaceable role in many research fields. Based on the principle of momentum and energy conservation, a neutron triple-axis spectrometer (TAS) can measure the elastic and inelastic scattering of a system to obtain structural and dynamical information. The TAS was given its name for its three major parts: the monochromator, sample holder, and analyzer, each of which can rotate independently. Because of the important role that the TAS plays in physics, especially in condensed matter physics, the Institute of Physics of the Chinese Academy of Sciences has decided to collaborate with the China Institute of Atomic Energy to build a modern TAS in the newly-built Chinese Research Reactor. This paper will describe the principle, technology and applications of the TAS.

**Keywords** neutron scattering, triple-axis spectrometer

## 1 引言

人们在探索物质结构时,最常见的方法就是用一束粒子打到样品上,观察该束粒子由于其波动性

质而导致的衍射图案,从而分析出该物质中周期或准周期性的结构性质.在这方面,X射线粉末散射仪

2010-10-18 收到

† 通讯联系人. Email: slli@aphy.iphy.ac.cn

†† 通讯联系人. Email: daip@ornl.gov

可能是物理和材料领域应用最广泛的、判定某种晶体结构的仪器。然而尽管 X 射线具有很多优势,但是它也仍然有很多不足之处,在很多情况下无法满足我们的要求。而中子散射在某种程度上和 X 射线形成了互补,从而能够测量一些 X 射线无法或很难测量的材料。更重要的是,在磁结构和磁激发的测量方面,中子散射具有独特且无法替代的优势,从而使得它和 X 射线一样,成为凝聚态物理研究中非常重要的探测手段之一。而中子三轴谱仪则是中子散射谱仪中极为重要的一种,其主要贡献者 Bertram Brockhouse 获得了 1994 年的诺贝尔物理学奖。

本文首先结合中子的基本性质介绍中子散射的优势与劣势。第三部分介绍中子三轴谱仪的基本概念以及一些关键部件。在第四部分介绍中国科学院物理研究所与中国原子能科学研究院将要合作搭建的热中子三轴谱仪。在第五部分,我们将给出几个三轴谱仪应用的例子。最后,我们将给出一个简单的结论。

## 2 中子的基本性质与中子散射

中子是由 James Chadwick 于 1932 年首先提出相应的概念并在实验上验证的<sup>[1]</sup>。他也因为这一发现而独自获得了 1935 年诺贝尔物理学奖。自由中子的质量比质子略大,约为  $1.675 \times 10^{-27}$  kg。中子有两个重要的特性让它在散射研究上具有独特的地位。首先,中子不携带电荷,这意味着它不参与长程的库仑相互作用,从而可以很容易地穿透样品,测量到样品的体性质。同时,这也使得在中子散射中可以比较容易地利用高磁场、高压、极低温与高温等样品环境。当然,这反过来也是中子散射的一个“缺点”,因为往往需要很大的样品(通常为克的量级)才能够获得足够的信号强度。中子由于无需克服电子云的斥力,所以它将直接和原子核相互作用。这种相互作用非常短程(约  $10^{-15}$  m),可以认为是点碰撞,从而可以将散射处理为仅包含 s 波的过程,极大地简化了理论计算。需要指出的是,中子和原子核的相互作用并不像 X 射线或电子散射那样随着原子序数增加而迅速增加。它对很多轻元素(例如氢、锂、氧等)也有很强的散射,这一点对于生物材料和许多能源材料尤为重要。其次,尽管中子没有静电荷,但是其内部的夸克和胶子结构导致了一个大小为  $1.913\mu_N$  的磁矩。该磁矩和固体中的未成对电子自旋相互作用,其强度和其与原子核的相互作用相当。其 1/2 的自旋角动量也使得它可以被极化为

只含有单一自旋态的中子束,从而把磁散射从原子核散射与非相干散射中分离开。这使得中子散射在研究固体中磁性质方面成为最重要的研究手段,可以和拉曼散射、 $\mu$  子自旋共振( $\mu$ sR)以及核磁共振形成互补。而中子非弹性散射在研究完整的磁激发谱方面,则是其他任何手段都无法替代的。基于中子散射的这些特点,它在研究化学、物理、材料以及生命科学等多门学科中都起着十分重要的作用。

目前应用于中子散射的中子通常由两种方式产生:一种是反应堆模式,通过<sup>235</sup>U 裂变来产生中子;另一种则是散裂源模式,通过加速器加速获得的高能质子轰击重原子核来产生中子。这两种中子源的能量范围和中子谱仪的工作方式不尽相同。反应堆中子源产生的中子在时间上是连续的,因此在应用中通常利用晶体的布拉格定律来获得某一能量的中子。而散裂源产生的中子是脉冲式的,所以可以通过测量中子飞行的时间来获知中子的能量。中国原子能科学研究院原有的 15MW 重水反应堆已经退役,其在北京新建成的 60MW 的中国先进研究堆则刚刚临界(即开始产生中子)。我们将要介绍的由中国科学院物理研究所负责搭建的热中子三轴谱仪就将依托该反应堆。在散裂源方面,中国将在广东省东莞市建造国内第一台散裂中子源。

中子散射和其他散射手段一样,遵循着基本的能量守恒与动量守恒公式:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{k}_f - \mathbf{k}_i \quad , \quad (1)$$

$$\hbar\omega = E_i - E_f \quad , \quad (2)$$

其中中子的波矢  $\mathbf{k}$  的大小为  $2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为中子的波长。中子的能量  $E = \hbar^2 \mathbf{k}^2 / 2m_n$ ,  $m_n$  为中子的质量。下标  $i$  和  $f$  分别代表着入射和出射(最终)中子。中子传递给样品的动量和能量分别是  $\hbar\mathbf{Q}$  和  $\hbar\omega$ 。(1)式可以在倒空间形象地表示出来(见图 1)。在  $\mathbf{k}_i = \mathbf{k}_f$  时,该公式就退化为布拉格定律,即

$$|\mathbf{Q}| = 2 |\mathbf{k}_i| \sin\theta \quad , \quad (3)$$

或

$$\lambda = 2d \sin\theta \quad . \quad (4)$$

由于中子与物质的相互作用很弱,所以可以利用费米黄金定则和玻恩近似来处理散射关系,从而获得中子的微分散射截面为

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} = N \frac{k_f}{k_i} b^2 S(\mathbf{Q}, \omega) \quad , \quad (5)$$

其中  $N$  是原子核的数目,  $b$  是原子核散射长度。而散射方程  $S(\mathbf{Q}, \omega)$  为

$$S(\mathbf{Q}, \omega) = \frac{1}{2\pi\hbar N} \sum_{l,l'} \int_{-\infty}^{\infty} dt \langle e^{-i\mathbf{Q} \cdot \mathbf{r}_{l'}(0)} e^{i\mathbf{Q} \cdot \mathbf{r}_l(t)} \rangle e^{-i\omega t} \quad , \quad (6)$$

其中  $t$  是时间,  $\langle \dots \rangle$  表示对初始状态的平均. 可以看到,  $S(\mathbf{Q}, \omega)$  仅仅依赖于中子传递到样品的动量和能量, 与中子入射和出射的波矢  $k_i$  和  $k_f$  的绝对值无关. 它包含着样品内原子的位置和运动的信息. 对于大多数中子散射实验来说, 其目的都是通过测量  $S(\mathbf{Q}, \omega)$  来决定所观测系统的微观性质. 对于自旋系统, 我们也可以推得类似的关系, 只是这时需要考虑中子自旋、样品自旋与  $\mathbf{Q}$  的关系. 限于篇幅就不在这里介绍了.

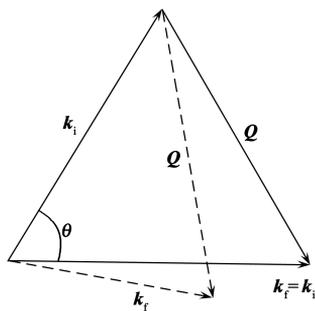


图1 中子散射中的三角关系(其中实箭头( $k_f = k_i$ )代表弹性散射, 虚箭头代表非弹性散射)

### 3 中子三轴谱仪

1950年, 不算很年轻(32岁)的加拿大人 Bertram Brockhouse 在刚刚拿到博士学位之后, 来到当时拥有中子束流强度最高的反应堆的加拿大国家研究理事会原子能项目(即后来的加拿大原子能有限公司)的 Chalk River 原子能实验室工作. 该实验室在首都渥太华的西北方向, 距离渥太华约 200 公里, 基本属于前不着村后不着店的地方. 他所居住的小镇 Deep River 现在也只有大约 4000 居民. 当 Brockhouse 还在为镇上爆发的毛虫灾害所苦恼的时候, 并没有想到自己将来会对物理学研究做出如此重大的贡献. 当时 Brockhouse 对中子还并不了解, 但是出于兴趣他决定还是进行与此有关的研究. 利用慢中子来研究非弹性散射的想法是在 1950 年 12 月的一次会议上产生的, 不过, Brockhouse 的初步尝试直到 1952 年也没有成功. 随后, 利用反应堆关机的时间, 他在美国 Brookhaven 实验室访问了 10 个月, 继续进行中子散射的相关研究. 返回 Chalk River 之后, 他终于成功搭建了三轴谱仪的原型机, 并在 1955 年的美国物理学会的一次会议上公布了测量结果. 由于在三轴谱仪研制方面的杰出贡献, Brockhouse 在 1994 年一个星期三的早晨醒来时, 收到了电话留言机里面从瑞典传来的消息.

从 Brockhouse 成功搭建三轴谱仪到现在已经过去 50 多年, 但是它的基本构架却并没有太大的变化. 如图 2 所示, 单色器、样品与分析器都可以分别旋转, 构成了所谓的“三轴”. 其中单色器和分析器都是通过单晶的布拉格散射来选择某一中子能量, 同时也分别决定了  $k_i$  和  $k_f$ . 而单晶样品也需要旋转至某一角度, 从而才可以移动到需要测量的波矢  $\mathbf{Q}$ . 可以看到, 三轴谱仪简单直接地实现了图 1 所示的散射三角形关系, 从而可以很容易地处理分析数据.

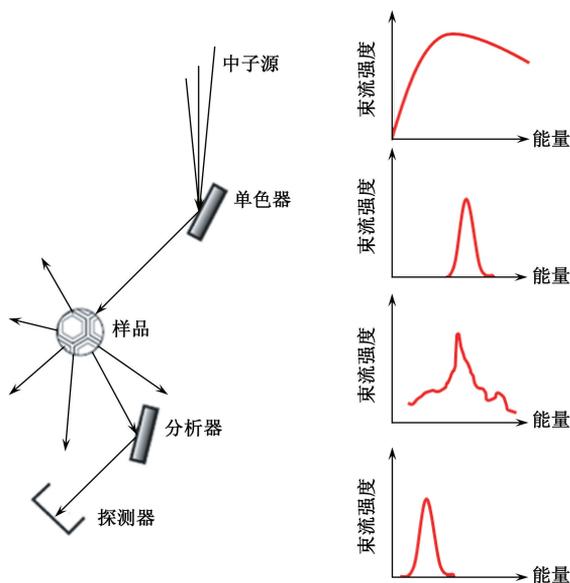


图2 三轴谱仪示意图. 右侧为经过中子源、单色器、样品、分析器之后的中子能谱示意图, 可以看到, 单色器和分析器只探测能谱中的一段

尽管三轴谱仪的基本结构仍然一样, 但是对三轴谱仪的发展却并非停滞不前. 近几十年来, 对于三轴谱仪的发展主要集中在三个方面: 增强信号、降低背景以及增加谱仪的灵活性. 下面我们结合这三个方面介绍一下三轴谱仪的几个主要部件.

如同前面所介绍的, 单色器和分析器无疑是三轴谱仪最核心的部件. 在选用晶体时, 其标准包括: 单胞体积小, 中子散射长度大, 热中子吸收系数低, 德拜温度高, 非相关散射截面低等. 按着这些标准,  $^{58}\text{Ni}$  单晶将是最适合的晶体, 不过由于其造价太高, 并没有被广泛应用. 实际中常用的晶体是热解石墨(PG), 其性能接近单晶石墨. 另外, Cu, Si 和 Ge 单晶也被广泛应用于三轴谱仪单色器, 不过它们的晶体镶嵌角太小, 为了增加中子束流强度, 通常采用高温热压的方法来人工增加镶嵌角.

近年来, 聚焦中子的方式已经被广泛用于增加中子束流强度. 反应堆式中子源所产生的中子束是非常发散的, 各个方向都有, 因此只有很少一部分中

子能够到达样品(中子源到样品通常超过 5m 以上).为了解决这一问题,单色器可以由很多块小单晶构成,这些单晶按照一定方式排列,即可以在垂直方向也可以在水平方向将发散的中子反射到样品上,从而达到聚焦中子的目的.目前双聚焦的单色器可以将样品处的中子束流强度提高一个量级以上.

类似于单色器,中子分析器也可以采用双聚焦的方式来增加到达探测器的中子束流.另外,多分析器的设计在近几年也逐渐成熟并成功应用到一些谱仪.在这种多分析器系统里,将放置多个分析器单晶,每个单晶都对应着一个单独的探测器或者一排位置敏感的中子探测器,从而可以同时测量倒空间内的多个点.这样,尽管在某个点的强度比聚焦单探测器的方法要低,但是在测量一条曲线上,却能够极大地节省时间,增强了测量的灵活性.

有些时候,在中子束流强度已经足够强的情况下,需要提高  $Q$  空间的分辨率,这时就需要使用准直器.最常见的准直器就是 Soller 准直器<sup>[2]</sup>.它由一排平行的可吸收中子的薄片组成,通过调整薄片之间的距离,就可以只允许发散角在某一角度之内的中子通过.准直器通常放置的位置包括单色器和样品之间、样品和分析器之间以及分析器和探测器之间.可以看到,当准直器让中子束发散变小时,也就自然减弱了其强度.因此在实际测量中,需要按照实验需求选用合适的准直器.

中子过滤器是降低背景的重要部件.通过布拉格定律我们可以知道,如果一个晶体可以让某一波长为  $\lambda$  的中子被散射,那么波长为  $\lambda/n$  的中子也同样满足布拉格定律.这些高阶中子将会增加背景,甚至导致杂峰.另外,高能中子由于难以屏蔽,也是背景噪音的重要来源.中子过滤器大致可以分为以下几种:(1)快中子过滤器.这种过滤器利用多声子散射来阻挡高能中子.例如蓝宝石晶体就可以有效地阻挡 100meV 以上的快中子通过<sup>[3]</sup>.(2)共振过滤器.这种过滤器通过原子核的共振效应来阻挡某一段的高能中子<sup>[4]</sup>.(3)布拉格散射过滤器.由布拉格定律可知,某一单晶所能够散射的最大波长是正比于它的最大面间距的.例如 Be 过滤器就可以几乎完全阻挡 5.2 meV 以上的中子,而对低于这一能量的中子完全透明<sup>[3]</sup>.另外,PG 过滤器在一些特定的波长下不允许其相应的半波长中子通过,因此也被广泛地应用到热中子谱仪中,用来阻止高阶中子<sup>[5]</sup>.(4)中子速度选择器.中子速度选择器通过旋转地吸收中子的叶片来允许某一区域速度(即能量)内的中子通过,过高或过低速度的中子都无法通过<sup>[6]</sup>.

## 4 中国科学院物理研究所-中国原子能科学研究院的热中子三轴谱仪

我国的中子散射技术起步较早,在上世纪 50 年代末就建造出我国第一台中子衍射谱仪——“跃进一号中子晶体谱仪”.上世纪 80 年代初,在钱三强、章综院士的倡导下,我国与法国合作建成了一个初具规模的热中子散射实验室,拥有 6 台中子散射谱仪和亚洲第一个冷源.然而,中国原子能科学研究院的 15MW 重水反应堆由于老化问题于 2007 年退役,使我国失去了开展高水平中子散射研究的平台.令人欣慰的是,为保持我国在中子散射研究领域的可持续性,国家在原有重水反应堆退役的同时,开展了高通量中国先进研究堆(60MW)的建设.目前,先进堆已建成并于 2010 年度达到临界,这为促进我国在中子散射科学研究方面的发展,增强我国在国际中子科学研究方面的竞争力带来了一个历史性的机会.

目前世界上主要科技强国都拥有自己的三轴中子散射谱仪,其中高水平的实验室包括:美国的橡树岭国家实验室和美国国家计量标准局;加拿大的 Chalk River 实验室;欧洲的 Laue-Langevin 研究所(法国)、FRM-II 实验室(德国);澳大利亚的 Bragg Institute 等.因此在中国搭建自己的高通量三轴谱仪也自然在先进堆建成后立刻提上了日程.中国科学院物理研究所与中国原子能科学研究院合作,将在先进堆 7 号中子水平孔道 A 束上搭建一台世界级的热中子三轴谱仪.

为了估算我们谱仪的性能,我们利用 McStas 软件对谱仪的中子束流强度进行了模拟.由于先进堆本身的真实中子束流强度还没有被测量,因此我们在中子孔道处的初始束流强度采用了先进堆的模拟数据.根据这一数据,我们对单色器、分析器的位置和尺寸进行了优化,获得了最佳聚焦的条件.图 3(a)给出了在样品处单色器对 25meV 中子束流的聚焦效果模拟.可以看到,通过双聚焦,可以提高中子束流强度达 10 倍以上.

如上所述,目前世界一流的三轴谱仪发展方向主要包括三个方面:提高中子通量;降低、消除背景噪音;增加实验手段的灵活性.在提高中子通量方面,其主要技术包括:双聚焦的单色器和分析器,从而可以大幅度提高样品处的中子通量;多分析器系统,可以同时测量倒空间能谱的 10 个以上的信号,从而有效地节省了

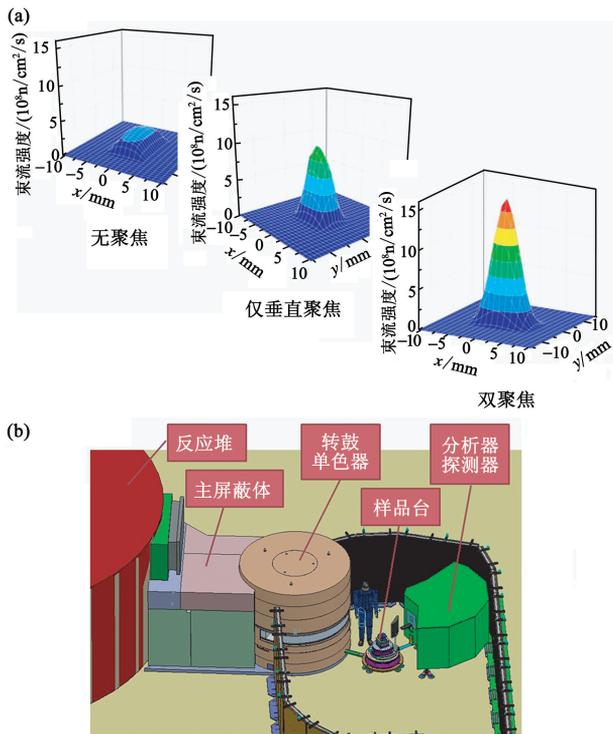


图3 (a) 三轴谱仪在样品处中子束流强度的聚焦效果模拟图 ( $x$ - $y$  平面代表样品处垂直中子束的截面, 其中  $(0,0)$  为样品中心); (b) 三轴谱仪的三维模型图

测量时间. 在降低、消除背景噪音方面, 其技术主要包括: 在单色器和分析器晶体后面贴附碳化硼等材料, 吸收未被反射的中子; 在中子束通道上加载各种过滤器来去除不需要的中子, 包括热解石墨过滤器、蓝宝石过滤器等; 在通道设计上按着样品需要的束流大小添加各种狭缝, 限制孔道等. 在增加实验手段灵活性方面, 其技术主要包括: 选择各种单色器来适应各能量段的测量; 极化中子, 以便在需要的情况下决定性地确定磁结构和磁激发; 采用各种大小的准直器, 从而可以轻松调整分辨率; 样品台可以承载各种实验环境, 包括极低温、强磁场、高压、高电压等. 在吸收了上述很多已经发展的最新技术的同时, 我们独创性地采用了单色器前放置速度选择器的设计. 预计这一方案将极大减少高能中子到达单色器的数量, 从而可以有效地降低背景噪音. 图 3(b) 给出了我们设计的总体模型图.

### 5 三轴谱仪的应用示例

三轴谱仪在物理学方面的应用非常广泛. 在物理性质方面, 它的测量范围包括弹性的晶格峰与磁结构峰、声子谱、自旋波、自旋涨落、临界散射、漫散射等. 在测量的材料方面, 它的测量范围包括高温超导体、铁基超导体、庞磁阻、低维磁性系统以及其他

大多数凝聚态物理所研究的材料, 还包括化学以及生物学方面的一些应用. 下面我们结合我们自己的一些工作来具体介绍一下三轴谱仪的应用.

和 X 射线粉末散射一样, 中子粉末散射是测量晶体结构非常重要的手段之一. 在新发现的铁基超导体母体  $\text{LaFeAsO}$  中, 中子粉末散射测量首先成功地观测到了与四方相到正交相晶格相变紧密相关的反铁磁相变, 并且定出了其磁结构<sup>[7]</sup>. 然而在测量另一种铁基超导体母体  $\text{NaFeAs}$  的时候, 中子粉末散射却只观测到了结构相变, 而没有探测到反铁磁结构. 这也导致了一些疑问, 是否在其他体系中所观测到的反铁磁相变是铁基超导体母体的共性, 同时在研究铁基超导电性机理的时候, 是否需要考虑体系的反铁磁性. 为了回答这一问题, 我们利用橡树岭国家实验室 HFIR 反应堆的 HB1 三轴谱仪, 探索是否在  $\text{NaFeAs}$  单晶中存在着反铁磁结构<sup>[8]</sup>. 我们的测量结果表明, 在  $Q=(1,0,1)_M$  处, 在低温下确实存在着一个峰. 其中下标 M 表示磁晶格晶胞. 该峰在温度上升后消失, 意味着其反铁磁的性质, 如图 4(a) 所示. 在其他反铁磁峰位置的测量表明,  $\text{NaFeAs}$  样品的反铁磁的共线性结构和 122 体系、1111 体系的铁基超导体母体是一致的. 为了判明  $\text{NaFeAs}$  系统中反铁磁是沿着晶体  $a$  方向还是  $b$  方向的, 我们需要比较磁峰与晶格峰. 需要指出的是, 在前面反铁磁峰 (见图 4(a)) 的测量中, 我们采用了较宽的准直器系列:  $48'-60'-80'-120'$ . 但是在

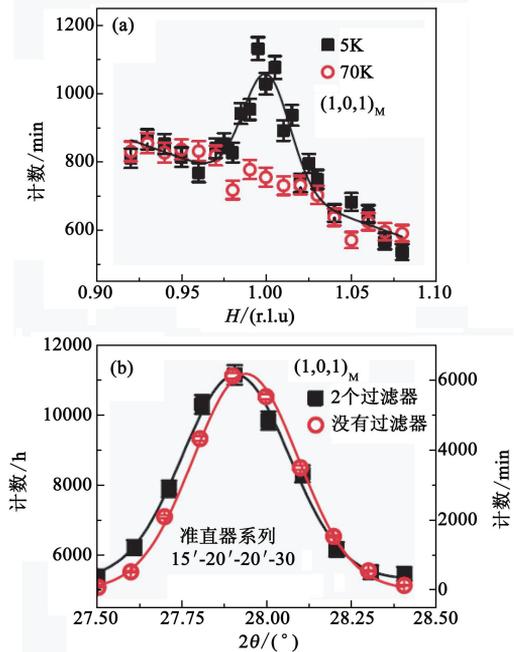


图4  $\text{NaFeAs}$  中磁结构峰的测量 (a) 反铁磁峰  $(1,0,1)_M$  处的  $H$  扫描; (b) 利用过滤器比较  $(1,0,1)_M$  处的反铁磁峰和晶格峰的  $\theta$  扫描

比较磁峰与晶格峰位置时,需要更高的分辨率,因此我们将准直器系列调整为  $15'-20'-20'-30'$ . 在这种准直系列下,我们测量的  $(1,0,1)_M$  峰的  $\theta/2\theta$  如图 4(b) 中的黑色实心方块所示. 在和晶格峰位置比较的过程中,我们不能简单地测量任一位置的晶格峰,这是因为仪器在移动到远离  $(1,0,1)_M$  的位置时的系统误差很容易引起错误的判断. 因此,我们需要拿掉在测量磁峰时的两个热解石墨过滤器. 如同前面所介绍的,这将使得  $\lambda/2$  的中子通过,从而测量到了晶格峰. 由于该晶格峰来源于正方相的两个孪晶,所以其位置是  $(1,0,0.5)$  和  $(0,1,0.5)$  耦合的结果. 而对于共线性反铁磁结构来说,由于一个方向是反铁磁的(即相邻自旋方向相反),而另一个方向是铁磁的(即相邻自旋方向相同),因此在  $a$  方向或  $b$  方向的反铁磁将只有在  $(1,0,1)_M$  或  $(0,1,1)_M$  有磁峰存在. 而我们测量到的磁峰位置在晶格峰的左边,如图 4(b) 所示,这意味着该磁峰对应的是  $a$  方向反铁磁的结构. 最后,通过和反铁磁峰与晶格峰强度的对比,我们也定出

NaFeAs 中磁矩的大小为  $(0.09 \pm 0.04)\mu_B$ , 这么小的磁矩是很难被中子粉末散射观测到的. 从上面的介绍可以看出,通过灵活地改变三轴谱仪的各种配置,我们成功地定出了 NaFeAs 的磁结构.

中子三轴谱仪更重要和更广泛的应用是在通过非弹性散射对自旋涨落进行研究的领域中. 让我们还是回到铁基超导体来,这一次我们讨论所谓“122”体系中的  $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ . 它的母体(即  $x=0$ , 无 Ni 掺杂)和前面介绍的 NaFeAs 一样,也存在着共线性结构的长程反铁磁序. 随着 Ni 的掺杂,这种反铁磁序逐渐减弱,而超导则将逐渐出现. 此时,母体中的自旋波也消失,其自旋激发则变得和超导态紧密相关. 其中一个重要的现象就是所谓的“磁共振峰”. 它是指自旋激发谱某一能量的强度在进入超导态时显著增加的现象. 在  $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$  ( $T_c=20K$ ) 中<sup>[9]</sup>, 我们首先在反铁磁位置  $(1,0,0)_M$  上进行能量扫描. 在这种模式下,我们固定三轴谱仪的分析器,从而只探测固定的出射中子能量(14.7meV). 然后改变单色器的角度,

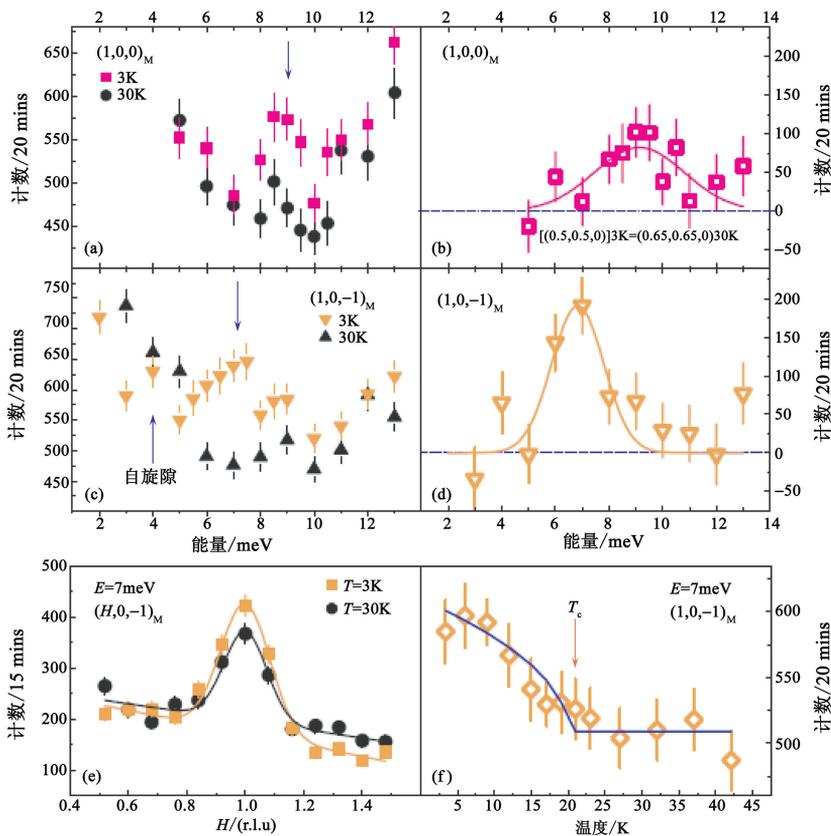


图 5  $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$  中的磁共振峰(该实验结果是在德国 FRM-II 反应堆的 PANDA 冷中子三轴谱仪上获得的) (a) 在  $Q=(1,0,0)_M$  处的能量扫描. 可以看到,在温度从 30K (高于  $T_c$ ) 降低到 3K (低于  $T_c$ ) 时,在 9meV 附近的信号明显增加; (b) 图(a) 中的两组能量扫描数据之差的显示图. 可以明显看到 9meV 处共振峰的存在; (c) 在  $Q=(1,0,-1)_M$  处的能量扫描; (d) 图(c) 中两组能量扫描数据之差的显示图. 可以看到,此时共振峰能量降低到约 7meV; (e) 在  $Q=(1,0,-1)_M$  和 7meV 处的  $H$  扫描. 可以看到,系统在进入超导态时强度是增加的; (f) 在  $Q=(1,0,-1)_M$  和 7meV 处,共振峰峰值随温度的变化关系(其中实线在  $T_c$  以下是按  $I=I_0+k(1-(T/T_c))^\beta$  的相变公式来拟合的)

以获得一系列的入射中子能量,从而测量样品中不同能量的自旋激发谱.我们发现,在系统进入超导态时,其强度在 9meV 处明显隆起,如图 5(a)和 5(b)所示.让人惊讶的是,如果我们将  $Q$  的位置换到  $(1, 0, -1)_M$ ,如图 5(c)和 5(d)所示,尽管仍然可以看到散射强度的增加,但是其位置却已经下移到了约 7meV 处.这表明,  $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$  中的共振峰存在着很强的晶体  $c$  方向依赖关系.为了查看该共振峰在  $Q$  空间的分布,我们固定单色器,从而不改变入射中子能量,沿着  $[H, 0, -1]_M$  的方向扫描  $H$ ,其结果如图 5(e)所示.可见,尽管样品在共振峰能量处的强度在进入超导态时增加,但是在正常态仍然有很强的自旋涨落.最后,我们将样品固定在  $(1, 0, -1)_M$  和 7meV,只变化温度,从而得到了共振峰峰值随温度的变化,其表现类似于超导序参量,如图 5(f)所示.可以看到,通过三轴谱仪,我们可以方便地获得样品中自旋激发的各种性质.

## 6 总结和结论

通过上述介绍,我们可以看到,三轴谱仪在利用中子散射测量材料中的磁结构和磁激发方面确实拥有独特的优势.通过灵活地控制谱仪中的各种器件和样品环境(低温、高场、高压等),我们就可以详细而系

统地研究材料的磁性质.我们预计中国科学院物理研究所与中国原子能科学院联合搭建的热中子三轴谱仪将在大约 3 年后对普通用户开放,届时也欢迎国内外学者和我们联系,进行相关方面的测量.我们的谱仪针对的能量范围大约在 2—60meV 之间.如果需要更低的能量或更好的能量分辨率,就需要搭建一台冷中子三轴谱仪.这方面先进堆的相关人员也正在考虑之中.需要指出的是,研究物理的磁性质并不仅仅只有通过三轴谱仪,目前国外已经发展成熟的散裂中子源更适合研究大范围倒空间和能量空间的自旋激发.而在国内我们必须等待广东东莞的散裂源尽快建立,从而更加完善我国中子散射方面的相关设备.

## 参考文献

- [1] Chadwick J. Nature, 1932, 129:312
- [2] Carlile C J *et al.* J. Phys. E, 1977, 10:543
- [3] Tennant D C. Rev. Sci. Instrum., 1988, 59:380
- [4] Mughabghab S F *et al.* Neutron Cross Sections. New York: Academic Press, 1981
- [5] Shirane G *et al.* Nucl. Instrum. Methods, 1970, 89:109
- [6] Fermi E *et al.* Phys. Rev., 1947, 72:193
- [7] Cruz C *et al.* Nature, 2008, 453:899
- [8] Li S *et al.* Phys. Rev. B, 2009, 80:020504(R)
- [9] Chi S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102:107006



# 北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

[www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn)

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大大专院校,科研机构,试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询.我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等.



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等.
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜.
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝,镀膜,镀金,及介质反射镜.直径 5mm—200mm.
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶.直径 5mm—200mm.
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤,SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头.
- 国产滤光片:规格为直径 5mm—200mm.(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片.
- 进口光学滤光片:长波通滤光片/短波通滤光片;波长:400—1000nm;窄带干涉滤光片

地址:北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座#306 室 电话:010-88096218/88096217 传真:010-88096216

网址:[www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn) E-mail:[kevinchen@goldway.com.cn](mailto:kevinchen@goldway.com.cn),[shinan@goldway.com.cn](mailto:shinan@goldway.com.cn),[zengan@goldway.com.cn](mailto:zengan@goldway.com.cn)

联系人:陈镛先生,施楠小姐,曾安小姐,郑海龙先生