

# Mott 对凝聚态物理学的重大贡献\*

——纪念 Mott 诞辰 100 年

吴自勤

(中国科学技术大学理学院 合肥 230026)



Mott N F (Nevill Francis) 爵士 1905 年 9 月 30 日生于英国 Leeds. 他的父亲和母亲曾一起在剑桥大学 Cavendish 实验室(物理系) J. J. Thomson 研究组的实验室工作过, 父母对他成为物理学家的影响远超过中学老师. 他先在 Bristol 的

Clifton 学院学习; 1924—1927 年在剑桥大学 St John's 学院(成立于 1511 年)学数学和理论物理并发表散射理论方面的论文. 1928 年在 Fowler( Dirac 的老师、著名物理学家王竹溪 1935—1938 年留英时的导师)的安排下从剑桥到哥本哈根 Bohr 的研究所等著名研究单位作访问学者、继续钻研量子力学和原子碰撞理论. 1929—1930 年到曼彻斯特大学 Bragg W I(和父亲 Bragg W H 一起获诺贝尔物理学奖)处作讲师, 主要工作是开设量子力学课程, 1930 年他(25 岁)的第一本著作《量子力学纲要》出版. 1930—1933 年回到剑桥大学在 Gonville & Caius 学院(成立于 1348 年)任教. 1933—1954 年任 Bristol 大学理论物理学教授、物理系主任, 在此期间 1936 年(31 岁)被选为英国皇家学会会员( FRS ). 1954—1971 年任 Cavendish 实验室主任, 1959—1966 年任剑桥大学 Gonville & Caius 学院院长( Master ). 1951—1957 年任国际物理学联合会( International Union of Physics )会长( President ), 1956—1958 年任英国物理学会会长, 1962 年被封为爵士. 1971 年退休后任伦敦帝国学院高级研究员. 1977 年获诺贝尔物理学奖. 1994 年获剑桥大学荣誉博士( DSc )学位. 1995 年被选为“服务科学”荣誉伙伴( Companion of Honour ( CH ) for services to science ). Mott 于 1996 年 8 月 8 日去世, 享年 91 岁.

英国物理学界十分尊重 Mott, 1965 年在他 60 寿辰之际, 英国学者为他筹备出版纪念文集. 原来他们打算合写一本 Mott 和 Jones 1936 年出版的《金属和合金的性质的理论》<sup>[1]</sup>的新版, 但考虑到这一领域 30 年来的进展很多, 新书的篇幅可能要扩展到上千页, 于是决定把纪念文集集中于 (1) 金属的电子结构和电学性质 (2) 固体的力学性质. 看来是由于文集作者都很忙, 两册纪念文集<sup>[2]</sup>分别在 1971 年和 1975 年才出版. 其正式书名分别为: 1. 《金属物理学 I 电子》, 由 Ziman 主编, 主要说明金属的电子理论, 如能带结构、费米面和输运性质. 2. 《金属物理学 II 缺陷》, 由 Hirsch 主编, 主要说明固体缺陷和金属和合金的力学性质. 两书的十几位作者中不少人是 Mott 在 Bristol 和剑桥的同事.

1960—1970 年代, Mott 以接近古稀之年在非晶态物理等新领域开展了系统的研究. 他对非晶态电导理论做出了杰出的贡献. 为此 Mott 和另二位美国学者 Anderson 和 Van Vleck 一起获得了 1977 年诺贝尔物理学奖.

1985 年在他 80 寿辰之际, Adler D, Fritzsche H, Ovshinsky S R 主编出版了 Mott 纪念文集. 文集共有三卷<sup>[3]</sup>, 书名分别是《定域化和金属绝缘体转变》、《四面体键非晶半导体》和《无序材料物理》. 文集的作者一共约有百人, 来自世界各地. 主编们赞扬“Mott 爵士作为物理学家、教师和科学界领袖树立了最高的标准. 我们对他的感情不仅限于对一位伟大科学家的尊敬和钦佩, 而且包含着对人品卓越的伟大人物的深切感动. 我们感谢他丰富了我们的生活, 我们将永远爱戴着这位高尚的人.”

中国物理学界也熟悉 Mott, 因为大家都知道他是国家最高科学技术奖获得者黄昆的研究生导师. 黄昆在《我的研究生涯》<sup>[4]</sup>中回忆说他是战后 Mott 的第一个研究生(1945 年 7 月到 1947 年 5 月), Mott

\* 2005-01-14 收到

给他的论文题目是“缺陷对固体 X 射线散射的效应”。他很快完成了这篇论文, Mott 对此感到满意, 在黄昆的初稿稍作文字修改后就以黄昆单独署名送 Proc. Roy. Soc. (London) 于 1947 年发表<sup>[5]</sup>。论文工作使黄昆注意到理论工作的实用性, 并且认为理论预言的漫散射强度分布应该在实验上被观察到。经过二十多年实验技术的改进, 点缺陷的 X 射线散射效应得到证实并被称为黄漫散射(和另一种热漫散射对应)。中国物理学界还熟悉 Mott 的电子散射截面、Mott 的非晶态迁移率边、Mott 绝缘体等重要概念。正如冯端、金国钧在《凝聚态物理学》<sup>[6]</sup>所指出的:“许多年来, 大多数固体物理教科书中都不讲 Mott 绝缘体, 仅有少数专门研究金属-绝缘体相变的科学家关注这一问题。铜氧化物中超导电性的发现, 及锰氧化物中庞磁阻现象的重新发现, 改变了这一情况。这些材料被证实为掺杂 Mott 绝缘体。”这充分说明了 Mott 具有高瞻远瞩的科学洞察力。

下面我们将从 Mott 电子散射截面和 Mott 电子极化术(polarimetry)、Mott 的非晶态迁移率边理论、Mott 绝缘体和掺杂 Mott 绝缘体、Mott 对晶体缺陷和金属强度理论的研究、Mott 的专著等方面介绍他的重要贡献。

## 1 Mott 电子散射截面和 Mott 电子极化术

原子对电子的大角弹性散射可以用经典的卢瑟福散射公式处理, 但和实验结果有较大的差距, 改进的屏蔽卢瑟福散射公式也不够理想。莫特用更合理的量子力学分波法得出符合实验的公式, 在文献上被称为“Mott 微分弹性散射截面”。它被广泛用于电子显微学中, 例如 Mott 微分截面在固体中电子散射的蒙特卡罗模拟中得出了很好的结果。

1929 年 Mott 在相对论量子力学狄拉克方程基础上提出了与自旋有关的电子弹性散射理论, 他建议在电子一次散射之后, 紧接着用二次散射(double scattering)方法在左右对称位置(散射角相等、方位角差 180 度)上测定电子二次散射数目的不平等程度, 以得出一次弹性散射电子的极化率(电子自旋向上和向下的不对称分布), 并给出定量的理论结果。这个实验难度大, 因为它要求电子能量最好达 100keV 量级, 散射角大于 90 度, 而最大极化不过 10% 左右, 因此直到 1942 年才得出和他的理论一致的实验结果。Mott 对电子散射理论的贡献主要反映在他和 Massey 的名著《原子碰撞理论》<sup>[7]</sup>中。

他提出的这种二次散射后来被称为“Mott 散射”。1990 年代以来, 在 Mott 散射探测原理基础上发展成“Mott 电子极化术”<sup>[8]</sup>, 设计制造了一系列仪器, 在显微学、原子分子物理、固体物理、核物理、高能物理中得到广泛的应用。与自旋有关的电子弹性散射最近已在扫描电子显微学中被用来探测材料表层的磁结构, 成为磁电子学的一项基础性实验技术。

## 2 Mott 的非晶态迁移率边理论

Mott 从 1930 年代起, 利用当时量子力学的成果, 开展了原子、电子结构与材料性质的研究, 他在 1928—1940 年间发表了多篇论文和《金属和合金的性质的理论》<sup>[1]</sup>和《离子晶体的电子过程》<sup>[9]</sup>两本专著, 成为固体物理学的奠基人之一。

从 1960 年代中期起, Mott 发表一系列非晶态物理、特别是非晶态电导理论方面的论文。1967 年他在 Adv. Phys. 发表了长达 96 页的论文“无序结构的定域态”后, 在 1968—1972 年的 Phil. Mag. 期刊上发表了 9 篇总题目是“非晶态材料的电导”的论文, 其小题目是 (1) 无序系统的定域电子态 (2) 混乱中心链的金属-绝缘体转变 (3) 膺能隙和导带、价带极端点的定域态 (4) 无序点阵中的安德森定域化 (5) 非晶态半导体的电导、光吸收和光电导 (6) 液态半导体 (7) 非欧姆行为和开关 (8) 在掺杂半导体和 VO 中的强关联电子气 (9) 最小金属电导。在这些论文中他发展了 1958 年 Anderson 的无序系统(格点处的能量值是随机分布的)的定域电子态理论(电子波函数不再在整个晶体中传播, 而是局限在某一格点近处), 他提出了能带两侧的迁移率边的新概念。在两个迁移率边之间的态是扩展态, 两个迁移率边向两侧延伸的带尾态是定域态, 即迁移率边是扩展态和定域态之间的界限。Mott 强调, 可以通过掺杂改变费米能, 当费米能处于两个迁移率边之间时得到金属态, 当费米能位于两侧的带尾定域态中时得到绝缘态, 这就是说可以通过掺杂等方法实现金属态-绝缘态之间的转变。

Mott 还提出变程跳跃的概念。在非晶定域态中在一定温度下电导可以通过定域态之间的跳跃实现, 此时相邻的格点的距离和能量都可以略有差别, 变程跳跃是指跳跃可以发生在距离较远、能量差较小的格点之间。Mott 给出了跳跃电导的表达式(电导的对数  $\ln\sigma$  和  $T^{-1/4}$  有线性关系,  $T$  绝对温度), 这个低温下  $T^{1/4}$  关系的预言在后来的大量实验中得到

证实。

他在 1967—1973 的七年(62—68 岁)期间共发表论文 46 篇(非晶态物理论文为主),是一个高产时期。和他年轻时期(1928—1939, 25—36 岁)12 年发表论文 59 篇可以相比。

### 3 Mott 绝缘体和掺杂 Mott 绝缘体<sup>[6]</sup>

Mott 绝缘体的提出源于固体能带论在解释单氧化物电导现象中遭遇到重大挫折。以 CoO 为例,Co 和 O 的外层电子分别为 9 和 6 个,这样每一个基元中共有 15 个电子,按照固体能带论,外层电子数为奇数时能量最高的价带是半满的,因此材料应该是金属。实验上测定 CoO 是带隙很大的绝缘体。Mott 认为这是由于能带论是一种单电子简化理论,它忽略了价电子之间的关联。在考虑电子之间的关联后,能带分裂为两个中间有明显带隙的子能带,而奇数电子刚好填满下面的子能带,使单氧化物成为绝缘体,这样的材料就是 Mott 绝缘体。

Mott 预言:固体中原子间距减小到某一临界值后,材料将发生绝缘态向金属态的转变。这样的转变就是电子之间的关联引起的 Mott 金属-绝缘体转变。前面提到的由无序引起的金属-绝缘体转变被称为 Anderson 转变。

Mott 金属-绝缘体转变还可以通过氧化物中掺入不同价的离子或改变氧的化学计量比来实现。这就是引起轰动的氧化物高温超导体和氧化物庞磁阻材料中发生的过程。这些材料已被证实为掺杂 Mott 绝缘体<sup>[6]</sup>。

### 4 Mott 对晶体缺陷理论的贡献

1934 年以 Taylor 提出位错模型解释金属范性和加工硬化为标志,固体缺陷理论得到重视和发展。Mott 从 1938 年起对固体缺陷和合金的力学性质十分关注,他参加了金属范性形变和固体内应变等学术会议并发表论文,如 1940 年他和后来成为著名的位错理论专家 Nabarro 一起发表合金硬化论文<sup>[10]</sup>,首先定性处理了合金中沉淀粒子对位错的广延障碍作用。

经过二次世界大战的停顿,1946—1963 年他推动了固体缺陷和金属强度理论的发展。1948 和 1952 年他处理了沉淀粒子局域弱障碍、以及排斥性和吸引力障碍对位错运动的作用。1948 年他更进一步处理了固溶体和共格性沉淀硬化对位错运动的作用,得出了流变应力和温度的依赖关系。1951 年他提出

位错在两个不同滑移面上滑移的一种机制:Mott - Frank 螺位错交联滑移(cross slip)。

1952 年他提出位错塞积群(dislocation pile-up)的长程应力阻碍了位错的滑移。他还对比了面心立方金属加工硬化率很低的易滑移阶段,提出易滑移的原因是:面心立方金属只有受到最大切应力的一个滑移系统在开动。第二滑移系统的开动将产生许多和第一滑移面相交的“林位错”。这些林位错既有长程、又有短程的阻碍位错运动的作用,使加工硬化率显著增大(1955 年)。金属的断裂是广大材料科学工作者很关心的问题。Zener - Mott - Stroh 理论认为:两个位错塞积群的应力集中引起的微裂缝是金属断裂的最初阶段。

著名金属物理和材料科学专家 Cottrell 认为:材料断裂等复杂而重大的课题之所以能引起 Mott 的兴趣,是因为他关注用原子层次的理论去解释宏观性质,并且相信只有理论和实验的联合创新才能取得实质的进展。

Mott 对实际问题的关注是一贯的,他在 1930 年代对光乳胶中的潜影的形成的原子过程进行过分析。二战时期他探讨过雷达中无线电波的传播问题和材料成分对爆炸碎片分布的影响。

### 5 Mott 的教材和专著

Mott 的贡献还表现在他和合作者完成了一系列教材和专著,早在 1930 年他就出了一本 156 页的《量子力学纲要》<sup>[11]</sup>。1934 年出版了《原子碰撞理论》<sup>[7]</sup>,此书共有三版,1965 年的第三版有 858 页,此书还有中译本。1936 年和 1940 年分别出版《金属和合金的性质的理论》(326 页)<sup>[1]</sup>和《离子晶体的电子过程》(275 页)<sup>[9]</sup>两本专著,成为固体物理学的奠基性著作。1948 和 1952 年分别出版了《量子力学及其应用》(393 页)<sup>[12]</sup>和《量子力学原理》(156 页)<sup>[13]</sup>。1956 年他出版了一本简明的《金属的原子结构和强度》(64 页)<sup>[14]</sup>。1971 和 1979 年他出版了《非晶材料中的电子过程》第一版和第二版(590 页)<sup>[15]</sup>。1972 年他出版了《基础量子力学》(121 页)<sup>[16]</sup>。1974 和 1990 年他出版了《金属-绝缘体转变》第一版和第二版(286 页)<sup>[17]</sup>。

以上 10 册著作中 4 册是量子力学教学参考书,6 册分别是电子散射理论、金属电子论、半导体电子论、非晶态物理和金属强度方面的专著和教材,这是他的上述研究工作及其相关领域积累的知识的总结,对人才培养有重要作用。

Mott 热心科学教育事业,他在 1956—1959 年任英国教育中央顾问委员会委员,1959—1962 年任教育部师资培训常设委员会主席,他担任过成立于 1798 年的 Taylor & Francis, Ltd. 科技书籍出版社总裁 (president),他在英国的科学教育改革事业中发挥了领导作用。

## 6 自传《科学一生》

Mott 的自传《科学一生 (A Life in Science)》<sup>[18]</sup>在 1986 年出版,1987 年此书第二次印刷,1995 年此书的平装版出版。

他在自传的 1986 年序言中开头就说“我为什么写这本书?因为我的一生处在科学发展的英雄时代,特别是和固体物理学的兴起有关”。

他在自传 23 章“回首往事”中总结他的“科学一生”：“回首我的物理学生涯,我多次抓住了幸运的机遇。我对我能成为物理学家毫无疑问。对我来说,这是我能做得最好的事情。我从未考虑过从事其他事业。我在剑桥开始我的研究,当时卢瑟福处于权威的顶峰、量子力学刚刚兴起,我把这些新概念应用到卢瑟福的核是很自然的。在 Bohr 那里的四个月使我懂得理论物理应当是不断的思想交流和广泛的人际交往的产物,而不是一个人在学院房间里的冥思苦想。于是我懂得应该有什么类型的物理系。1933 年我在 Bristol 得到了实践的机会。我在那里转向固体物理,这并非是反复思考后的选择,而是一种自然的过程。我在二战中的经验驱使我努力建设一个有助于工业的系。这种努力 1945 年起在 Bristol、以后在剑桥取得了一定的成功。”

Mott 是一位世界著名的物理学家。他的学术工作的特点是抓住基本物理问题,强调现象的物理图像,力图用电子、原子和缺陷机制说明宏观实验规律。正如他在诺贝尔物理学奖得奖演说中指出的:他从普通玻璃是透明的(可见光子能量小于能隙、易通过),另一些特殊玻璃是黑的(可见光子能量大于能隙、被吸收)得到启发,认为非晶态也有能隙。他又从非晶态电导随温度变化的两个不同的实验规律出发,提出迁移率边概念,并且从理论上预言了电导率的温度的四分之一次方规律。这样的创新思想给人们以深刻的启发。这也是他指导黄昆得到黄漫散射的原因。他的另一个特点是善于和人合作。在非晶态半导体研究方面他和能量转换器件 (ECD) 公司合作多年,充分肯定 ECD 的硫属玻璃薄膜开关器件,写了两篇综述<sup>[19,20]</sup>阐明 ECD 器件中的新工作原理,成为他获得诺贝尔

物理学奖工作的组成部分。ECD 公司负责人 Ovshinsky 是他 80 岁寿辰纪念文集的三位主编之一。在著书方面他和四位学者合写了四本著作。他的第三个特点是编写了众多的教材和专著,及时将几个领域的新的科学进展系统化,传播了新兴分支学科,教育了一代代年轻的学者,为他们施展才华提供平台。他的第四个特点是他的科学活力从青年一直保持到晚年,包括 31 岁 (1936 年) 被选为 FRS、花甲之年开展后来 (1977 年) 获诺贝尔物理学奖的研究工作,以及 1986 年出版自传。1986 年后他参加氧化物高温超导体机理的探索,1995 年他在自传平装版序言中说:他希望活得足够长,以便看到他和合作者的高温超导体机理的想法是否正确。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Mott N F, Jones H. *The Theory of the Properties of Metals and Alloys*, Oxford: Clarendon Press, 1936
- [ 2 ] Ed. Ziman J M. *The Physics of Metals 1 Electrons*. Cambridge: Univ. Printing House, 1971; Ed. Hirsch P B. *The Physics of Metals 2 Defects*, London: William Clowes & Sons Ltd., 1975
- [ 3 ] Mott N F. *Festschrift Vol. 1 Localization and Metal - Insulator Transitions*; Vol. 2 *Tetrahedrally Bonded Amorphous Semiconductors*; Vol. 3 *Physics of Disordered Materials*. Ed. Adler D, Fritzsche H, Ovshinsky S R. New York: Plenum Press, 1985
- [ 4 ] 黄昆. 物理, 2002, 31 :129 [ Huang K, Wuli (Physics), 2002, 31 :129 (in Chinese) ]
- [ 5 ] Huang K. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 1947, A190 :102
- [ 6 ] 冯端、金国钧. 凝聚态物理学(上卷). 高等教育出版社, 2003 第十三章
- [ 7 ] Mott N F, Massey H S W. *The Theory of Atomic Collisions*. Oxford: Clarendon Press, 1934, 3rd Edition, 1965
- [ 8 ] Gay T J, Dunning F B. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, 63 :1635
- [ 9 ] Mott N F, Gurney R W. *Electronic Processes in Ionic Crystals*. Oxford: Clarendon Press, 1940
- [ 10 ] Mott N F, Nabarro F R N. *Proc. Phys. Soc.*, 1940, 52 :86
- [ 11 ] Mott N F. *An Outline of Wave Mechanics*. Cambridge Univ. Press, 1930
- [ 12 ] Mott N F, Sneddon I N. *Wave Mechanics and its Applications*. Oxford: Clarendon Press, 1948
- [ 13 ] Mott N F. *Elements of Wave Mechanics*. Cambridge Univ. Press, 1952
- [ 14 ] Mott N F. *Atomic Structure and the Strength of Metals*. Pergamon Press, 1956
- [ 15 ] Mott N F, Davis E A. *Electronic Processes in Non - crystalline Materials*. Oxford University Press, 1st ed. 1971; 2nd ed. 1978
- [ 16 ] Mott N F, *Elementary Quantum Mechanics*. London: Wykeham Publ., 1972
- [ 17 ] Mott N F. *Metal - Insulator Transitions*. London: Taylor and Francis, 1974; 2nd ed. 1990
- [ 18 ] Mott N F. *A Life in Science*. London: Taylor and Francis, 1986, Reprinted 1987, Paperback ed. 1995
- [ 19 ] Mott N F. *Contemporary Phys.*, 1969, 10 :125
- [ 20 ] Adler D *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 1978, 50 :207