

● 研 究 生 用 书 ●

THEORY AND
APPLICATION OF
MAGNETISM

华中理工大学出版社



宛德福 编著

磁性理论及其应用

磁性理论及其应用

宛德福 编著

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

磁性理论及其应用/宛德福 编著

武汉:华中理工大学出版社,1996年1月

ISBN 7-5609-1212-5

I. 磁…

II. 宛…

III. 固体-磁性-理论-概论

IV. O482.51

• 研究生用书 •

磁性理论及其应用

宛德福 编著

责任编辑:傅岚亭

*

华中理工大学出版社出版发行

(武汉·武昌·喻家山 邮编:430074)

新华书店北京发行所经销

华中理工大学出版社照排室排版

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:8.375 插页:2 字数:208 000

1996年1月第1版 1996年1月第1次印刷

印数:1-1000

ISBN 7-5609-1212-5/TM·56

定价:6.90元

111758 107

内 容 简 介

本书系统地阐明了磁性理论及其在若干重要方面的应用。全书分八章,包括:基础理论,磁有序机理,自发磁化随温度变化的各种近似计算方法,磁性相变理论,磁性杂质理论和若干专题讨论。其中一些是作者的研究成果。所介绍的专题,包括:磁各向异性,自旋波频谱和各种耦合效应等。

本书可作为以磁学为主的研究生的教材,也可作为和电子材料与元器件专业有关的科技人员和教师的参考书。

ABSTRACT

This book describes the theory of magnetism and its applications in some important aspects systematically. It consists of eight chapters including the basic theory, the magnetic ordering mechanism, the approximate calculation methods for the variation of the spontaneous magnetization with temperature, the theory of magnetic phase transitions, the theory of magnetic impurities and some special topics. Some of which come from the research achievements obtained by author. The special topics introduced include magnetic anisotropy, frequency spectrum of spin waves and all sorts of coupling effects etc.

It can be used as a textbook or references for graduate students majoring in magnetism. It can also be used as references for scientists and technicians as well as teachers who involved in electronic materials and devices.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自 1978 年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科学技术知识更新很快的形势;学术专著则应充分反映作者的科

研硕果和学术水平,阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上,应条理清楚,论证严谨,文字简炼,符合人们的认识规律。总之,要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些,但由于研究生的培养工作为时尚短,水平和经验都不够,其中缺点、错误在所难免,尚望校内外专家学者及读者不吝指教,我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

陳 珽 黃樹槐

1989. 11.

写在 1995 年

在今天,国家之间的竞争是国家综合实力的竞争,国家综合实力的竞争关键是经济实力的竞争,而经济实力的竞争关键又在于科技(特别是高科技)的竞争,科技(特别是高科技)的竞争归根结底是人才(特别是高层次人才)的竞争,而人才(特别是高层次人才)的竞争基础又在于教育。“百年大计,教育为本;国家兴亡,人才为基。”十六个字、四句话,确是极其深刻的论断。

显然,作为高层次人才培养的研究生教育就在一个国家的方方面面的工作中,占有十分重要的战略地位。可以说,没有研究生教育,就没有伟威雄壮的科技局面,就没有国家的强大实力,就没有国家在国际上的位置,就会挨打,就会受压,就会被淘汰。

“工欲善其事,必先利其器。”教学用书是教学的重要基本工具与条件。这是所有从事教育的专家所熟知的事实。所以,正如许多专家所知,也正是原来的《“研究生用书”总序》中所指出,研究生教材建设是保证与提高研究生教学质量的重要环节,是一项具有战略性的基本建设。没有研究生的质量,就没有研究生教育的一切。

我校从 1978 年招收研究生以来,即着力从事于研究生教材与教学用书的建设。积十多年建设与实践的经验,我校从 1989 年起,正式分批出版“研究生用书”。第一任

研究生院院长陈 珽教授就为之写了《“研究生用书”总序》，表达了我校编写这套用书的指导思想与具体要求，“要力求‘研究生用书’具备科学性、系统性、先进性”。第二任研究生院院长，也就是当时我校的校长黄树槐教授完全赞同这一指导思想与具体要求，从多方面对这套用书加以关心与支持。

我是十分支持出版“研究生用书”的。早在 1988 年我在为列入这套书中的第一本，即《机械工程测试·信息·信号分析》写“代序”时就提出：一个研究生应该博览群书，博采百家，思路开阔，有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此，有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在“这一特定方面”，他也可以选择一本有关的书作为了解与学习这方面专业知识的参考；如果一个研究生的主要兴趣在“这一特定方面”，他更应选择一本有关的书作为主要学习用书，寻觅主要学习线索，并缘此展开，博览群书。这就是我赞成为研究生编写系列教学用书的原因。

目前，这套用书已出版了 6 批共 30 种，初步形成规模，逐渐为更多读者所认可。在已出版的书中，有 8 种分获国家级、部省级图书奖，有 13 种一再重印，久销不衰，有的印刷总数已近万册。采用此套书的一些兄弟院校教师纷纷来信，赞誉此书为研究生培养与学科建设作出了贡献，解决了他们的“燃眉之急”。我们感谢这些赞誉与鼓励，并将这些作为对我们的鞭策与鼓励，“衷心藏之，何日忘之？！”

现在，正是江南初春，“最是一年春好处”。华工园内，

红梅怒放,迎春盛开,柳枝抽绿,梧叶含苞,松柏青翠,樟桂换新,如同我们的国家正在迅猛发展,欣欣向荣一样,一派盎然生机。尽管春天还有乍寒时候,我们国家在前进中还有种种困难与险阻,有的还很严峻,但是,潮流是不可阻挡的,春意会越来越浓,国家发展会越来越好。我们教师所编的、所著的、所编著的这套教学用书,也会在解决前进中的种种问题中继续发展。然而,我们十分明白,这套书尽管饱含了我们教师的辛勤的长期的教学与科研工作的劳动结晶,作为教学用书百花园中的一丛鲜花正在怒放,然而总会有这种或那种的不妥、错误与不足,我衷心希望在这美好的春日,广大的专家与读者,不吝拔冗相助,对这套教学用书提出批评建议,予以指教启迪,为这丛鲜花除害灭病,抗风防寒,以进一步提高质量,提高水平,更上一层楼,我们不胜感激。我们深知,“一个篱笆三个桩”,没有专家的指导与支持,没有读者的关心与帮助,也就没有这套教学用书的今天。

诗云:“嘒其鸣矣,求其友声。”这是我们的心声。

中国科学院院士
华中理工大学校长
兼研究生院院长

杨叔子

于华工园内

1995年3月7日

目 录

第一章 导 言

§ 1.1	总论	(1)
§ 1.2	磁学理论的发展	(4)
§ 1.3	量子力学基础知识	(13)
§ 1.4	磁性哈密顿量	(29)
§ 1.5	磁有序结构	(35)

第二章 磁有序机理

§ 2.1	原子间的交换力	(40)
§ 2.2	直接交换相互作用	(42)
§ 2.3	超交换相互作用	(44)
§ 2.4	RKKY 理论	(55)
§ 2.5	磁有序的能带模型	(63)

第三章 磁有序行为的唯象理论

§ 3.1	平均场近似	(75)
§ 3.2	平均场近似方法的改进	(82)
§ 3.3	定域分子场	(88)
§ 3.4	相关有效场	(92)
§ 3.5	自旋波理论	(95)
§ 3.6	磁性相变	(102)

第四章 铁磁序的格林函数方法

§ 4.1	量子体系的三种描述方式	(115)
§ 4.2	格林函数	(117)

§ 4.3	用格林函数方法求铁磁体系的磁化强度	(122)
-------	-------------------	-------

第五章 磁性杂质理论

§ 5.1	磁性杂质与稀磁合金	(137)
§ 5.2	磁性杂质形成局域磁矩的条件	(138)
§ 5.3	近藤效应	(144)

第六章 磁各向异性和磁致伸缩

§ 6.1	引言	(148)
§ 6.2	磁各向异性和磁致伸缩的唯象理论	(150)
§ 6.3	磁各向异性的测量原理	(159)
§ 6.4	磁各向异性和磁致伸缩的微观理论	(163)
§ 6.5	磁各向异性的理论计算	(172)
§ 6.6	感生各向异性	(192)
§ 6.7	交换各向异性	(199)

第七章 自旋模式频谱

§ 7.1	自旋模式	(204)
§ 7.2	自旋波频谱	(206)
§ 7.3	静磁模频谱	(211)

第八章 磁与非磁物性耦合效应

§ 8.1	铁磁体的磁电效应物理原理	(218)
§ 8.2	铁磁体的磁场电效应	(227)
§ 8.3	磁光效应	(232)
§ 8.4	磁光效应的物理原理	(235)
§ 8.5	磁光效应的量子理论	(240)
§ 8.6	磁光效应的应用	(244)
§ 8.7	磁致热效应	(247)

第一章 导 言

§ 1.1 总 论

本书系统地阐明磁性理论的概念和研究方法,并介绍在若干重要方面的应用。本节总论,概括性地陈述几点:

①磁性现象是广泛的,从最小的基本粒子到宏观宇宙天体,无不具有磁性,严格说来,一切物质都有磁性,只是强弱程度迥异而已。人类对磁性现象的长期研究,逐渐认识磁性物质的微观结构及其与宏观性能的联系;认识了磁性现象的本质,并在量子理论基础上建立起坚实的磁学基础理论。磁性理论研究的一个主要趋势,是越来越多地把注意力放在对人类社会的有效利用上。磁性在科学上和技术上的应用,广泛而多种多样。磁性理论及其应用,在自然科学领域已形成很重要的分支,磁性材料已足迹到人类活动中的各技术领域,起着很重要的作用。

②从微观本质上说,一切物质的磁性都来源于原子中的电子自旋磁矩、电子轨道磁矩和原子核磁矩。由于原子核质量约为电子质量的 10^3 倍,核磁矩是电子磁矩的 $1/10^3$ 倍,在一般讨论中略去。当原子中各电子壳层内电子成对出现,自旋和轨道的磁效应各自相互抵消时,只有当受到外磁场作用,使相互抵消状态被破坏,才显示与外磁场反平行的感生净磁矩,其磁化率 χ_d 约为 $10^{-7} \sim 10^{-6}$,且为负值,这种性质称为抗磁性。当原子中有不成对抵消的电子时,原子有净磁矩 m ,受外磁场(H_e)的作用,便获得静磁能量 ($-\mu_0 m H_e \cos \theta$),这里, μ_0 是真空磁导率, θ 是磁矩矢量处于平衡态时相对于外磁场矢量的夹角。当静磁能量的绝对值大于平均热骚

动能量($k_B T$)时,原子磁矩将克服热骚动而朝外磁场取向,沿外磁场方向有净磁矩,其磁化率 χ_p 约为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$,且为正值,这种性质称为顺磁性。代表热骚动能的符号 $k_B T$,其中 k_B 是波耳兹曼常数, T 是绝对温度。显然,抗磁性效应是普遍的,但不是在所有物质中都能够观察得到,因为在抗磁性被更强的顺磁性效应所掩盖的场合,实际观察到的是占优势的顺磁性和弱的抗磁性二者之差的效应。在原子中未成对抵消的电子自旋之间存在交换相互作用,这是一种强的具有量子力学性质的交换力,使净自旋及其产生的净磁矩自发性有序排列起来,形成在能量上更为有利的磁有序状态,其交换相互作用远大于静磁能量,故能够获得远大于顺磁性的磁矩,沿磁场方向的磁化率 χ_f 为 $1 \sim 10^4$,且为正值,这种性质称为铁磁性,一般又称强磁性。可见,磁有序是由顺磁性原子组成的体系在一定条件下由交换相互作用所导致的。随着新实验技术使用和理论研究的进展,除了抗磁性、顺磁性和铁磁性之外,又陆续发现有反铁磁性、亚铁磁性、螺旋磁性等更复杂的磁有序形式,扩大了磁学的研究领域。

③磁有序一般包括铁磁序、反铁磁序和亚铁磁序,其中铁磁序和亚铁磁序都是强磁性,反铁磁序是弱磁性,它们的理论基础,本书第二章将分别阐明。在强磁性体系中,单位体积内的磁矩是自发地磁化到饱和,按不同区域在不同方向以高度有序地排列,形成自发磁化区域,这就是由外斯(Wiess)最先提出的磁畴。磁畴的存在已被大量实验所证实。自外斯分子场理论以后,现代磁性理论往两个主要方面发展:自发磁化理论和磁畴理论。前者包含三个主要内容:磁有序起源;热骚动(环境温度)对磁有序的影响;磁有序结构。本书的二至五章回答了这些问题。后者即磁畴理论是技术磁化及应用磁学的基础理论,在应用上是很重要的。本书的六至八章,正是以磁畴理论为基础来阐明磁学领域内的有关专题。

④磁有序对非磁性因素耦合效应,主要有磁-电效应,磁-光效应,磁-热效应和磁-弹效应,它们把磁性理论及应用推向深度和广

度的发展,人们正在利用磁与非磁性因素耦合的各种效应,不但作为探索物质结构有关信息的手段,而且使其进入有效的技术应用,本书的最后一章涉及这个内容。

⑤从下一节即将看到,磁学理论的发展呈现错综复杂的历史,这与磁性本身具有的特殊性密切相关。从外斯时期到目前格林(Green)函方法,不同理论模型使人们对磁有序现象弄明白了许多,但是,理论之间的差别形成长期相互对立又相互补充说明某一磁性规律的格局,持续半个多世纪,这不是发生在理论对磁性现象概念上的不一致,而是发生在理论模型及近似方法的不同。面对这种情况,作者认为首先指出研究磁性理论的基本思路是至关重要的。宏观物体性能乃是从基本质点性质的集体反映出发,原则上可以把研究磁性理论的方法归为两个步骤,首先应用量子力学,研究微观粒子的性能,考虑其间以及环境的相互作用,找出体系的各种状态和对应的哈密顿量;其次,应用统计物理,确定体系的配分函数,此配分函数的典型形式是:

$$Z_T = \sum_n g_n \exp(-\mathcal{H}_n/k_B T)$$

式中, g_n 是统计权重, $\mathcal{H}_n$ 是状态 n 对应的哈密顿量。根据热力学势:

$$\Phi = -k_B T \ln(Z_T)$$

这个关系,最后能够确定在热力学平衡态下有关磁性参量。问题是求解配分函数会遇到理论和数学上的困难,因此,现代磁学理论研究从相应于前述的两方面入手,亦分成两类:只考虑磁体中最主要的相互作用,解决量子力学及统计物理方面的问题;从实验或假设的宏观模型出发,避开复杂的微观状态,仅仅根据热力学原理,利用平衡态能量极值条件,建立磁性现象的宏观理论。这两类理论在研究磁各向异性问题特别表现突出,例如,单离子模型计算磁各向异性是微观理论,各种晶系的磁各向异性能量的数学表达是宏观理论。读者将在本书第六章得到验证。

§ 1.2 磁学理论的发展

一、近代磁学理论的形成

物质的磁性是一个历史悠久的研究领域。作为近代磁学研究的先驱者,当推居里(Curie)在 19 世纪末的工作。他发现了磁性的临界温度,还确定了顺磁磁化率与温度成反比关系,即

$$\chi_p = \frac{C}{T} \quad (1-1)$$

称为居里定律。式中 C 是居里常数,可以证明 C 具有下面表达形式:

$$C = \frac{Nm^2}{3k_B}$$

式中, N 是单位体积内的原子数。

到 20 世纪初,朗之万(Langevin)将经典统计力学应用到有一定大小的原子磁矩体系,导出了居里定律。若原子磁矩为 m ,取向与 Z 轴方向施加外磁场 H_e 成 θ 角度,磁矩的热平均值由下式给出:

$$\langle m_z \rangle = \frac{\int m \cos \theta \exp\left(\frac{m H_e \cos \theta}{k_B T}\right) d\Omega}{\int \exp\left(\frac{m H_e \cos \theta}{k_B T}\right) d\Omega} = m L(x)$$

而

$$\left. \begin{aligned} L(x) &= \coth x - \frac{1}{x} \\ x &= \frac{m H_e}{k_B T} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式(1-2)称为朗之万函数。当外磁场 H_e 很小时,顺磁化率 χ_p 可以写成居里定律的形式,即

$$\chi_p = \frac{N \langle m_z \rangle}{H_e} = \frac{C}{T}$$

在朗之万理论的基础上,外斯假定原子磁矩之间存在使磁矩相互平行的力,这个力相当于在每个原子上起平均内磁场的作用。外斯称它为分子场,用符号 H_{mf} 代表,其大小正比于 $\langle m_z \rangle$,即

$$H_{mf} = W \langle m_z \rangle \quad (1-3)$$

式中, W 是外斯分子场系数。分子场的作用是使原子磁矩作有序取向,形成自发磁化。把 H_{mf} 加到外磁场上,令

$$y = \frac{m(H_e + W \langle m_z \rangle)}{k_B T} \quad (1-4)$$

当 $H_e = 0$ 时,则 $\langle m_z \rangle > 0$ 的条件是:

$$T_c = \frac{m^2 W}{3k_B} > T$$

即铁磁性条件, T_c 定义为居里温度。利用式(1-4),在 $T > T_c$ 时,可以推导出居里-外斯(缩写为 C-W)定律:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (1-5)$$

此处的 T_c 就是居里发现的磁性临界温度。由外斯理论得到磁化强度为:

$$M = N \langle m_z \rangle$$

同时还可以求得磁化强度、磁化率与温度之间的关系,如图 1-1 曲线所示。一般说,几乎所有的铁磁体中都能够观察得到像图 1-1 表示的曲线形式。

上述理论,从唯象角度很出色地解释了顺磁性和铁磁性行为,促进近代磁学理论的形成。然而,这种唯象理论本身却存在两个根本

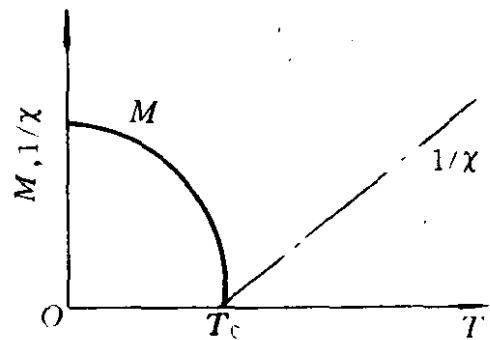


图 1-1 根据外斯理论, M 、 $\frac{1}{\chi}$ 与 T 的关系

性的困难：一个是原子具有一定大小磁矩的假设，这在经典物理学中无法解释；另一个是分子场来源于什么，从经典概念亦是不能理解的。到量子力学出现以后，这两个根本问题才被彻底解决了。

二、交换相互作用理论

量子力学建立后，已知自由态原子的固有电子状态与一定大小的量子化轨道运动和自旋相对应，那些未成对的电子磁矩对原子磁矩作出贡献。由于d电子和f电子的轨道都处于原子内部，不同于主宰化学键的s,p电子，所以，d,f电子壳层是决定物质磁性的电子壳层。而铁族和稀土族离子具有未成对的d电子和f电子形成磁性电子壳层，这就是为什么铁族和稀土族元素总是与磁性结下不解之缘。

当用量子力学研究氢分子结合能量时，人们得到认识，考虑电子波函数交叠，根据泡利(Pauli)不相容原理和电子交换不变性，一项新的交换相互作用出现了，对应地有一项附加能量，定义为交换相互作用能量。正是这项能量，在电子自旋相对取向不同时，导致体系的能量有差别，从而产生电子自旋取向有序性。1928年，海森堡(Heisenberg)以交换能量为出发点，把原子磁矩间的有序取向归结为量子力学的交换相互作用，建立了局域电子自发磁化理论，通常称为海森堡交换相互作用模型。若采用自旋算符 $\hat{S}_i, \hat{S}_j$ 等，脚标*i, j*表示不同的近邻格点，体系的交换相互作用哈密顿量算符由下式给出：

$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{ex}} = - \sum_{i,j} J_{ij} (\hat{S}_i \cdot \hat{S}_j) \quad (1-6)$$

式中， J_{ij} 是格点*i*和格点*j*上原子之间的交换相互作用常数。海森堡认为铁磁序的 J_{ij} 是正值。为简单起见，对于同类原子体系，脚标*i, j*可以去掉，由此得到分子场系数为：

$$W = \frac{z_i J}{2Nm^2}$$