

现代工程磁学

〔日〕工学博士 櫻井良文 编

机械工业出版社

TB13

3

现代工程磁学

编者

大阪大学教授・工学博士 桜井良文

执笔者

大阪大学教授・工学博士 桜井良文

九州大学教授・工学博士 成田賢仁

日本大学教授・工学博士 川西健次

東北大学教授・工学博士 菅野正

早稻田大学 寬

名古屋大学 晋



机械工业出版社

本书采用少而精的手法阐述了磁性新的应用及其必要的基本理论。以较大篇幅详细地论述了磁在各种科学技术领域的新应用。其中包括现代工程磁学概论、现代工程磁学基础、磁性材料、功率磁性器件、磁存储、磁记录、磁泡及其他磁性应用。各章之后附一定量的练习题和参考文献。书末列有各章练习题略解。

全书内容分别是由各有关方面的权威学者亲自撰写的。在书中读者将不难发现，深入浅出的精辟论述随处可见。这对于开始步入磁学领域的读者来说，可以说是一本必读的精著。

本书可作为应用磁学、磁性材料与器件、功能材料及电工电子技术专业的教科书使用，也可供与上述专业有关的工程技术人员参考。

现代磁气工学

桜井良文 1981

* * *

现代工程磁学

〔日〕工学博士 桜井良文 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南路一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $8^{1/8}$ ·字数 209 千字

1987 年 2 月北京第一版·1987 年 2 月北京第一次印刷

印数 0,001—2,213·定价 2.65 元

*

统一书号：15033·6703

译者的话

《现代工程磁学》一书是由日本当代著名的六位应用磁学专家撰写，樱井良文教授主编的。近年来，在国外先后出版同磁性有关的教科书和专著比较多。国内也出版了一些与之有关的著作。但多数都是侧重磁性基本理论和磁性材料性质方面。关于磁性在广泛的科技领域里的实际应用很少涉及。因此，在我国与磁性有的专业教学内容上，比较多的偏重于磁性基本理论和材料性质的陈述。对于磁性的应用，特别是如何引导和培养学生在掌握好基本理论的同时，了解或开拓磁性在更广阔的领域里的新应用有所忽视。这样不仅有碍于对学生创造性能力、开拓型人才的培养，而且使磁学如何更好地为我国现代科学技术振兴服务受到了限制。具体表现在我国的研究部门、生产部门对磁性应用未能给以足够的重视。通常较多地注重追求磁性材料的性能，不够重视它的新应用；比较重视在电子技术方面的应用，不注意在其他更宽阔的技术领域里的应用。《现代工程磁学》正好可以弥补这方面的不足。

该书篇幅不大，但由于作者们都是各自学校研究部门的首脑，长期主持领导磁性方面的研究工作，并在日本乃至世界取得了有影响的成就。另外，他们一直在教学第一线从事教学任务，有极丰富的教学和编写教材的经验。因此，本书在内容上少而精、理论同实际结合密切、取材较新。在文字叙述上严谨而精辟，通俗易懂。各章后面附有一定量的练习题，并有略解。它可以作为高等学校中应用磁学、磁性材料与器件、电工电子技术及功能材料等专业的教科书使用，也可供同上述有关专业的工程技术人员参考。

由于译者水平所限，错误之处在所难免，敬希读者批评指正。

1985年8月

前 言

磁铁做为指南针来使用，据说是在公元六世纪之前。但根据历史记载，指南针是在十三世纪由帕格尼乌斯 (Peregrinus) 发明的。1600 年吉尔伯特 (Gilbert) 以专门著作的形式论述了磁性的本质，其中谈到了地球本身就是个大磁石。法拉第 (Faraday) 在 1831 年指出了电和磁具有不可分割的关系 (电磁感应)。其后，磁性在发电机 (1932 年)、电动机、变压器和电工学的发展过程中起了极为重要的作用。人们于是经常使用电磁学这个基本术语。然而，一直过了很长时间还没有一个与电工学相对应的所谓磁工学的专门术语，磁性的应用也仅局限在铁芯材料和永久磁铁方面。其原因是由于当时还没有把磁性的本质完全搞清楚。到了二十世纪中叶，随着通信工程、电子学的发展，在磁学领域又出现了新的分支。出现了像铁氧体、磁带等用于高频段的磁性材料，同时以磁放大器为代表的非线性的磁性应用也相继问世。在磁性薄膜的研究中，人们广泛地研究了磁性物质内在的微观结构，并观察到了磁性薄膜中的磁畴和畴壁。同时它也在许多方面开始应用。这样就又极大地激发和促进了对于物质磁性的研究工作。就是在这个时候，提出了自旋的新概念，使磁性的应用同基本理论之间形成了密不可分的关系，于是工程磁学这个崭新的概念就应运而生。

然而，目前还不能说工程磁学这个术语已经相当普及了。自旋运动这样的概念，用来描写电子行为，人们也并不容易理解。对于电工、电子技术专业的学生或者是工程技术人员来说，在初学的时候也还会感到困难。本书就是以这些读者为对象，内容力求通俗易懂，使他们读了本书之后，对工程磁学有个全面的了解。

如上所述，要想真正理解新兴的工程磁学，必须从微观磁性

的立场出发，把物质的磁性与应用器件相互结合起来进行考虑。依据这种微观性质，创造和开发出新型的功能器件。基于这样的认识，就需要深入地搞清楚工程磁学里的基本内容。特别是近年来，人们普遍注意到像稀土族一类的元素，要想弄清楚其磁性本质，必须考虑到电子的轨道磁矩。因此，和以前的同类书籍相比较，本书第二章的内容是花费了较多的精力加以组织和叙述的。此外，对于以前书籍当中已经有的功率磁性器件和问世不久的新型计算机用的磁性器件等方面，无论在内容、篇幅安排上都做了细致地考虑和平衡。力求使不同学科领域的读者，对于涉及其它领域的有关的内容，都能容易理解。

编写本书的主要目的是为大学本科生提供教科书。此外，如前所述对于电工、电子技术人员来讲，手头备有此书，当需要的时候进行阅读，也不会感到有什么困难。

第一章总论，第二章工程磁学基础，第三章磁性材料讲述了在目前的工程磁学中最基本的内容。第一章在说明所谓工程磁学这个基本概念的同时，特别详细地叙述了当前发展的动向。第二章详细地记述了最重要的物质磁学性质与器件之间的有机联系。目的在于能够使工程技术人员比较好地掌握这方面的知识。但由于篇幅所限，有的在内容上稍微简单了些，有些内容在理解时可能会遇到一定的困难。因此，在书中明确地划分出必读和通读的内容，后者是为希望更加深入学习的读者安排的。第三章对本书中涉及到的各种磁性材料进行了系统地归纳总结。特别是对于使用上的问题及性能的测试方法等，从实用的观点出发进行了详细的叙述。

在第四章和第七章中，讲述了目前已被广泛应用的功率磁性器件及与之有关的最近才发表的各种磁性应用方面的内容。第四章重点讲解了变压器、电感这一类线性磁路和磁放大器这一类非线性磁路。这方面的内容在别的书籍中也有反映。因此，本书采用通俗易懂的手法，仅限于对一些具有代表性的重要问题进行了说明。第七章讲到的是当前受到人们普遍关注的一些内容。即磁

性在测量、控制上的应用。最近，在各种工业量的计测中，广泛地采用了磁性传感器。这里主要讲到的是有关温度、力学量和环境保护等测量方面的应用。此外，第七章还介绍了在控制用执行机构方面的应用，如电磁泵、直线电机等新型执行机构。

在第五章和第六章中讲述了当前举世瞩目的用于计算机上的磁性材料和器件。第六章主要讲解了关于磁泡的基本问题。第五章从磁存储和磁记录的发展历史开始讲起，然后对铁氧体磁芯矩阵、磁带、磁盘以及被称之为未来存储器的磁光存储器等对其重要性进行了介绍。关于磁泡方面的内容，为了明确起见，特意从第三章中分立出来，放到第六章中进行专题讲解。并且和第二章内容有关的磁泡的动态特性及磁泡存储器回路等基本知识也在本章中做了介绍。

全书内容分别是由各有关方面的权威学者亲笔撰写的。在书中读者将不难发现，深入浅出的精辟论述随处可见。这对于开始步入磁学领域的读者来说，可以说是一本必读的精著。

最后，对于在本书出版过程中，给予协助的各大学和出版社的诸位致以崇高谢意。

桜井良文

1980 年腊月

执笔分工

章 节		执 笔 者
第 1 章	总 论	桜井良文
第 2 章	工程磁学基础	内山 晋
第 3 章	磁 性 材 料	成田賢仁
第 4 章	功率磁性器件	小林 寛
第 5 章	磁性记忆・记录	桜井良文
第 6 章	磁 泡	川西健次
第 7 章	各种磁性应用	村上孝一

目 录

第一章 总论	1
§ 1-1 工程磁学	1
§ 1-2 功率磁性器件	3
§ 1-3 从计算机磁性器件向微型磁性器件发展	4
§ 1-4 磁性与测量	6
§ 1-5 磁分离, 生物磁学	9
第二章 工程磁学基础	11
§ 2-1 物质与磁性	11
§ 2-2 铁磁性的基本理论	17
§ 2-3 磁畴结构	24
§ 2-4 静态磁化过程	33
§ 2-5 动态磁化过程	42
§ 2-6 与铁磁性有关的各种物理性质	52
练习题	60
参考文献	61
第三章 磁性材料	62
§ 3-1 高磁导率材料	62
§ 3-2 高矫顽力材料	79
§ 3-3 记录·存储材料	90
§ 3-4 特殊材料	94
练习题	98
参考文献	99
第四章 功率磁性器件	100
§ 4-1 磁路	100
§ 4-2 含有磁铁的磁路	106
§ 4-3 变压器和电感	112
§ 4-4 磁放大器	122
§ 4-5 磁倍增器	135

§ 4-6 其他功率磁性器件·····	141
练习题·····	143
参考文献·····	144
第五章 磁存储和磁记录·····	145
§ 5-1 存储和记录·····	145
§ 5-2 铁氧体磁心存储器·····	147
§ 5-3 磁带·····	152
§ 5-4 磁鼓和磁盘·····	157
§ 5-5 磁光存储器·····	159
§ 5-6 其他存储器·····	166
练习题·····	173
参考文献·····	173
第六章 磁泡·····	175
§ 6-1 何谓磁泡·····	175
§ 6-2 磁泡的稳定性·····	176
§ 6-3 磁泡材料及其制备·····	186
§ 6-4 磁泡的动态特性·····	197
§ 6-5 磁泡回路·····	203
练习题·····	209
参考文献·····	210
第七章 磁的各种应用·····	211
§ 7-1 磁性传感器·····	211
§ 7-2 磁性执行机构·····	230
练习题·····	238
参考文献·····	239
练习题略解·····	240

第一章 总 论

§ 1-1 工 程 磁 学

所谓工程磁学是一个新的术语，是与英文的“magnetics”相对应。从历史上看铁磁性材料一开始就是电工学中不可缺少的组成部分，但是它仅仅是用来传导磁通和产生磁通。在二十世纪五十年代，出现了磁放大器，这种磁性材料的非线性特征引起了人们的关注。它说明了具有矩形磁滞回线的磁芯，可用以制做各种各样的电源和存储器件。从学会的发展也说明了这一趋向。例如，1956年由美国电气工程师协会、无线电工程师协会、ISA协会共同发起，在美国召开了“磁放大器讨论会”，1958年改名为“非线性磁学讨论会”。到了1963年发展成为国际会议，定名为INTERMAG (International Conference on Magnetics 即国际磁学会议)。该会议是一个关于磁性应用的世界规模的大会，在每年春季召开，今年*将召开的是第十八届会议。

从会议的召开及会议名称的急剧变更情况来看，由二十世纪五十年代开始，磁性的应用技术得到了迅猛的发展和变化。与此同时，做为电子计算机存储器使用的铁氧体磁芯和磁记录材料（磁带）等的需求量也增加起来，从而出现了工程磁学这个新概念（magnetics）。该术语是同电子技术（electronics）一词相对应的。在表 1.1 中列举了历届国际磁学会议上，所发表的论文内容的变化情况，从中可以看出工程磁学近期的发展和动向是：

（1）磁性应用的总趋势是从与电力有关的应用转向和电子计算机与信息有关的应用。近年来，和能源有关的功率磁性器件再度引起了人们的重视。

（2）关于磁泡、磁记录等磁性存储方面的论文数量在增加。

* 指1980年——译注。

表 1.1

举办时间	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
开会地点	华盛顿	华盛顿	华盛顿	休斯敦	华盛顿	华盛顿	阿拉斯加 特丹	华盛顿	坦达	京都	华盛顿	多伦多	伦敦	匹茨堡	洛杉矶	佛罗里达	纽约	波士顿
1 一般			4	4	2	4	1	2	1	2	2	3		4		4	4	
2 材料(金属物理)	5	19		33	13	19	28	27	38	64	20	23	43	11	35	55	125	29
3 功率磁性器件 (包括磁放大器理论)	48	31	41	26	30	20	16	5	15	22	16	50	56	35	30	38	55	49
4 存储器 (薄膜、铁氧体等) (磁畴、磁泡)	30 (25)	25 (25)	37 (37)	39 (39)	30 (30)	58 (58)	75 (75)	65 (50) (15)	87 (52) (35)	82 (45) (37)	69 (37) (32)	86 (29) (57)	61 (19) (42)	62 (1) (61)	66 (6) (60)	54 (20) (34)	82 (23) (51)	57 (12) (45)
5 磁记录	9	7	11		10	11	40	30	36	44	18	39	42	31	34	53	38	41
6 磁光				9	6	10	8	10	12	13	15	7	10		7	10	12	10
7 超导		9	7	21	8	12	9			10	6	18	10	12	9	6	3	6
8 微波			5	10	9	11	24	4	12	20	7	6	16	10	12	20	12	20
9 测量							11	8	12	16	6	3	6	10	9	8		10
10 非晶													7	45	21	35	61	30
11 生物磁学													1			7		8
12 磁分离													20	8	9	15	14	12
13 其他							17	11		5	11	11	11	3	8	17	4	5
合计	92	91	105	153	108	145	229	162	213	288	170	246	283	331	242	322	416	277

表中数字为论文篇数——译注。

(3) 在材料、金属物性等领域里, 研究磁性与其他物性之间关系的论文逐渐增多。热磁、磁光、磁致伸缩等效应正在不断地获得应用。

(4) 随着磁性研究的发展, 从微观上获取磁性物质内部机制的手段增多(微观磁学), 磁畴控制、磁光效应的发展, 导致了计算机工程磁学这一新领域的形成。

(5) 非晶态磁性材料引起注目, 其研究工作开展得很活跃。

(6) 含稀土元素的物质的磁学性质颇使人感兴趣。其中稀土永磁和磁泡材料已得到了实际应用。

(7) 磁分离、生物磁学、磁悬浮等已作为一个新兴领域, 引起了人们普遍地注意。

§ 1-2 功率磁性器件

磁学的发展是和电工学的发展密切相关的。由于电工学始于发电、输电和电力工程方面的应用, 因此, 截止到二十世纪的前期, 工程磁学主要是应用于所谓“强电”领域中。就磁性材料而言主要是两类, 即用以产生磁通的永磁材料和在电机及变压器中使用的硅钢片一类的铁芯材料。采用这类磁性材料做成的器件称之为功率磁性器件。变压器是利用铁芯中随时间变化的磁通, 将电压及电功率从其中一端传送到另一端, 即从初级传到次级的一种装置。为了减小变压器的波形畸变和降低能量损耗, 要尽量选用磁滞损耗小的材料, 并且要用在磁化曲线的线性部分。为此目的, 需要努力开发高导磁率、高饱和磁通密度的磁芯材料。对于电机除了上述要求之外, 由于电机在工作中要产生机械作用力, 因此希望铁芯材料具有一定的强度。硅钢片正是满足上述这些要求的磁芯材料, 长期以来它是制作功率磁性器件的主要材料。第二次世界大战的发生, 极大地推动了科学技术的发展。其中出现了磁放大器, 使工程磁学发生了根本性的变化。当时德军越多佛尔海峡进攻伦敦时, 使用了有名的 V-2 号武器。这种武器就是今天 ICBM(地对地制导导弹) 的前身。在 V-2 武器上安装的控

制用静态放大器就是磁放大器。德军使用的这种武器引起了联合国的震惊。这种放大器正如第四章里将要详细讲到的那样，是一种用铁和铜一类材料组成的没有可动部件的放大器，到了第二次大战结束以后，美国和苏联引用了德国的研究成果，使之得以飞速的大发展。在日本，昭和20~30（1945~1955）年代产业复兴时期，把这种放大器用于自动控制方面，也使之获得了发展，组成了各种各样的自动化装置。从原理上讲，这种放大器是利用了磁性材料磁化曲线的非线性特性，使用方法上与以往做为磁芯使用的情况完全不同。所以对于功率磁性器件可以说这是一个重要的转折点。后来由于积极地推广使用了这种非线性特性，相继出现了一些具有新型功能的磁性器件，如磁调谐器、磁振荡器、变频器、变流器以及各种检测仪器等等。通常把这些应用统称为非线性的磁性应用。关于这些内容在第四章中将详细讲解。为了改善这类器件的功能，又研制出了具有矩形磁滞回线的磁性材料，并且以环形磁芯形式得到了实际应用。除此之外，在许多应用领域中，还把这种磁芯同半导体器件（二极管和三极管）组合在一起使用，这方面的研究开展得相当活跃。

做为磁性功率器件使用的另外领域，是以电机为代表的执行机构。长期以来，这方面的情况并没有发生什么变化。随着自动控制的迅速发展，需要使用小型的具有快速响应特性的伺服电机。尽管在这方面进行了某些改进，但基本上没有多大的变化。直到最近，由于高速铁路技术上的需要，又研制成功了一种线性电机，只要将它一接通，就会呈现磁力悬浮状态。这种应用随着超导材料的开发研究，正在成为一个新兴的技术领域。另外，在原子能工业中，要求采用液态金属冷却剂，为驱动液态金属而使用的新型电磁泵，也正被积极地研究开发中。

§ 1-3 从计算机磁性器件向微型磁性器件发展

从本世纪的后半期开始，随着电子计算机和信息处理的发展，使人们认识到了存储器件的重要性。在非挥发性的存储器中，利

用磁滞特性来存储信息最为可靠。因此，出现了各种各样的磁性存储器。在电子计算机中所采用的共有两种存储器，即具有高速性能的内存储器和大容量的外存储器。前者以铁氧体磁芯为主，后者以磁带为主。但是，随着计算机的大型化以及小型计算机、微型计算机的普及，又出现了各种各样的存储器件。其中作为外存储器的有磁盘，在内存储器中有半导体 MOS 存储器、磁膜存储器、超导存储器、磁泡存储器等。这些存储器被相继开发，并且已达到了实用化的程度。

1955年，人们发现坡莫合金蒸镀薄膜的磁化强度，具有良好的翻转特性，在这之后，很多科研工作者相继将磁性薄膜存储器做为数字信息存储元件使用。但是，在达到实用化的过程中，发现了一些不可解释的现象，即蠕变和磁化强度的分散现象等。因此，有必要深入探讨清楚这些物理现象的本质和性质。在具有单轴各向异性的坡莫合金薄膜情况下，磁畴具有简单的结构，所以采用粉纹法或者磁光观测法，可以直接观察到磁畴结构及其畴壁的形状，这样一来就大大有助于研究薄膜的磁化机制。从前，只是用磁场和磁通概念解释磁性物质内部的物理现象，现在可以从微观的角度加以说明了。在这种条件下，可以观察出布洛赫形、涅尔形、十字形等畴壁结构以及由 180° 畴壁、 90° 畴壁所组成的磁畴结构。再进一步，采用电子显微镜（洛伦兹显微镜）来进行观察，这样工程磁学中的“微观磁性”问题就成为研究的主要问题。坡莫合金磁畴的研究，逐步从磁畴的控制发展到磁畴存储器的开发。到了1967年又发现了磁泡，用闪光灯拍摄了磁泡畴的动态特性。从解释硬泡问题过程中，引出了布洛赫线和布洛赫点等微观结构概念，发现这种结构与磁泡存储器件有直接的关系。

上面讲到的磁光效应，即利用法拉第效应和克尔效应来观察磁畴。这样，就可利用这一方法来读出在 MnBi 薄膜中的微小柱状畴。另外用激光束可在 $1\mu\text{m}$ 大小的磁畴上进行居里点写入，把这种读写过程组合起来，就形成了磁光存储器的研究方向。最

近以来，最引人注目的是关于稀土类。铁族非晶态薄膜方面的研究。

此外，在磁记录技术领域里，长期以来一直采用 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的涂敷形磁带。由于计算机的发展，要求提高信息传输速度，因此逐渐向磁盘的方向转移。与此同时，磁头技术的研究工作发生了飞跃，另外为了进一步提高磁记录密度，对磁记录中磁化强度的分布状态进行了探讨，致使磁记录技术的研究工作转移到垂直磁化记录方面上去。

§ 1-4 磁 性 与 测 量

测量技术的发展结果，使所有领域中的测量技术之间的关系变得密切了，特别是由于电子放大器时代的进步，完全可能测量出一些微小物理量的变化。因此，以往有些不能反应出来的物理现象，今天有可能利用这些现象做成传感器了。磁性材料中的磁致伸缩效应、热磁效应、磁光效应、电磁效应、约瑟夫逊效应等等，都可以用来制作传感器。

当提到磁性传感器，就会使人们联想到探测磁场和磁通的器件。从前就有用小磁铁做成的磁强计或是在铈线圈、探测线圈上感应出电压信号等器件。后来就改为采用霍尔器件、磁通门磁强计或约瑟夫逊结器件等，从而大大提高了器件和仪器的灵敏度。表 1.2 中列举了目前采用的磁强计的性能和价格的情况。从中可见，采用具有超导性质的器件，即约瑟夫逊结器件的仪器具有很高的分辨率。于是，以往不能测量的微弱磁场，也可以测量了。这类测量方法可以在环境工程、医学、能源等方面开拓新的应用领域。图 1.1 中，按照磁场的强弱表示出了一些特殊应用。其中特别指出了测量生物体信息方面的情况。

但是，近来的磁性传感器的主要发展趋向，不限于只是检测磁场强度，而是以磁场为中间量测位移和力等工程量值，或者以磁性介质所具有的各种物理现象为中间量，测量温度、位移、电流等物理量，这些就是磁性传感器当前的发展方向。尤其是在一些

表 1.2*

磁强计的种类	有效范围 [A/m]	分辨率 [A/m]	价格[¥]	备 注
调制器形 (磁通门)	$<1\sim 2\times 10^3$	$10^{-5}\sim 10^{-4}$	500~5000	通用形, 特殊形
薄 膜	$<10^3$	10^{-4}		
超 导	$<10^{-3}$	10^{-8}	2000~15000	分辨率好
质子磁强计	$<10^3$	10^{-4}	2000~6000	需要偏场
光 源	$<10^3$	$10^{-7}\sim 10^{-5}$	~10000	
霍尔效应	$<5\times 10^6$	10^{-1}	300~1500	通用形, 强磁场用
电磁感应	$10^{-7}\sim 10^0$		100~5000	交流磁场用

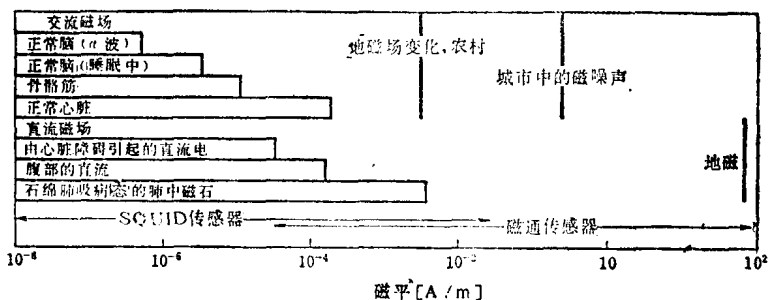


图 1.1**

新型磁性材料(如石榴石、非晶态磁性材料等)中,发现了一些新的物理性质。因此,研究利用这类传感器的工作,当前开展得十分活跃。在图 1.2 中表示了以磁场为中间量所能够检测的各种变量。当这些变量转换成磁场信号以后,可以采用非接触型的磁强计进行测量。

* D. I. Gorden, R. E. Brown and J. F. Haben: Methods for Measuring the Magnetic Field, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-8, 48(1972)

** David Cohen: Magnetic field of the human body, Physics Today, Vol. 28, 34(1975)