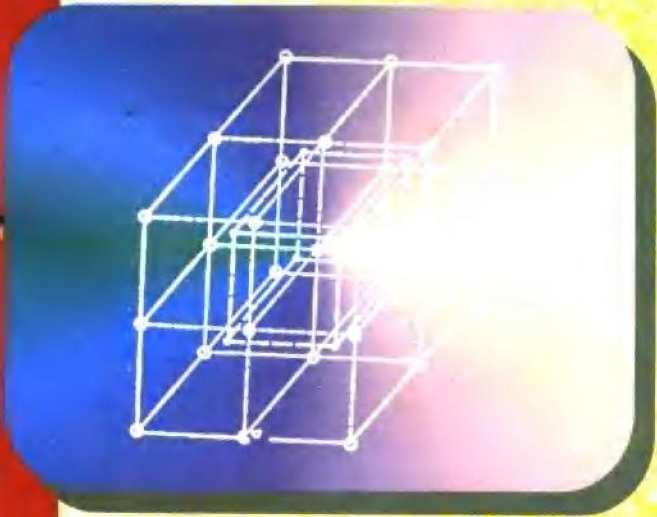


凝聚态物理学丛书

# 铁磁学

(上册)

戴道生 钱昆明 著



科学出版社

1765065

凝聚态物理学丛书

# 铁 磁 学

上 册

戴道生 钱昆明 著

JY1/67/07



科 学 出 版 社

1 9 9 8



北师大图书 B1385778

## 内 容 简 介

本书基于理论和实际相结合的思想,比较系统地介绍了铁磁学的物理图象和基本知识。全书分上、中、下三册出版。上册专门讨论物质磁性的起源及其随温度的变化;中册介绍技术磁化理论与磁路设计原理;下册论述交流磁化理论和磁共振理论。本书为上册,共分六章(即第一章至第六章),前两章主要介绍磁性的一般现象和理论,后四章介绍自发磁化的量子理论。本书末尾还附有参考文献。

本书可作为大专院校《铁磁学》课的教材,也可供从事磁性材料研究和生产及其他有关专业的科技人员参考。

凝聚态物理学丛书

铁 磁 学

上 册

戴道生 钱昆明 著

责任编辑 李义发

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1987年6月第一版 开本:850×1168 1/32

1998年5月第三次印刷 印张:12 3/4

印数:2581—4080 字数:332 000

ISBN 7-03-002847-3/O·533

定价:26.00元

## 《凝聚态物理学丛书》出版说明

以固体物理学为主干的凝聚态物理学，通过半个世纪以来的迅速发展，已经成为当今物理学中内容最丰富、应用最广泛、集中人力最多的分支学科。从历史的发展来看，凝聚态物理学无非是固体物理学的向外延拓。由于近年来固体物理学的基本概念和实验技术在许多非固体材料中的应用也卓有成效，所以人们乐于采用范围更加广泛的“凝聚态物理学”这一名称。

凝聚态物理学是研究凝聚态物质的微观结构、运动状态、物理性质及其相互关系的科学。诸如晶体学、金属物理学、半导体物理学、磁学、电介质物理学、低温物理学、高压物理学、发光学以及近期发展起来的表面物理学、非晶态物理学、液晶物理学、高分子物理学及低维固体物理学等都是属于它的分支学科，而且新的分支尚在不断迸发。还有，凝聚态物理学的概念、方法和技术还在向相邻的学科渗透，有力地促进了材料科学、化学物理学、生物物理学和地球物理学等有关学科的发展。

研究凝聚态物质本身的性质和它在各种外界条件（如力、热、光、气、电、磁、各种微观粒子束的辐照乃至处于各种极端条件）下发生的变化，常常可以发现多种多样的物理现象和效应，揭示出新的规律，形成新的概念，彼此层出不穷，内容丰富多彩，这些既体现了多粒子体系的复杂性，又反映了物质结构概念上的统一性。所有这一切不仅对人们的智力提出了强有力的挑战，更重要的是，这些规律往往和生产实践有着密切的联系，在应用、开发上富有潜力，有可能开辟出新的技术领域，为新材料、元件、器件的研制和发展，提供牢固的物理基础。凝聚态物理学的发展，导致了一系列重要的技术突破和变革，对社会和科学技术的发展将发生深远的影响。

为了适应世界正在兴起的新技术革命的需要,促进凝聚态物理学的发展,并为这一领域的科技人员提供必要的参考书,我们特组织了这套《凝聚态物理学丛书》,希望它的出版将有助于推动我国凝聚态物理学的发展,为我国的四化建设做出贡献。

主 编: 葛庭燧

副主编: 冯 端

## 前 言

我们在 1976 年编写出版了《铁磁学》，目的是使具有中专以上水平的、有实践经验的读者通过学习该书，能对一些与生产实践有密切联系的基本理论有一个初步的全面了解，并用来指导实践。所以重点讨论了磁化的基本机制及其物理概念，略去了复杂的数学推导。由于铁磁学是研究物质磁性的来源，及在外界因素（如磁场、温度、应力等）作用下磁性发生变化的基本规律的学科。因此，《铁磁学》书应以阐述铁磁体磁性的实验规律、基本理论和磁化机制为主，并在物理图象和概念上，以及主要理论分析上给予简明的叙述和数学推导。考虑到近几年来教学、科研和生产水平的提高，以及社会上对本学科的需求，我们在多次教学实践的基础上，对 1976 年出版的《铁磁学》一书进行了全面的修改。在修改时注意保留了原书的一些特点，同时增补了较大的篇幅，希望做到在内容上能反映近代比较成熟的理论和实验结果。

修改后的内容分为三部分，即自发磁化的基本现象和理论、技术磁化的机制和理论、交流磁化与磁共振的基本现象和理论。这三部分内容互有联系，又具有相对独立性，而且各自都有相当大的篇幅，所以分为上、中、下三册出版。

上册专门讨论物质磁性的起源及其随温度的变化。分别从经典和量子力学原理、由浅入深地讨论了铁磁物质自发磁化的原因。详细地分析了局域电子模型和巡游电子模型的物理基础，并给出了各种理论结果的具体推导。最后介绍了格林函数方法及其对铁磁性的讨论。

中册主要介绍技术磁化理论与磁路设计原理。前者主要是在

磁畴理论\*的框架内、论述磁性材料的静态磁化和反磁化过程，即从唯象理论的角度对磁性材料的技术特性给予阐述；后者属于磁性材料的应用问题。将磁性材料技术性能的理论阐述与材料的使用设计放在铁磁学内，这是一种尝试，其目的就是为使研制与设计人员都能掌握这两部分内容。此外，关于磁晶各向异性的微观理论、矫顽力新理论、低温下的特异磁性和非晶态磁性等磁学和磁性材料方面的一些新进展，在本书中也有所论述。

下册主要介绍交流磁化理论和磁共振理论。在交流磁化部分，主要阐述铁磁物质在交变电磁场中的性质、磁化机制和理论分析方法。在磁共振部分，对以磁矩一致进动为基础的铁磁共振理论、磁矩非一致进动为基础的自旋波激发和共振理论、以及亚铁磁共振和反铁磁共振理论均有详细讨论。最后阐述了在雷达技术中广泛应用的主要器件的工作原理。

书中均采用国际通用的米、千克、秒、安培(SI)单位制。为了便于对比，有些公式还列出了在C. G. S. 电磁单位制中的表示式。书末还附有两种单位制中一些磁学量的数值关系表、磁学公式对照表和常用的物理常数表，以便查对。

本书上册由戴道生、钱昆明执笔，中册由钟文定执笔，下册由廖绍彬执笔。全书经郭贻诚教授审阅，并提出了许多宝贵意见，特此致谢。

《铁磁学》上册分工如下：第四、六章由钱昆明执笔，并经章立源同志读了手稿；其余四章由戴道生执笔，并经李伯芷、方瑞宜读了手稿；钟文定同志允许采用其编写的铁磁性和反铁磁性唯象理论讲义的部分内容；此外，有关的同志对本书的内容提出了许多宝贵的意见，在此一并表示感谢。此外，我们还感谢天津磁性材料总厂对本书第二次印刷的大力支持。

著者

---

\* 从前，技术磁化理论只有磁畴理论；现在，却有另一分支，称为微磁学(Micro-magnetics)。后者在原则上比前者进了一步，但许多实际问题仍无法处理，因此，就目前情况而言，它们是相互补充的。

# 目 录

绪论	1
第一章 物质的抗磁性和顺磁性	7
§1.1 原子的壳层结构及其磁性	7
1.1.1 原子的壳层结构	7
1.1.2 原子磁性及其磁矩的大小	18
1.1.3 洪德法则	24
§1.2 物质的抗磁性	27
1.2.1 抗磁性的基本实验事实	27
1.2.2 正常抗磁性的理论解释	31
1.2.3 金属中电子的抗磁性	36
1.2.4 反常抗磁性简单介绍	41
§1.3 物质的顺磁性	44
1.3.1 顺磁性的实验规律和数据	44
1.3.2 顺磁性朗之万理论	48
1.3.3 顺磁盐中金属离子的磁性	52
1.3.4 金属中电子的顺磁性	55
§1.4 顺磁性量子理论	60
1.4.1 哈密顿量	61
1.4.2 顺磁磁化率	63
1.4.3 与温度有关的顺磁磁化率	64
1.4.4 讨论三个具体情况下式(1.82)的结果	67
§1.5 晶场作用和轨道角动量冻结	70
1.5.1 轨道角动量冻结的物理图象	70
1.5.2 晶体对称性和晶场类型	74
1.5.3 晶场作用下 3d 电子能级分裂	84
1.5.4 轨道角动量冻结	95
习 题	102



<b>第二章 自发磁化的唯象理论</b> .....	103
§2.1 铁磁性的基本特点和基本现象.....	103
2.1.1 铁磁物质的基本特点 .....	103
2.1.2 铁磁物质中的基本现象 .....	111
§2.2 铁磁性自发磁化的唯象理论.....	120
2.2.1 铁磁性的“分子场”理论 .....	121
2.2.2 “分子场”的本质, 高、低温下自发磁化强度与温度的 关系 .....	128
2.2.3 转变温度附近的比热反常现象 .....	133
§2.3 “分子场”理论的改进和发展.....	136
2.3.1 海森伯模型和外斯分子场 .....	136
2.3.2 小口理论 .....	138
§2.4 反铁磁性“分子场”理论.....	144
2.4.1 反铁磁性的定域分子场理论 .....	147
2.4.2 反铁磁性消失的温度-奈耳温度 $T_N$ 的求得 .....	149
2.4.3 温度高于奈耳温度时的性能 .....	15 <sup>0</sup>
2.4.4 温度低于奈耳温度时的性能 .....	152
2.4.5 定域分子场理论与实验的比较 .....	159
§2.5 亚铁磁性唯象理论.....	165
2.5.1 亚铁磁性的特点 .....	166
2.5.2 奈耳亚铁磁性分子场理论 .....	169
2.5.3 三角形亚铁磁性磁结构 .....	182
§2.6 磁结构的多样性.....	183
2.6.1 磁结构的几种类型 .....	183
2.6.2 非晶态稀土合金的非共线磁结构 .....	185
习 题.....	188
<b>第三章 自发磁化的交换作用理论</b> .....	190
§3.1 交换作用的物理图象.....	191
3.1.1 氢分子交换模型 .....	191
3.1.2 基态能量和电子自旋取向关系 .....	196
§3.2 海森伯交换模型.....	198
3.2.1 氢分子交换模型的推广 .....	199

3.2.2	狄喇克矢量模型方法	201
3.2.3	讨论 $A > 0$ 的条件	203
3.2.4	自发磁化与温度的关系	204
§3.3	间接交换作用	208
3.3.1	间接交换作用物理图象	208
3.3.2	半定量分析	211
3.3.3	间接交换作用理论简介	215
3.3.4	交换作用的半经验规则	224
3.3.5	亚铁磁性物质的间接交换作用	230
§3.4	稀土金属自发磁化理论	235
3.4.1	RKKY 理论的物理图象	236
3.4.2	RKKY 理论简介	236
3.4.3	稀土金属自发磁化的多样性	241
习 题		246
<b>第四章</b>	<b>自旋波理论</b>	<b>248</b>
§4.1	自旋波的物理图象	249
§4.2	自旋波的半经典理论	253
§4.3	自旋波的量子力学处理	257
4.3.1	基态	258
4.3.2	局域在一个格点上的自旋翻转态	259
4.3.3	第一激发态的本征解	260
4.3.4	几个简单的特例	262
4.3.5	近独立近似下的自旋波总能量	263
4.3.6	近饱和近似下自旋波的玻色性	264
§4.4	铁磁体在低温下的热力学性质	264
4.4.1	自发磁化强度的 $T^{3/2}$ 定律	265
4.4.2	铁磁体在低温下的比热	268
4.4.3	对长波近似的修正	269
§4.5	H-P 自旋波理论与自旋波相互作用	270
4.5.1	自旋偏差算符	270
4.5.2	自旋偏差算符表象中的哈密顿量	272
4.5.3	自旋波算符表象中的哈密顿量	273

4.5.4	自旋偏差算符的玻色性 .....	276
4.5.5	自旋波的相互作用 .....	277
§4.6	反铁磁体和亚铁磁体中的自旋波 .....	281
§4.7	磁偶极作用下的自旋波色散谱 .....	290
§4.8	体非均匀体系中的自旋波 .....	299
§4.9	自旋波的实验研究 .....	304
4.9.1	用共振方法研究自旋波 .....	305
4.9.2	散射方法测量自旋波 .....	309
习 题	.....	317
<b>第五章</b>	<b>金属磁性的能带模型理论</b> .....	<b>320</b>
§5.1	能带模型的物理图象 .....	323
5.1.1	过渡金属 $3d, 4s$ 电子能带结构 .....	323
5.1.2	能带理论对铁磁性自发磁化的解释 .....	325
5.1.3	$Fe, Co, Ni$ 能带的具体计算结果 .....	327
§5.2	斯托纳能带模型 .....	330
5.2.1	磁性和非磁性的条件 .....	332
5.2.2	自发磁化与温度的关系 .....	341
5.2.3	赫巴德模型 .....	344
5.2.4	电子交换-关联势 $\chi_0$ .....	345
5.2.5	$d_i-d_j$ 交换极化模型 .....	346
§5.3	过渡金属合金的磁性 .....	350
5.3.1	合金中基质元素能带的变化 .....	351
5.3.2	基质元素中费密能级 .....	354
5.3.3	杂质原子对正、负带的影响 .....	355
<b>第六章</b>	<b>格林函数方法</b> .....	<b>358</b>
§6.1	预备知识 .....	359
6.1.1	系综 .....	359
6.1.2	正则系综 .....	361
6.1.3	狄喇克 $\delta$ 函数 .....	361
6.1.4	阶跃函数 $\theta(x)$ .....	364
6.1.5	三种绘景 .....	365
§6.2	格林函数与关联函数 .....	367

6.2.1	问题的提出	367
6.2.2	格林函数	368
6.2.3	关联函数	369
6.2.4	傅里叶变换	370
6.2.5	谱定理和色散关系	372
6.2.6	格林函数的运动方程	373
§6.3	$S = \frac{1}{2}$ 铁磁体系的磁化强度	373
6.3.1	运动方程	373
6.3.2	时间傅里叶变换	375
6.3.3	空间傅里叶变换	376
6.3.4	计算关联函数	378
6.3.5	自发磁化强度	379
§6.4	不同温度范围的磁特性	380
6.4.1	实验规律	380
6.4.2	低温下的自发磁化	380
6.4.3	相变点附近的自发磁化	381
6.4.4	顺磁相的磁化率	384
6.4.5	任意自旋的铁磁体系	387
<b>参 考 文 献</b>		388
<b>索 引</b>		394

## 《铁磁学》中册目录

绪论

第七章 铁磁性的基本特点和基本现象

第八章 磁畴结构

第九章 磁性材料的磁化过程

第十章 磁性材料的反磁化过程

第十一章 永磁体磁路设计原理

## 《铁磁学》下册目录

绪论

第十二章 各向同性的铁磁物质在交变电磁作用下的电磁性质

第十三章 磁化强度的一致进动和铁磁共振

第十四章 磁化强度的非一致进动

第十五章 亚铁磁共振和反铁磁共振

第十六章 微波铁氧体器件原理

## 绪 论

磁性是物质的基本属性之一。

外磁场发生改变时,系统的能量也随之改变,这时就表现出系统的宏观磁性。从微观的角度来看,物质中带电粒子的运动形成了物质的元磁矩。当这些元磁矩取向为有序时,便形成了物质的磁性。

物质的磁性根据其不同的特点,可以分为弱磁性和强磁性两大类。

弱磁性仅在具有外磁场的情况下才能表现出来,并随磁场增大而增强。按照磁化方向与磁场的异同,弱磁性又分为抗磁性和顺磁性。前者起因于电磁感应,后者则由于元磁矩在外磁场下的取向。

强磁性主要表现为在无外加磁场时仍存在自发磁化。为使体系能量减小,有限的物质通常被分成若干小的区域,不同区域的自发磁化方向则不相同。在无外加磁场的情况下,系统总的磁矩趋向于相互抵消。这些小的区域称为畴。在外磁场下,由于畴的移动或者畴内自发磁化方向的改变而通常表现出很强的磁性。

强磁性的另一个重要特点是存在一个临界温度,即居里点  $T_c$ 。在  $T_c$  以上,由于热运动较强,致使自发磁化消失。因此,居里温度是衡量引起自发磁化的微观作用大小的量度。

由于自发磁化方式的不同,又可分为铁磁性,反铁磁性、亚铁磁性和螺磁性等。除反铁磁性外,这些磁性通常又广义地称为铁磁性。

铁磁学就是研究强磁性物质中自发磁化的成因及在不同外加条件下各种物质的微观磁性和宏观磁性的变化规律。这些问题的

研究不仅有重要的理论意义，而且对于材料的改进和应用也是不可缺少的。

早在公元前四世纪，人们就发现了天然的磁石（磁铁矿  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ），我国古代人民最早用磁石和钢针制成了指南针，并将它用于军事和航海。但作为近代物质磁性研究的先驱者，当推居里（Curie, 1894）<sup>[1]</sup>的工作，他不仅发现了居里点，还确立了顺磁磁化率与温度成反比的实验规律（居里定律）。

二十世纪初，朗之万（Langevin, 1905）<sup>[2]</sup>将经典统计力学应用到具有一定大小的原子磁矩系统上，推导出了居里定律。接着，外斯（Weiss, 1907）<sup>[3]</sup>假设了铁磁性物质中存在分子场，这种分子场趋使原子磁矩有序排列，形成自发磁化，从而推导出铁磁性物质满足的居里-外斯定律。朗之万和外斯的理论出色地从唯象的角度说明了铁磁性和顺磁性。

然而，上述理论也存在两个根本性的困难。首先，原子具有一定大小磁矩的假设，这是经典物理所无法解释的。由于磁场只能改变电子的运动方向，而不能改变运动的能量，但经典统计物理指出，粒子是按能量呈指数分布的，因而在热平衡时根本不应当显示出磁性。其次，经典理论也不能说明分子场的起因。按照居里点计算的分子场要比磁偶极相互作用大三个数量级。这些困难只有在量子力学建立以后才可能得到解决。

根据量子力学可知，电子具有量子化的轨道运动和自旋运动，那些未成对的核外电子形成了原子的固有磁矩。在原子相互结合时，由于外层的  $s$ ,  $p$  电子总是趋向于成对的，因此主宰物质磁性的主要是处于原子内层的未满  $d$  壳层或  $f$  壳层电子。这就是为什么铁磁性物质总是与过渡族和稀土族离子联系在一起的原因。

海脱勒（Heitler）和伦敦（London 1927）<sup>[4]</sup>在用量子力学研究氮原子和氢分子的结合能时发现，当电子波函数交叠时，由于泡利不相容原理和电子交换不变性，会出现一项新的静电作用项，这一能量附加项导致了电子自旋在相对取向不同时能量会有所差别。正是这种差别，导致了电子自旋取向的有序。这一附加能量被称为

交换作用能.

弗兰克尔(Фленкель, 1929)<sup>[5]</sup>和海森伯(Heisenberg, 1928)<sup>[6]</sup>先后以交换能作为出发点,建立了局域电子自发磁化的理论模型.这一模型通常又称为海森伯交换作用模型.若用 $\mathbf{S}_i$ 和 $\mathbf{S}_j$ 表示第 $i$ 和第 $j$ 个格点原子的自旋算符,则交换作用哈密顿可以写成

$$\mathcal{H} = - \sum_{ij} A_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j.$$

当交换积分 $A$ 为正时,自旋趋于相互平行而呈现铁磁性;当 $A$ 为负时,自旋趋于反平行而呈现反铁磁或亚铁磁性;如果 $A$ 的符号和大小是变化的,还可得到螺磁性和其它自旋结构.交换作用模型唯象地解释了自发磁化的成因,对铁磁理论的发展起了决定性的作用.

在交换作用模型看来,所谓分子场不过是各原子中电子自旋相互作用的平均效果,因此分子场实质上是交换作用哈密顿取了一级近似.也正由于分子场理论忽略了交换作用的细节,因此在讨论低温和临界点附近的磁行为时便出现了较大的偏差.一个很自然的想法是取更高级的近似,即稍微多考虑一下最近邻自旋的作用,这就是小口(Oguchi, 1958)<sup>[7]</sup>方法和BPW(Beche-Peierls-Weiss, 1948)<sup>[8]</sup>方法的基本思想.由于计入了近程作用,在临界点附近的相变行为给出了更好的结果;在另一方面,若把自旋结构看成是整体激发,即考虑到交换作用的远程效果,则又可对接近0K的磁行为给出正确的解释,这就是由布洛赫(Bloch; 1931)<sup>[9]</sup>开创的自旋波理论.为了更好地描述整个温度范围的磁行为,以海森伯交换作用哈密顿出发,利用量子场论技术,即格林函数的方法也得到了很好的结果.

交换积分 $A$ 仅当电子波函数有所交叠时才不为零,因此这是一种近距作用.为了解释下述各种物质的磁性,在海森伯交换作用模型的基础上,人们进一步地做了如下工作:

1. 在绝缘磁性化合物(通常称为铁氧体)中,磁性离子为非磁



性的阴离子所分开,并且几乎不存在自由电子,磁性壳层之间不存在直接的交叠. 克喇末 (Kramers, 1934)<sup>[10]</sup> 提出了超交换模型来解释这些物质的磁性;此后,安德森 (Anderson, 1950)<sup>[11]</sup> 等人对理论又作了改进. 这一理论认为,磁性离子的磁性壳层通过交换作用引起非磁性离子的极化,这种极化又通过交换作用影响到另一个磁性离子,从而使两个并不相邻的磁性离子,通过中间非磁性离子的极化而相互关联起来,于是便产生了磁有序.

2. 稀土金属和合金的磁性壳层中的  $4f$  电子深埋在原子内层,波函数是相当局域的,相邻的磁性壳层也几乎不存在交叠. 这种情况下的磁关联则是通过传导电子为媒介而产生的,这种间接交换作用称为 RKKY (Ruderman, Kittel, 1954; Kasuya, 1956; Yosida, 1957)<sup>[12]</sup> 作用. 计算表明,在 RKKY 作用中交换积分  $A$  的符号和大小随位置而异,从而解释了稀土金属中磁性的多样性. RKKY 作用在研究稀释合金的磁性时,也获得了相当的成功.

在上述两类物质中,无论是定性还是定量上,采用局域电子模型均得到了满意的结果. 然而,在对 Fe, Ni, Co 这些过渡金属进行定量计算时却出现了新的困难. 实验表明,在低温下,上述金属的磁矩不是玻尔磁子的整数倍,并且电子的比热又比一般金属的要大得多等,这些事实表明,承担磁性的  $d$  电子并非是完全局域的. 六十年代对  $d$  电子费米面的观察更证明了这一点.

几乎在局域电子模型发展的同时,另一个重要的学派,即巡游电子模型也发展起来了. 这两个学派从完全不同的角度出发来研究铁磁性. 前者把实空间 (坐标空间) 中的局域电子态作为出发点,而后者则把倒格子空间 (动量空间) 中的局域电子态作为出发点. 这两个理论在解释实验事实时是相互补充的.

巡游电子模型认为,  $d$  电子既不象  $f$  电子那样局域,也不象  $s$  电子那样自由,而是在各个原子的  $d$  轨道上依次巡游,形成了窄能带. 因此,需采用能带理论方法进行处理.

布洛赫 (1929)<sup>[13]</sup> 采用哈特里 (Hartree)-福克 (Fock) 近似方法讨论了电子气的铁磁性. 继之,维格纳 (Wigner, 1934)<sup>[14]</sup> 指出