

## 电子自旋假说的提出及其历史经验

傅海辉<sup>†</sup>

(华东师范大学哲学系 上海 200062)

**摘要** 电子自旋是原子物理学和量子力学的重要概念,电子自旋假说的产生在物理学史上具有一定的特殊性.该文系统论述了电子自旋假说提出与被物理学界接受的历史,并从荷兰莱顿理论物理研究的学术环境、乌仑贝克和哥德斯密“理论型”与“实验型”的互补、艾仑费斯特的教育艺术等方面分析了其历史经验.

**关键词** 电子自旋假说,学术环境,互补,教育艺术

## HISTORY OF THE EMERGENCE OF THE ELECTRON SPIN HYPOTHESIS

FU Hai-Hui<sup>†</sup>

(Department of Philosophy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract** Electron spin is an important concept in atomic physics and quantum mechanics. The emergence and acceptance of the hypothesis of electron spin has a special place in history, and is reviewed here from three aspects.

**Key words** hypothesis of electron spin, history, experience

电子自旋是原子物理学和量子力学中十分重要的概念.在这看似直观简明、顺理成章的假说的提出与被接受的过程中,从名不见经传的在校学生到物理学权威皆卷入其间,不同观点针锋相对,这在物理学史上有一定的特殊性.电子自旋假说的提出稍早于矩阵力学和波动力学的产生,它们之间没有直接的逻辑联系,因此似乎不是物理学史家关注的焦点.故有必要对这段历史及其经验作一分析.

## 1 电子自旋假说提出与被接受的历史

电子自旋假说正式提出是在1925年.虽然此前已有人提出过类似概念,但没有引起人们的关注.原因可能是理论上提出此概念还不是非常迫切,认为经典旋转概念似乎不适用于“点粒子”.

到20世纪20年代情况起了变化.旧量子论对反常塞曼效应、X射线和碱金属双重谱线等复杂光谱现象无能为力.兰德(Alfred Lande)为解释反常塞曼效应,提出了弱磁场中原子能级分裂的公式和兰德因子的概念.1923年,兰德又提出了 $R$ 、 $L$ 、 $J$ 矢量模型,其中 $R$ 、 $L$ 和 $J$ 分别表示原子实(atomic core)的角动量、总轨道角动量和它们所合成的总角动量.在这一模型中,反常塞曼效应的谱项拥有一附加磁

场能量,原子则拥有一个附加角动量.兰德、海森伯等人认为,这一附加角动量应归之于原子实.其他物理学家如索末菲(Arnold J. W. Sommerfeld)、玻尔、罗素(Henry Norris Russell)、桑德斯(Fredrich Albert Saunders)等也作了多方面的探讨.

泡利从1922年开始研究反常塞曼效应,但一直没有得到满意结果.1924年底,泡利发现原子的角动量只能来源于外层电子,否则塞曼效应分叉的宽度就将依赖于原子序数,而这与事实不符.泡利还提出了4个量子数的思想,并致力于4个量子数与壳层电子排列关系问题的研究.他还发现,其中1个磁量子数只能取 $+1/2$ 和 $-1/2$ 两个值.他不知道该量子数的来源,于是将其归于“电子的量子理论特性中的一种特殊的、经典理论无法描述的二值性”,坚信它根本无法在经典理论中得到解释<sup>[1]</sup>.1925年3月泡利又正式提出了不相容原理.

## 1.1 克罗尼格的电子自旋假说

1925年1月,德国物理学家R.克罗尼格(Ralph De Laer Kronig)在图宾根访问,兰德向他出示了泡利的一封信,信中表达了泡利的不相容原理和4个量

\* 2001-07-09收到初稿,2001-10-18修回

† 通讯联系人.E-mail: fllfnsnk@fm365.com

子数的思想.这激起了克罗尼格的好奇心.由于第四个量子数不能归之于原子实,并且“在量子力学产生以前,在人们赖以讨论的惟一基础模型的语言中,它只能被刻画为电子绕其轴旋转.”因此他“立刻想到,它可以被认为是电子的内禀角动量<sup>[2]</sup>.当天下午克罗尼格就导出了“相对论性线性公式”,并由此得到了双重谱线分裂的 $Z^4$ 比值.这一结果完全符合实验数据,也与兰德半经验的“相对论分裂法则”相一致,而这并没有借助于相对论.为了不与索末菲已经作出完整解释的类氢光谱的精细结构的实验事实相矛盾,克罗尼格把电子轨道在其平面上的相对论性进动和电子在轨道方向上的内禀磁矩的作用相互补偿,使各能级有不同的轨道角动量而有相同的总角动量.但由于反常旋磁因子为2,因此双重线分裂的计算结果总是比实验值大一倍.

1925年1月8日,克罗尼格会见了泡利并告之其想法,却遭到了泡利的明确反对.此后克罗尼格又前往哥本哈根等地与海森伯、克拉摩斯等人讨论,均未得到积极反响,故未公开发表这一假说.甚至在乌伦贝克和哥德斯密提出这一假说后,他还一度持反对态度.在刊登于1926年4月Nature杂志的信中,克罗尼格指出,电子自旋假说存在一些问题,如自旋的旋转速度超过了光速,高速运动时玻尔磁子这一基本单位何以成为电子内禀运动的特征,以及用这一概念难以处理塞曼效应等,并下结论说:“因此,这个假说似乎不是把幽灵从家中驱赶出去,而只是把它从地下室赶到下一层的地下室去<sup>[3]</sup>”.

## 1.2 乌伦贝克和哥德斯密的电子自旋假说

1925年夏天,在莱顿大学,艾伦费斯特(Paul Ehrenfest)安排他的两个学生G. E. 乌伦贝克(George Eugene Uhlenbeck)和S. A. 哥德斯密(Samuel Abraham Goudsmit)在一起作互教互帮式的学习.当时乌伦贝克对经典理论有较深研究,而对原子物理学所知甚少,哥德斯密已是原子光谱学专家,但对物理学的其他分支缺乏了解.哥德斯密向乌伦贝克讲解了兰德、海森伯、泡利等人在原子光谱学方面的工作.乌伦贝克很快学会了这些知识,并向哥德斯密提出了许多他本未想到的问题.这使哥德斯密深入思索原子光谱学中一些根本性困难,不再满足于技术层面的进展.很快,他们注意到了泡利的理论.哥德斯密解释以后,乌伦贝克仍无法理解,因为泡利理论在形式上与玻尔的旧原子模型没有任何定性或定量的联系.后来他突然想到,自己曾学过,每一个量子数都对应一个自由度,于是转机开始出现.而此时哥德斯密尚不知“自由度”为何物.1925年9月底,乌伦贝克明确提议,把电子的第4个量子数和电子运动的自由

度联系起来.既然每个量子数都对应电子的一个自由度,那么第4个量子数必定意味着电子还应有一个附加的自由度,也就是说,电子在作旋转.哥德斯密懂得了自由度的概念后,便非常赞成这一想法.他认识到,这样就可解释这个量子数何以总是 $1/2$ 和 $-1/2$ ,甚至电子如有一个玻尔磁子的磁矩,就可解释反常塞曼效应.当然,这个概念是否会导致一系列困难?为什么这个泡利理论并非十分隐晦的结果,泡利和其他人从未提出过(两人不知道克罗尼格的工作)?这些都使他们很不放心.

一次哥德斯密问,带电粒子的旋磁比是否不依赖于该粒子的线度?乌伦贝克去请教艾伦费斯特.艾伦费斯特提醒乌伦贝克注意M. 亚伯拉罕(Max Abraham)发表于1902年《物理学年鉴》第4卷关于广延电子磁特性的一篇论文“电子动力学原理”.乌伦贝克仔细研究该论文发现,如果电子只拥有表面电荷,则其旋磁比必然对应于因子为2的情况,这与光谱学数据所要求的完全符合.由此艾伦费斯特认为电子自旋概念要么非常重要,要么毫无意义,但应该发表.艾伦费斯特建议他们给《自然科学》杂志投稿,并请教洛伦兹.洛伦兹的答复是,若电子半径按经典半径计算,并以 $(h/2\pi)$ 的一半的角动量自转,则其表面速度将十倍于光速;若电子磁矩为一个玻尔磁子的磁矩,则为保持其质量不变,其半径至少应为电子静止时的十倍或超过原子的半径.

但稿件还是寄出了,并于1925年11月发表于《自然科学》第13卷,题目为“用每个单独电子内部行为的假设代替非力学约束的假说”.文章首先指出,兰德矢量模型澄清了对复杂光谱现象的各种混乱解释,但将此模型用于原子的电子结构时却遇到了困难,如无法说明外磁场何以不对碱金属的原子实起作用等.泡利的4个量子数理论能够避免这些困难,却不得不采取所谓的“非力学的二重性”的说法,且难以解释X射线相对论性双重谱线和碱金属光谱双线结构.于是文章提出,应重新解释4个量子数.“泡利的量子数不再局限于他原来的模型描述.分配给单独电子的4个量子数失去了他们的原始意义.显而易见,具有4个量子数的电子同时也具有4个自由度.这样,我们可以给予这些量子数如下的意义: $n$ 和 $k$ 与以前相同,仍为轨道电子的主量子数和方向量子数, $R$ 则被用来描述电子本身的转动.剩下的量子数保留它们原来的意义.通过这个解释,泡利和兰德两个模型所有的成功之处在形式上就互相融合在一起了.”由于进一步的推算强烈地依赖于电子模型的选择,因此模型应当满足以下两点,即电子自转的磁矩与角动量之比必须是轨道运动的磁矩与角

动量之比的两倍； $R$  对电子轨道平面的不同方向必须提供一个关于相对论性双重谱线的解释<sup>[4]</sup>。

1925 年 12 月，众多物理学家云集莱顿大学庆祝洛仑兹获得博士学位 50 周年，电子自旋成为人们议论的中心话题。爱因斯坦一见到玻尔就问，关于旋转电子他相信些什么事情。玻尔问自旋轴线和轨道运动之间的必然相互耦合的原因时，爱因斯坦回答，这种耦合是相对论的直接推论。爱因斯坦的话使玻尔完全相信了电子自旋假说。在回哥本哈根途中，玻尔力劝海森伯、泡利等人接受自旋概念。海森伯半信半疑，泡利则由于反对用经典力学概念来处理原子问题而坚决拒绝。

爱因斯坦、玻尔的肯定鼓舞了乌、哥二人。1926 年 2 月，他们又在 *Zeitschrift für Physik* 第 35 卷第 618 页发表了题为“原子中量子矢量的耦合”的论文，进一步用该概念解释复杂光谱。他们发展了一个原子矢量模型，其中，除了角动量矢量  $K$  以外，他们赋予每个沿轨道运行的电子另一个大小为  $1/2(h/2\pi)$  的矢量  $R$ 。虽然，在论文正文中没有明确提电子自旋概念，但在附录中指出，矢量  $R$  应被理解为电子的内禀角动量。这种矢量方法能够处理原子中各种矢量的所有可能的耦合。

他们还发现，氢的巴尔末线系的精细结构可由上述矢量方法得出。1925 年 12 月，乌伦贝克和哥德斯密给 *Nature* 杂志写了一封信。12 月 24 日，艾伦费斯特致信玻尔，请玻尔审阅这封信，并请玻尔允许尽快地将哥德斯密派往哥本哈根。但玻尔对该信的表达方式不甚满意。经过一番磋商，乌、哥两人修改了此信，玻尔在信后附了一篇评论。1926 年 2 月 20 日出版的 *Nature* 第 117 卷发表了此信及其评论。该信系首次用英语提出电子自旋概念。

信中首先考虑了自旋对和电子绕核运动相对应的定态总集的影响。电子有磁矩，故受力偶作用使自旋轴缓慢旋进。为保证原子角动量守恒，电子轨道平面将作补偿性旋进。由于有了自旋，运动变得复杂，因此对应于电子无自旋的“假想原子”的每一定态，真实原子将存在一组态，这些态的差别仅在于自旋轴相对轨道平面的取向互不相同。这些态的能量差正比于核电荷的 4 次方，并依赖于那些定义无自旋电子的运动态的量子数。这暗示能够对索末菲关于类氢光谱精细结构的解释作出重大修正，这种解释认为精细结构的某些成分线是对应于价电子角动量保持不变的跃迁。这种跃迁与对应原理不符。引进电子自旋不但完全再现了索末菲的理论，而且符合对应原理。作者认为，这种修正对解释 X 射线谱的结构特别重要。X 射线的“屏蔽”双重线出现的起因不

是过去认为的各电子在原子内的相互作用，而是自旋轴相对于轨道平面的取向不同。因此“屏蔽”双重线应称为“自旋”双重线。光学光谱的多重线结构和 X 射线谱的结构之间具有显著的类似性，过去将它归于相对论效应，事实上用自旋概念就可简明地予以解释。电子自旋不但能够说明简单的碱金属光谱，而且能够说明多重谱线，从而保持原子的逐步组建原理。“最重要的是，有可能说明泡利得到的那些重要结果，而不必假设电子束缚中的非力学的‘二重性’。”作者还定性地解释了反常塞曼效应，因为如果场很强，场对自旋轴的旋进的影响将会变得不可忽略。

至于因子 2 问题，“最后的解决要求更好地研究量子力学”或研究“关于电子结构问题”。

玻尔在评论中认为，该信的观点是他原来理论的补充。玻尔过去就提出，原子的量子理论在解决光谱的精细结构和其相关问题中遇到的严重困难与用力学模型表示原子定态的有限可能性有内在联系。“然而，通过旋转电子概念的引入，我们希望能够借助于力学模型来更广泛地、至少是按照作为对应原理的应用特征的定性方式来更广泛地说明各元素的性质”，因而为海森伯刚刚建立的“新量子力学”对原子问题进行定量处理带来新的光明前景<sup>[5]</sup>。

### 1.3 因子 2 的解决与电子自旋假说的被接受

然而因子 2 的解决出乎他们的预料。美国物理学家 L. H. 托马斯(Llewellyn Hilleth Thomas)于 1925 年秋在哥本哈根得知这一情况后，用相对论进行了计算，其结果以信的方式发表于 *Nature* 1926 年 4 月第 117 卷上。信中指出，原来关于因子 2 的计算是错误的，即在把核静止而电子运动的坐标系转换为电子静止而核运动的坐标系时，没有考虑到由于电子加速而产生的磁场，因而自旋轴的进动角速度应作相应的修正，从而其进动率应为原来计算的一半<sup>[6]</sup>。

托马斯的信寄出之前曾给玻尔看过。玻尔于 1926 年 2 月 20 日分别致信海森伯和泡利通知了这个进展。海森伯考虑后承认了托马斯的理论。泡利则认为托马斯的计算是错误的。经过和玻尔几个星期的争论，泡利也终于表示信服。电子自旋概念已为物理学界所接受。

1927 年，泡利把电子自旋概念纳入了矩阵力学体系。1928 年，狄拉克(Paul A. M. Dirac)建立了量子力学的相对论性波动方程，可以自然地说明电子的半整数的自旋角动量，并得出了反常旋磁因子为 2。如要与实验更好地符合，则要依靠量子电动力学。1940 年，泡利证明，自旋是出于量子场论的需要。自

旋遂摆脱了经典力学的特征,成为量子力学中名正言顺、不可或缺的重要概念。

旧量子论无法解释电子的性质和真正描述原子的特性,所以不能解释非周期体系,无法圆满地解释反常塞曼效应等复杂光谱现象。而不相容原理以及电子自旋概念则打开了局面。用电子自旋立即成功地解释了 X 射线和碱金属双重谱线。1926 年 3 月,海森伯和约当将电子自旋概念用于矩阵力学,圆满地解释了反常塞曼效应。同时,电子自旋概念和不相容原理导致了费米-狄拉克统计概念的产生。电子自旋还促使人们寻求其他粒子的自旋。现在,自旋与质量、电荷等一样,是所有不同层次粒子的基本参量之一。电子自旋是人们发现的第一种除时空自由度以外的新一类自由度,此后同位旋等非时空自由度也陆续被发现。当然这一概念仍然存在令人困惑之处,自旋的本质究竟应作何解释至今没有答案。

## 2 历史经验的分析

### 2.1 环境

1925 年前后,在荷兰存在着分别以艾伦费斯特、塞曼等人为核心的原子物理学“微型共同体”或“无形学院”,它们与哥本哈根的主流学派有着一定的距离。

莱顿大学艾伦费斯特的理论物理研究所是当时理论物理研究的一个重要基地。玻尔的原子结构理论诞生不久,艾伦费斯特就对之倾注了很大热情。不过哥本哈根更多地把原理应用于光谱学细节的描述,艾伦费斯特的兴趣则是在基本原理层面上。但是两地物理学家之间有较为密切的信息交流。例如克拉摩斯,他原是莱顿研究所的成员,后到哥本哈根成为玻尔的助手,但他仍常常访问莱顿。

艾伦费斯特对当时原子理论的主流保持了一定的超脱。由于原子光谱学不是他兴趣之所在,加之通过与爱因斯坦的讨论,了解了原子理论的内在困难,而对此一直无人有任何线索,因此艾伦费斯特没有盲从专家的思路,而是扮演了一个批评性的观察者的角色。另外,当时的荷兰有一些实验光谱学的研究中心,如阿姆斯特丹的塞曼研究所、乌德勒支的奥任斯廷研究所以及尹德赫文的菲利普研究实验室等。它们都离莱顿不远,使莱顿的物理学家们很容易得到原子光谱学的实验资料。这有利于艾伦费斯特思索和审查哥本哈根原子光谱学的理论<sup>[7]</sup>。这正是电子自旋概念产生于莱顿这一原子理论研究“外围”的

重要原因。事实上,克罗尼格也是访问了欧洲的各个地方才提出了这一假说的。

### 2.2 互补

即使在一个科学共同体内部,其成员也不是“全同”的。乌伦贝克和哥德斯密就有不同的特点。

乌伦贝克读书期间坚持学了不少课程,如数学、天文学、晶体结构、物理化学以及麦克斯韦理论和统计力学(包括部分量子论)的高级课程等。他还听洛伦兹的星期一讲座,参加艾伦费斯特星期三晚上的学术讨论会,尤其是他自学了不少名著,如洛伦兹的《自然科学引论》,其中包括两卷本的物理学基础教程,谢弗尔(Clemens Schaefer)的《麦克斯韦电磁学理论导论》,玻尔兹曼的《气体理论课程》,吉布斯的《统计力学》,基尔霍夫的《理论物理学教程》,甚至牛顿的《自然哲学的数学原理》等,因而具备了坚实的理论物理学的功底。哥德斯密则不同。哥德斯密 11 岁就喜爱物理,18 岁就发表了关于碱双重谱线方面的论文。因此艾伦费斯特派他到阿姆斯特丹作塞曼的半时助手。他还到图宾根对帕邢的研究所进行了较长时间的访问。很快他就成了有经验的光谱学专家。

二人的知识结构不同,思维风格也大相径庭。乌伦贝克遇到问题时,习惯于从理论层面上加以考虑。他曾回忆自己是怎样钻研一些“困难重重”的书的。例如学吉布斯的《统计力学》,开始无论如何也弄不明白;后来,当我看懂了著名的《大百科全书》上关于 P. 艾伦费斯特和 T. 艾伦费斯特的条目时,我才得到了启示。我突然明白了什么是基本问题,什么是统计力学奠基者们已经取得的成就。在这个领域里,还存在着一系列未解决的问题,它们也就是所谓的研究“前沿”<sup>[8]</sup>。就连他的实验报告也具有浓厚的理论色彩,给老师留下了深刻的印象。而哥德斯密优于直觉,长于实验技巧和技术分析,有时容易忽略或不太善于作深入的理论追究。乌伦贝克曾说:“萨姆(即哥德斯密)从来不是明显的沉思型的人,但他有一种天才,能够从一大堆紊乱的数据中找到方向”<sup>[9]</sup>。哥德斯密又有些任性,若不感兴趣,即使是物理学的某些课程也不会去用心,甚至试图推迟考试。艾伦费斯特曾当着爱因斯坦的面说:“你的麻烦在于我不知道问你什么,你知道的全是光谱线。我能问你麦克斯韦方程以及关于它的事情吗?”<sup>[10]</sup>因此哥德斯密虽然获得了博士学位,但却没有通过力学考试。哥德斯密后来回忆他的光谱学研究:“我从来没有感到过困难,从来没有。我总觉得这些是经验规则,总有一些人能

够解释,……我的主要兴趣的确是经验法则的技术方面.我也用经验法则来表示量子数,甚至在泡利原理提出的那年,泡利原理对我而言只不过是像选择定则那样的经验法则,只是怎样安排量子数而已<sup>[11]</sup>.当哥德斯密向乌伦贝克讲解兰德因子时,后者竟然问兰德是谁;而当乌伦贝克提出电子的4个自由度时,哥德斯密也同样问什么是自由度.在某种程度上,乌伦贝克与哥德斯密分别体现了“学者(理论家)和工匠(实验家)的传统”.

一个人的知识结构和思维风格与他的专业和研究方向密切相关.“每一学科、专业和研究方向由于对象不同以及自身发展水平不同,因而需要科学家运用不同的思维方法或者说侧重地运用不同的思维方法”.所以,“科学家的思维风格有着对于一定专业方向的适应性,因而在很大程度上决定着他的研究方向,或者决定着他在哪个研究方向上取得成功<sup>[12]</sup>.但人既有所长,必有所短,且其短通常很难被自己意识到并加以克服.一个有效的办法就是“取长补短”,相互切磋砥砺.例如,乌、哥二人发现氢原子与其他原子相比显得相当特殊,于是研究作为强碱原子出现的氢原子的精细结构,很快就解决了这一问题.

## 2.3 教育

但是,他们两人能够合作,则应归功于艾伦费斯特.艾伦费斯特既是杰出的物理学家,又是高瞻远瞩、教育有方的教育家.他本人虽对光谱学兴趣不大,但鼓励哥德斯密从事原子光谱学研究,将两人组合在一起,确属物理学史和教育史上的神来之笔.同时,他对学生在治学上潜移默化的影响,也是他们在理论上有所创造的重要原因.

乌伦贝克认为艾伦费斯特属于真正伟大的教师之列.乌伦贝克曾获美国物理教师协会授予的第20届(1955年度)物理教学杰出贡献奖章.他发表的获奖演说的题目就是“回忆保尔·艾伦费斯特教授”.乌伦贝克盛赞了艾伦费斯特的教育艺术.

艾伦费斯特有明澈的讲课风格.他很少对某个问题给出严密的证明,而总是成功地给出该问题的全面的观点,使得什么已经解决,什么尚未解决清楚了.艾伦费斯特习惯说:“先坚持,再证明!”他擅长构想简单巧妙的模型来阐明某个理论的特点.艾伦费斯特认为,如果仅仅从假设逻辑地推导出结论,那么就不能真正地理解这个推导,就像是“用一条腿跳舞”.一个人应当探究问题的各方面的联系,使自己的理解成为一张网.他还认为,所有更深刻的概念都

不可避免地是模糊的,但是人必然要努力试图把事情弄清楚,必然要提出问题.艾伦费斯特喜欢提出问题,常以一系列的问题来结束一堂课或一篇论文.

艾伦费斯特每星期三晚上在自己家中组织学术讨论会,参加者中有部分优秀的学生,乌、哥二人即是其中的成员.谁一旦被允许参加,就必须得去.这是一个星期中最精彩的时候.讨论往往涉及物理学的最新进展,生动、令人振奋.学生听艾伦费斯特的谈话非常受教益,而当他自己成为发言者时就会感到“有点痛苦”.

艾伦费斯特注重培养学生的独立研究能力.他一般只与一个学生共同工作,并坚持一星期中每天下午不间断,共同探讨他目前正在进行的工作,或他希望详细了解的最近的文献.乌伦贝克“作证”说,“每天结束时他总是累得筋疲力尽”.

艾伦费斯特的目的是培养学生从事科学研究必须具备的自信心,他就是要让学生感到,自己的能力至少与老师是一样的.他常说:“为什么我有这么好的学生?正是因为我笨!”乌伦贝克甚至说,“艾伦费斯特的方法”是“我所知道的能使学生获得这种品质的惟一方法<sup>[13]</sup>”.值得一提的是,当乌伦贝克告诉艾伦费斯特有关洛仑兹的计算并认为艾伦费斯特的第二种估计是对的,即电子自旋假说确实是毫无意义,因而要求收回他们的稿件时,艾伦费斯特却说:“你们还很年轻,干点蠢事也没关系!”<sup>[14]</sup>对比克罗尼格,他们的确是幸运的.

西方一些科学家的教育艺术和经验是开阔我们教育改革思想的有益启示.

## 参 考 文 献

- [1] Pauli W. Zeitschrift für Physik, 1925, 31, 385. Reprinted in Kronig R and Weisskopf V. F. ed. Collected Scientific Papers by Wolfgang Pauli, Vol. 2. New York, London, Sydney: Interscience Publishers, a division of John Wiley & Sons, Inc, 1964. 213
- [2] Kronig R. The Turning Point. In: Fierz M, Weisskopf V F ed. Theoretical Physics in the Twentieth Century—A Memorial Volume to Wolfgang Pauli. New York: Interscience Publishers Inc. 1960. 20
- [3] Kronig R. Nature, 1926, 117, 550
- [4] Uhlenbeck G E, Goudsmit S A. Naturwissenschaften, 1925, 13: 954
- [5] Uhlenbeck G E, Goudsmit S A. Nature, 1926, 117, 264  
K. 斯陶耳岑堡编, 戈革译. 尼尔斯·玻尔文集(第五卷): 量子力学的出现. 北京: 科学出版社, 1991. 323  
Stolzenburg K ed. Niels Bohr Collected Works (Vol. 5). Ge G trans. The Emergence of Quantum Mechanics (Mainly 1924—1926). Beijing: Science Press, 1991. 323

[ 6 ] Thoms L.H. Nature , 1926 ,117 514  
 [ 7 ] Mehra J, Rechenberg H. The Historical Development of Quantum Theory. Vol. 1. New York Springer-Verlag Inc ,1982. 694  
 [ 8 ] Uhlenbeck G E. Physics Today , 1976( 6 ) #4 杨建邨等译. 物理学与物理学家. 武汉 :华中工学院出版社 ,1987. 215[ Yang J Y *et al.* trans. Physics and Physicists. Wuhan :Middle China Industrial College Press ,1987. 215 ]  
 [ 9 ] Pais A. Physics Today , 1989( 12 ) 37  
 [ 10 ] Mehra J, Rechenberg H. The Historical Development of Quantum Theory. Vol.1. New York Springer-Verlag Inc ,1982. 696

[ 11 ] Mehra J, Rechenberg H. The Historical Development of Quantum Theory. Vol.1. New York Springer-Verlag Inc ,1982. 698—699  
 [ 12 ] 周昌忠. 科学思维学. 上海 :上海人民出版社 ,1988. 143[ Zhou C Z. A Study of Science Thought. Shanghai :Shanghai People's Press ,1988. 143 ]  
 [ 13 ] Uhlenbeck G E. American Journal of Physics , 1956 24( 6 ) 431  
 [ 14 ] Uhlenbeck G E. Physics Today , 1976( 6 ) #7 杨建邨等译. 物理学与物理学家. 武汉 :华中工学院出版社 ,1987. 222[ Yang J Y *et al.* trans. Physics and Physicists. Wuhan :Middle China Industrial College Press ,1987. 222 ]

· 前沿和动态 ·

## 第一台永磁式室温磁制冷机问世\*

据中央电视台 2002 年 1 月 4 日报道,第一台在室温下工作的永磁式磁制冷机已经在美国 Astronautics Corp 和 Ames Lab( 以下称 A & A )研制成功. 1976 年, Brown 利用金属 Gd( 作为工作物质 )和水冷电磁铁( 提供 7T 的工作场 )构成了第一台室温磁制冷机, 此后, 人们一直期待着, 能够用结构轻巧的永磁铁代替笨重的电磁铁或超导磁铁, 以便为磁制冷机提供工作场. 25 年来, 经过美、日、法、俄等国以及我国专业工作者的不懈的努力, 这一梦想终于实现了.

金属 Gd 是强磁性材料, 每个 Gd 原子具有  $7 \mu_B$  ( $\mu_B$  是玻尔磁子) 的磁矩. 在居里温度  $T_C = 293K$  附近, 对 Gd 施加外场, 其分子磁矩便沿外场方向有序排列. 此时, 系统的磁熵减小, 同时放出磁化热. 令换流流体( 例如, 水 )流经作为磁制冷工作物质的 Gd 体, 可将放出的热量带走, 使 Gd 体恢复到加磁场以前的温度. 之后, 如果将外场突然撤除( 相当于绝热退磁——等熵过程 ), Gd 体的温度将降至环境温度以下. 磁熵因退磁而增加, 晶格熵减小( 温度降低 ), 但总熵不变. 于是, Gd 体可以从周围环境吸热, 即产生制冷效果.

在 A & A 的制冷机中, Gd 微珠被压制成轮形, 永久磁体的二极就象钳子的虎口, 卡住  $360^\circ$  Gd 轮的其中一段. 当 Gd 轮在外力的驱动下旋转, 它的各个段位便会先后经历上述“磁化放热和退磁降温”的循环过程. 据悉, 在 A & A 的此次研究开发中, 主要是改进了永磁体的设计. 压缩间隙场的横截面, 使间隙场的场强加倍. 由于理论制冷能力有限, 研究开发工作在技术上是相当困难的.

1993 年, 本文作者曾对一台模型永磁式 Gd 制

冷机的最大制冷能力进行过模拟计算. 结果表明: 以 1 kg Gd 片构成工质轮, 以 5 kg Nd - Fe - B 提供工作磁场, 在每循环 2.3 s 的工况下, 模型机所能提供的最大制冷功率是 80 W( 制冷温跨 20 K, 即  $T_{高} = 300 K$ ,  $T_{低} = 280 K$  ). 这一制冷功率大约与一台小型氟利昂家用冰箱相当, 但制冷温跨只相当于后者的 1/3. 总之, 研制永磁式室温磁制冷机的初步成功, 的确来之不易. 在未来磁冰箱商业化和产业化的道路上, 专业人员还有一段相当艰难的路要走.

为了降低对工作磁场场强的要求, 许多材料工作者试图用一级相变磁性材料取代金属 Gd 作为室温磁制冷机的工作物质. 自从 20 世纪 90 年代后期以来, 一些新的材料被测试, 有关巨磁熵变的实验数据先后在各种国际核心期刊上发表. 这其中包括 Ames Lab 的  $Gd_5 Si_2 Ge_2$  和中国科学院物理研究所的  $La T_{13}$  ( $T_r$  = 过渡族掺少量其他金属) 系列材料. 最近, 荷兰 Amsterdam 大学的 Tegus 等报告了又一种可用于室温磁制冷的以过渡族金属为基的新材料—— $Mn Fe P_{0.45} As_{0.55}$ . 它的有效工作温区比  $Gd_5 Si_2 Ge_2$  提高了 20 K, 达到了 300 K 以上.

一级相变材料往往具有本征的不可逆性. 为了对磁制冷材料的实用价值作出正确评价, 应该在外场固定的条件下, 分别测量在加热和冷却两个过程中磁化强度  $M$  对温度  $T$  的依赖关系. 对于  $M - T$  升温曲线和降温曲线, 有时测得的热回滞温度差仅为 1 K, 但这并不说明材料在制冷应用中一定能发挥出理论功效. 这是因为, 测试过程的特征时间长度是数分钟, 而在制冷机中循环的特征时间仅数秒, 在后一

( 下转第 489 页 )