

Research  
Rare Earth Permanent Magnets—Article

## DyFe<sub>11</sub>Ti 磁结构及其自旋重取向的中子衍射研究

Olivier Isnard<sup>a,\*</sup>, Eder J. Kinast<sup>b</sup>

<sup>a</sup> University Grenoble Alpes, Institut Néel du CNRS, 25 rue des Martyrs, Grenoble 38042, France

<sup>b</sup> Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS 90010-191, Brazil

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 July 2018

Revised 3 February 2019

Accepted 11 March 2019

Available online 22 November 2019

#### 关键词

中子衍射

磁相图

晶体结构

### 摘要

本文报道了通过中子粉末衍射探测DyFe<sub>11</sub>Ti的磁结构及其热演化规律。使用了变温中子衍射技术来测量磁矩及其取向的温度依赖性。Dy和Fe磁矩以反向平行的方式形成亚铁磁性耦合，其2 K时的易磁化方向是基面(*a*, *b*)内的[110]轴。随着温度的升高，该磁结构先后经历了两次自旋重取向现象。低温下，Dy磁矩较大，达到9.7μ<sub>B</sub>，而在200 K时磁矩迅速下降到7.5μ<sub>B</sub>。在Fe 8*i*位置观察到了最大的Fe磁矩。尽管磁结构发生了很大的变化，但在研究的温度范围内ThMn<sub>12</sub>型晶体结构一直保持不变。在第一阶段的自旋重取向温度(*T*<sub>SR1</sub>)时，观察到了易磁化轴的急剧倾斜；易磁化轴与晶体*c*轴之间的夹角从2 K的90°减小到200 K时的约20°（其中*c*轴是200 K以上的易磁化轴）；同时Dy和Fe磁矩保持反向平行耦合。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

在过去的30年中，由于含稀土金属(R)的富铁(Fe)金属间化合物具有用作永磁材料的潜力，人们对其产生了广泛兴趣。这些出色的材料可以将高有序温度、高磁化强度与显著的磁晶各向异性 and 矫顽力相结合。除了具有应用潜力之外，R-Fe金属间化合物还为研究人员提供了对巡游3d电子和局域4f电子态磁性行为进行广泛基础研究的机会。多项研究探索了RFe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>金属间化合物的磁性反常行为[1–3]。首先，没有大块RFe<sub>12</sub>化合物样品的相关报道。其次，为了获得RFe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>相并观察ThMn<sub>12</sub>结构类型，必须使用稳定元素M。当M为Ti时，可以使这些相获得相对较高的居里温度，并且可以通过在晶格间掺入氢(H)、碳(C)或氮(N)等轻元素来进一

步提高居里温度[4,5]。当R和Fe子晶格具有不同的择优取向时，这些材料也因其相对复杂的磁相图而受到关注[1,2,4]。

ThMn<sub>12</sub>结构最初由Florio等[6]确定，与CaCu<sub>5</sub>结构类型密切相关，其中一个稀土原子被一对3d过渡金属原子对接2RM<sub>5</sub>–R+2M→RM<sub>12</sub>关系有序替换。因此，一半的R原子在8*i*位置被M原子取代。这种取代导致了晶体对称性的改变，并且保留了四方的I4/*mmm*空间群。除了稀土元素占据的2*a*位置外，在三种不同的原子位置上还观察到过渡金属原子：8*i*、8*j*和8*f*[1,7,8]。ThMn<sub>12</sub>结构也与母体Th<sub>2</sub>Ni<sub>17</sub>结构有关。关于这些结构之间关系的详细描述，读者可以参考Hu等[8]的研究。

本文重点介绍DyFe<sub>11</sub>Ti化合物的磁结构及其温度依赖性。由于其本征磁特性以及两次自旋重取向转变的存

\* Corresponding author.

E-mail address: [olivier.isnard@neel.cnrs.fr](mailto:olivier.isnard@neel.cnrs.fr) (O. Isnard).

在, 该化合物引起了广泛的研究兴趣。在室温下, Dy-Fe<sub>11</sub>Ti表现出磁矩沿*c*轴的单轴排列, 这已经从单晶研究和穆斯堡尔光谱学中得出[9–12]。DyFe<sub>11</sub>Ti的低温磁特性更加复杂, 并且已经成为磁性研究的热点。从不同组单晶的研究中得出了相矛盾的结论[9–14], 特别是关于最低温度自旋重取向 $T_{SR1}$ 的转变特性是一阶或二阶的问题。但是, 这些研究人员一致认为,  $T_{SR2}$  (200 K以上的自旋重取向) 是第二阶的。然而迄今为止, 尚无关于通过中子衍射对磁结构进行直接研究的报道。本研究着眼于 $T_{SR1}$ 周围的低温磁行为, 目的是发现DyFe<sub>11</sub>Ti复杂的磁相图。

## 2. 材料与方法

在纯氩 (Ar) 气氛中, 通过高频感应熔炼Dy、Fe和Ti纯金属制备铸锭样品。将熔炼得到的铸锭放于抽真空的石英管中, 在950 °C下退火热处理10 d, 从而实现其相结构的均匀化。使用X射线衍射和热磁测量研究样品中相的纯度。中子衍射测量是在D1B上进行的, D1B是一种粉末衍射仪, 由法国国家科学研究中心 (CNRS) 和法国劳厄-朗之万研究所 (ILL) 的合作研究小组操作。配备热解石墨单色仪, 波长为2.52 Å。我们使用了一个包含400个单元的多计数器, 相邻单元之间的步长为0.2°; 检测器覆盖的2θ角度范围为80°。因为在较低角度未观察到布拉格反射, 所以将检测器的初始2θ位置设置为20°。衍射图是在1.5~202 K的不同温度下测试的。使用FullProf程序中Rietveld方法对晶体结构和磁性参数进行了精修[15]。一致性因子的定义在相应的FullProf程序手册中给出。我们使用了一种特殊的环形样品架, 以最大限度地减少钨 (Dy) 核对中子的吸收。

## 3. 结果与讨论

中子衍射数据的精修结果显示, 所研究的化合物中存在少量铁元素相 (其含量低于1%)。中子衍射还表明有TiFe<sub>2</sub>杂质存在的迹象。图1给出DyFe<sub>11</sub>Ti在2 K时中子衍射图的Rietveld精修图。由于钛 (Ti) 和Fe原子的中子相干衍射长度之间存在较大的差异, 因此可以精准地确定Ti原子的位置和含量。如表1所示, Ti原子仅位于ThMn<sub>12</sub>结构的8*i*位置, 而Fe原子位于其余的过渡金属位置8*i*、8*j*和8*f*。Ti原子优先占据8*i*位置, 这与先前报道的同类型RFe<sub>11</sub>Ti金属间化合物的结果一致[7], 其

原因是由于8*i*位置的体积较大。精修得到的Ti含量与最初的DyFe<sub>11</sub>Ti化学计量非常吻合, 证实了“含Ti杂质”的含量非常低。对中子衍射图的磁性贡献分析表明, Dy和Fe磁矩是亚铁磁性耦合的, 并且位于基面(*a*, *b*)内, 与*c*轴呈90°角。由于磁矩的取向方向相反[9,13], 因此测试了两个晶向: [100]和[110]。当磁矩沿[110]方向时, 在2 K时精修得到了很好的拟合效果, 这一结果与参考文献[13,14]一致; 因此, 易磁化轴为[110]方向。在2 K时, Dy原子带有的磁矩为9.7μ<sub>B</sub>, 非常接近三价态所预期的10μ<sub>B</sub>。同时发现铁的磁矩是铁磁性排列的, 并且对于三个不等价的铁原子位置具有不同的值; 最大的磁矩出现在Fe 8*i*位置, 而最小的磁矩出现在8*f*位置。在RFe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>化合物的8*i*位置观察到的大磁矩是RFe<sub>12-x</sub>M<sub>x</sub>化合物的一个普遍特征, 并且被认为是由于大原子体积和可能存在的对Fe磁矩有重要贡献的轨道所致[16]。Fe的这种磁矩序列 (即8*i* > 8*j* > 8*f*) 与从RFe<sub>11</sub>Ti同型化合物中三个Fe位置衍生的超精细场非常吻合[17,18]。Ti原子上没有磁矩被精修出。不排除钛原子被周围的Fe和Dy原子所极化而产生弱磁矩的可能性。但是, 这样的弱磁矩很可能低于这项研究中使用的粉末中子衍射的灵敏度。

为了研究DyFe<sub>11</sub>Ti磁结构的演变, 在1.5~202 K的加热过程中, 每2.5 K记录一次衍射图。低角度部分的放大图 (2θ介于21°~41°之间) 如图2所示, 突出了衍射强度的主要变化。此图对应于分别在24°、34°和35°处观察到的(110)、(200)和(101)面的布拉格衍射峰。其中前两个峰显示出强度的增加, 而(101)峰则相反, 在接近

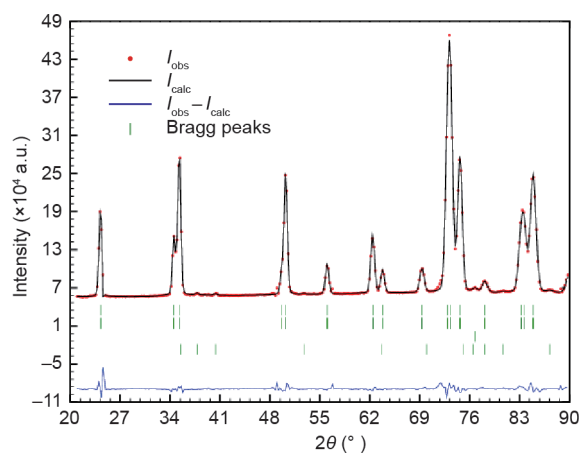


图1. DyFe<sub>11</sub>Ti在2 K时中子衍射图的Rietveld精修图。红点是实验数据, 黑色曲线对应Rietveld方法拟合曲线。第一和第二行绿色布拉格峰分别为核散射和磁散射的贡献。第三和第四行分别为α-Fe和TiFe<sub>2</sub>的痕量 (<1%) 的布拉格峰位置, 被称为杂质。a.u.: 任意单位;  $I_{obs}$ : 实测强度;  $I_{calc}$ : 计算强度。

表1 由Rietveld精修得出的晶体结构参数，在2 K时记录的DyFe<sub>11</sub>Ti的中子粉末衍射数据

Atom	Site	$x/a$	$y/b$	$z/c$	Occupancy (%)	$M_{[110]}$ ( $\mu_B$ )
Dy	2a	0	0	0	100	-9.7(2)
Fe	8f	0.25	0.25	0.25	100	1.8(1)
Fe	8j	0.2759(8)	0.5	0	100	2.1(1)
Fe/Ti	8i	0.355(1)	0	0	78/22(2)	2.2(1)

$a = b = 8.4826 \text{ \AA}$ ,  $c = 4.7682(3) \text{ \AA}$ .  $x$ ,  $y$ , and  $z$  are the atomic position parameters. The agreement factors are as follows:  $R_p = 1.7\%$ ,  $R_B = 1.1\%$ , and  $R_{Mag} = 1.15\%$ .  $M_{[110]}$ : magnetic moment along [110] direction.

100 K时其强度迅速降低。这种低温下的行为表明了磁矩的自旋重取向，并进一步激励了我们进行探索。(110)和(200)峰在高温下出现的磁性的贡献表明垂直于散射矢量的磁矩分量的出现。为了获取磁性结构的温度依赖性，对86个中子衍射图样分别进行了精修。当温度低于 $T_{SR1}$ 时，易磁化轴为[110]。当温度达到约89 K时，通过保持Dy、Fe磁矩与 $c$ 轴呈 $90^\circ$ 角，可以获得最佳拟合效果。这种简单的平面取向与先前报道的 $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer光谱学结果[12,17]很好地吻合。在91 K以上和202 K以下，通过精修 $c$ 轴和磁化方向之间的角度来对衍射图进行拟合。这样得到了更好的精修结果。图3中绘制了一个200 K时的精修示例。值得注意的是，Dy磁矩从2 K到200 K经历了大幅度的降低，超过 $2\mu_B$ 。这一发现证实了4f电子磁矩强烈的温度依赖性。Fe磁矩对温度变化的敏感度要低得多，并且在此温度范围内，每个Fe原子磁矩仅减小了 $0.2\mu_B$ 。该结果可以归因于DyFe<sub>11</sub>Ti较高的有序化温度，即552 K [12]，这导致了200 K以下的Fe磁矩处于饱和状态。

在图4到图6中给出了用Rietveld方法分析的热衍射数据结果。表2中给出了记录的DyFe<sub>11</sub>Ti在200 K时的结构和磁性数据。从中子衍射得到，易磁化方向与 $c$ 轴之间的角度热演化表明，DyFe<sub>11</sub>Ti在90 K以下时表现出易面各向异性，而 $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer光学谱在240 K和300 K时则表现出易轴各向异性[12]。如图4所示，在 $T_{SR1} = 90 \text{ K}$ 时发生的第一阶段的自旋重取向是急剧的，表现为从89 K时的 $90^\circ$ 突然下降到93 K时的 $72^\circ$ 。而后，该角度在105 K以上时的减小则缓慢得多。从 $50^\circ$ 到 $30^\circ$ 会平稳地下降，然后在接近第二阶段自旋重取向 $T_{SR2}$ （其值大于200 K）时稍微明显地降低。

Kuz'min [13]在理论研究中证明，样品成分的空间不均匀性（如钛含量）对DyFe<sub>11</sub>Ti的一阶自旋重取向的磁性和梯度特性有重要影响。用化学计量学方法对样品进行了中子衍射研究，为DyFe<sub>11</sub>Ti的磁相图和自旋重取向现象提供了清晰的图像。由中子衍射得到的磁化强度旋转角度的温度依赖性与参考文献[19]中报道的相似。

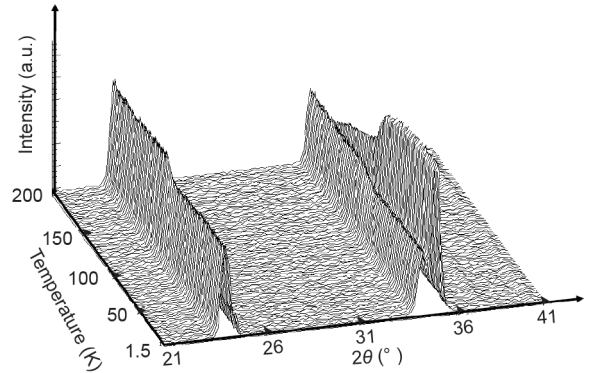


图2. 记录的DyFe<sub>11</sub>Ti中子粉末衍射图，在1.5~200 K之间低角度部分的温度依赖性。观察到的演变反映了温度变化后自旋重取向发生转变。

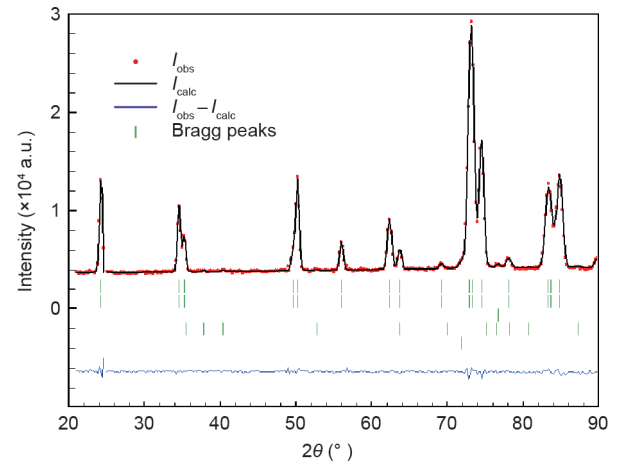


图3. 记录的DyFe<sub>11</sub>Ti在200 K时中子衍射图的Rietveld精修图。红点是实验数据，黑色曲线对应Rietveld方法拟合曲线。第一和第二行绿色布拉格峰分别指核散射和磁散射的贡献。第三和第四行分别为 $\alpha$ -Fe和TiFe<sub>2</sub>的痕量(<1%)的布拉格峰位置，被称为杂质。最后一行是低温恒温器含钒尾渣的贡献。

实际上，在图4中，可以观察到对于 $T < T_{SR1}$ 时，易磁化方向向面的快速变化。主要区别在于该自旋重取向的起始温度值（此处为 $T_{SR1}$  50 K和90 K相比），以及自旋重取向的角度（在我们的示例中为 $40^\circ$ 和 $50^\circ$ 相比）。正如在其他研究中所讨论过的[13]，这些变化可能是由于不同的Ti浓度引起的。参考文献[14]中研究的单晶有序温度为530 K与这里研究的粉末有序温度为552 K之间的



显著差异支持了这一解释。图4中绘制的实验曲线显然非常接近参考文献[13,19]中分别从理论和实验的角度讨论的结果。这一发现支持在 $T_{SR1}$ 处逐渐发生一阶自旋重取向转变的情况，应该可以解决文献中发现的争议。我们的结果也与AC磁化率结果一致[14,19]，该结果表明 $T_{SR1}$ 为一阶类型， $T_{SR2}$ 的自旋重取向为二阶类型。实际上，在 $T_{SR2}$ 时典型的磁化强度的二阶连续变化已经有相关报道[19]，由于各向异性的消失，导致该温度下磁化率的差异。

值得注意的是，在 $T_{SR1}$ 或 $T_{SR2}$ 处，晶格参数对温度的依赖性都没有出现异常，相反，在这两点的晶格参数是正常的，直到50 K时都几乎恒定，然后由于热膨胀， $c$ 和 $a$ 都增大，其变化率分别为 $2.3 \times 10^{-5} \text{ \AA} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $3.1 \times 10^{-5} \text{ \AA} \cdot \text{K}^{-1}$ （图5）。晶格参数上没有任何变化可能是令人惊讶的，但与先前报道的 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 正常热膨胀相符[20]。相对而言，磁致伸缩对单晶 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 自旋重取向相变附近的温度变化非常敏感[21]。原子磁矩的大小（图6）随着温度的升高而减小，但似乎不受 $T_{SR1}$ 处自旋重取向的影响。在所研究的温度范围内观察到的Fe磁矩变化很小，这与 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 相对较大的有序温度很好地吻

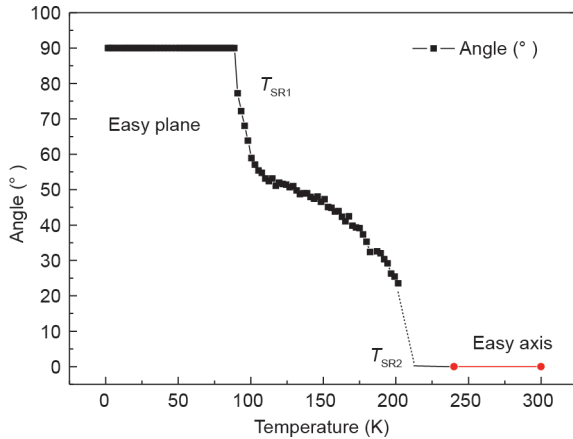


图4. 由 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 的中子粉末衍射图Rietveld精修得出的易磁化方向和 $c$ 轴之间倾斜角度的温度依赖关系。圆圈指的是同一样本上的Mössbauer数据[12]，虚线是直观引线。

表2 通过对200 K时记录的 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 中子粉末衍射数据进行Rietveld精修，导出的晶体结构参数

Atom	Site	$x/a$	$y/b$	$z/c$	Occupancy (%)	$M (\mu_B)$
Dy	$2a$	0	0	0	100	-7.47(10)
Fe	$8f$	0.25	0.25	0.25	100	1.7(1)
Fe	$8j$	0.277(6)	0.5	0	100	1.86(7)
Fe/Ti	$8i$	0.358(9)	0	0	78/22	1.90(7)/0

$a = b = 8.486(6) \text{ \AA}$ ;  $c = 4.776(3) \text{ \AA}$ .  $x, y$  and  $z$  are the atomic position parameters. The angle of the magnetization direction with the  $c$  axis is  $23^\circ$  (2). The agreement factors are as follows:  $R_B = 2.3\%$  and  $R_{Mag} = 1.9\%$ .  $M$ : magnetic moment.

合。Dy的磁矩对温度变化更为敏感，并且在50 K以上时呈现出近似线性的依赖性，减小速率为 $0.0145 \mu_B \cdot \text{K}^{-1}$ 。

## 4. 结论

通过中子衍射分析，我们确定了 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 中的Ti含量，并研究了其晶体结构。发现Ti原子仅位于 $8i$ 位置。 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 的磁结构在2 K时表现出易面各向异性，Dy和Fe的磁矩在基面内，且易磁化轴沿 $[110]$ 方向。最低温

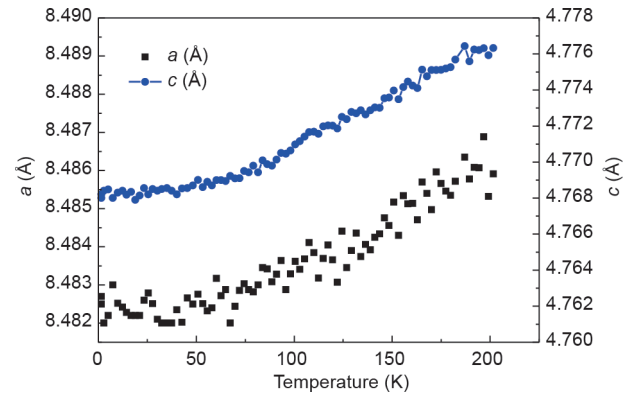


图5.  $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 的晶格参数在两次自旋重取向转变温度范围内的温度依赖性。

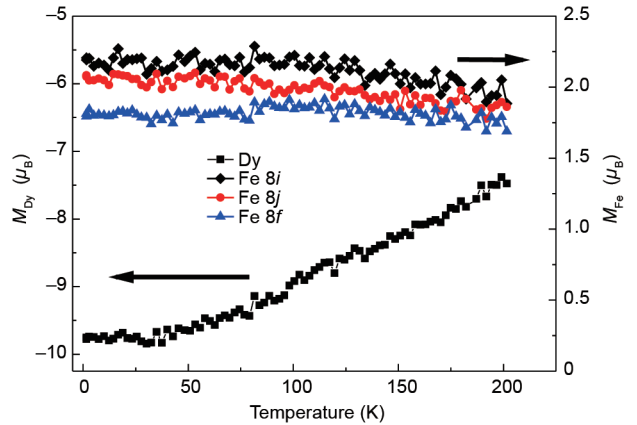


图6. Dy和Fe原子磁矩的温度依赖性。数据来自对 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 中子粉末衍射图的Rietveld精修。 $M_{Dy}$ : Dy的磁矩； $M_{Fe}$ : Fe的磁矩。

度的自旋重取向温度 ( $T_{\text{SR1}}$ ) 为90 K, 此时易磁化方向与[001]方向之间的夹角突然减小。在 $T_{\text{SR1}}$ 时, 我们的实验结果支持自旋重取向转变特征为一阶转变。在易面各向异性以上的宽温度范围内, 观察到一种锥形磁结构。随着温度的进一步升高, 磁矩向 $c$ 轴倾斜, 从而导致文献中报道的在300 K时的单轴特性。从圆锥形磁结构到易面的转变发生在200 K附近。在研究的温度范围内, Dy原子磁矩对温度有很大的依赖性, 而Fe原子磁矩几乎不变。晶格参数热演化的研究没有发现在自旋重取向时晶格参数的变化有任何反常行为, 这一结果与先前报道的热膨胀一致。对同类型的 $\text{RFe}_{11}\text{Ti}$ 氢化物, 特别是 $\text{DyFe}_{11}\text{TiH}$ 的磁性行为的进一步研究正在进行中。

## Acknowledgements

The use of the Collaborative Research Group instrument D1B operated by the CNRS at the ILL is warmly acknowledged, as well as the ILL for providing the neutron beam.

## Compliance with ethics guidelines

Olivier Isnard and Eder J. Kinast declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Buschow KHJ. Permanent magnet materials based on tetragonal rare earth compounds of the type  $\text{RFe}_{12-x}\text{M}_x$ . *J Magn Magn Mater* 1991;100(1-3):79-89.
- [2] Li HS, Coey JMD. Magnetic properties of ternary rare-earth transition-metal compounds. In: Buschow KHJ, editor. Handbook of magnetic materials, vol 6. Amsterdam: Elsevier; 1991.
- [3] Buschow KHJ, editor. Electronic and magnetic properties of metals and ceramics, part II. In: Cahn RW, Haasen P, Kramer EJ, editors. Materials science and technology—a comprehensive treatment, vol. 3B. Berlin: VCH Publishing; 1994.
- [4] Isnard O, Miraglia S, Guillot M, Fruchart D. Hydrogen effects on the magnetic properties of  $\text{RFe}_{11}\text{Ti}$  compounds. *J Alloys Compd* 1998;275-277:637-41.
- [5] Nikitin SA, Tereshina IS, Verbetsky VN, Salamova AA. Transformations of magnetic phase diagram as a result of insertion of hydrogen and nitrogen atoms in crystalline lattice of  $\text{RFe}_{11}\text{Ti}$  compounds. *J Alloys Compd* 2001;316(1-2):46-50.
- [6] Florio JV, Rundle RE, Snow AI. Compounds of thorium with transition metals. I. the thorium-manganese system. *Acta Crystallogr* 1952;5(4):449-57.
- [7] Isnard O, Guillot M. On the magnetic properties of  $\text{RFe}_{11}\text{TiH}_x$  compounds. *J Optoelectron Adv Mater* 2008;10(4):744-9.
- [8] Hu BP, Li HS, Coey JMD. Relationship between  $\text{ThMn}_{12}$  and  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  structure types in the  $\text{YFe}_{11-x}\text{Ti}_x$  alloy series. *J Appl Phys* 1990;67(9):4838-40.
- [9] Hu BP, Li HS, Coey JMD, Gavigan JP. Magnetization of a  $\text{Dy}(\text{Fe}_{11}\text{Ti})$  single crystal. *Phys Rev B Condens Matter* 1990;41(4):2221-8.
- [10] Andreev AV, Bartashevich MI, Kudrevatykh NV, Razgonyaev SM, Sigaev SS, Tarasov EN. Magnetic and magnetoelastic properties of  $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$  single crystals. *Phys B* 1990;167(2):139-44.
- [11] Tereshina IS, Telegina IV, Skokov KP. Investigation of spin-reorientation phase transitions in single-crystal  $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ . *Phys Solid State* 1998;40(4):643-4.
- [12] Piquer C, Isnard O, Grandjean F, Long GJ. Magnetic and Mössbauer spectral properties of  $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$  and  $\text{DyFe}_{11}\text{TiH}$ . *J Magn Magn Mater* 2003;265(2):156-66.
- [13] Kuz'min MD. On the gradual character of the first-order spin reorientation transition in  $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ . *J Appl Phys* 2000;88(12):7217-22.
- [14] Kuz'min MD, García LM, Artigas M, Bartolomé J. Ac susceptibility of a  $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$  single crystal. *Phys Rev B Condens Matter* 1996;54(6):4093-100.
- [15] Rodríguez-Carvajal J. Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Phys B* 1993;192(1-2):55-69.
- [16] Isnard O, Fruchart D. Magnetism in Fe-based intermetallics: relationships between local environments and local magnetic moments. *J Alloys Compd* 1994;205(1-2):1-15.
- [17] Piquer C, Grandjean F, Isnard O, Long GJ. An analysis of the hyperfine parameters of the  $\text{RFe}_{11}\text{Ti}$  and  $\text{RFe}_{11}\text{TiH}$  compounds, where R is a rare-earth element. *J Phys Condens Matter* 2006;18(1):205-19.
- [18] Piquer C, Grandjean F, Isnard O, Long GJ. A phenomenological model for the rare-earth contribution to the magnetic anisotropy in  $\text{RFe}_{11}\text{Ti}$  and  $\text{RFe}_{11}\text{TiH}$ . *J Phys Condens Matter* 2006;18(1):221-42.
- [19] García LM, Bartolomé J, Algarabel PA, Ibarra MR, Kuz'min MD. Spontaneous and field induced spin reorientation transitions of  $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$  single crystal. *J Appl Phys* 1993;73(10):5908-10.
- [20] Zubenko VV, Tereshina IS, Telegina IV, Tereshina EA, Luchev DO, Pankratov NY. Specific features in thermal expansion of  $\text{RFe}_{11}\text{Ti}$  single crystals. *Phys Sol State* 2001;43(7):1273-7.
- [21] Nikitin SA, Tereshina IS, Pankratov NY. Magnetostriction in the vicinity of the spin-reorientation phase transitions in single crystal  $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ . *Phys Sol State* 1999;41(9):1508-10.