

物质波理论的创立(II)

向义和

(清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

三、物质波理论的应用

1. 玻尔量子化条件的物理解释

德布罗意在它的第一篇物质波论文中, 把他的相波概念应用到以闭合轨道绕核运动的电子, 从而推出了玻尔的量子化条件, 这是德布罗意波能够成立的一个有力证据。德布罗意假定在 $t=0$ 时刻, 电子位于 O 点, 并以速度 $V = \beta c$ 运动。它所缔合的波也在 O 点并以速度 c/β 沿电子轨道运行, 假定在 t 时刻波与电子再次重合在 O' 点, 设电子运行周期为 T , 由于电子与波的速度不同, 则二者重合必须满足下式

$$t \frac{c^2}{V} = V(t + T)$$

或

$$t = \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} T.$$

因此在从 O 点到 O' 点时, 电子内在运动的位相变化为

$$2\pi \nu_1 t = 2\pi \frac{m_0 c^2}{h} \frac{T \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

德布罗意认为如果电子轨道是稳定的, 那么经过 O' 点的波必须在位相上与电子保持一致, 也就是说, 与电子缔合的波必须在电子轨道上形成驻波, 于是就有

$$2\pi \frac{m_0 c^2}{h} \frac{T \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = 2\pi n \quad (n \text{ 为整数})$$

或

$$\frac{m_0 \beta^2 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} T = nh.$$

这一条件与玻尔-索末菲条件

物理

$$\int_0^T (p_x dx + p_y dy + p_z dz) = nh$$

完全一致。

因为

$$\begin{aligned} & \int_0^T (p_x dx + p_y dy + p_z dz) \\ &= \int_0^T \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2) dt \\ &= \frac{m_0 \beta^2 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} T = nh. \end{aligned}$$

设电子的角速度为 ω , 在半径为 R 的圆轨道上绕核旋转, 则在电子速度相当小的情形下, 可再次得到玻尔的角动量量子化条件

$$m_0 \omega R^2 = n \frac{h}{2\pi}.$$

在他的第三篇物质波论文中提出“只有满足位相波谐振的那条轨道才是稳定的轨道。”电子的轨道是由 $\frac{\nu}{v}$ 对闭合路径的积分取整数值来确定。在博士论文第三章“轨道稳定性的量子条件中”写出下式:

$$\oint \frac{\nu}{v} dl = n.$$

谐振的条件是 $l = n\lambda$, 即电子轨道的周长是位相波波长的整数倍。

2. 麦克斯韦分布的证明

在第三篇物质波论文中, 德布罗意把相波假设应用于气体系统, 用他的统计平衡的新概念证明了麦克斯韦分布。他认为气体原子象电子一样也具有波粒二象性。每一具有速度 βc 的原子可以视之与一波群相联系, 这一波群的相速度为 $u = c/\beta$, 频率为 $\frac{1}{h} \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$, 群速度为 $U = \beta c$ 。除非所有与原子对应的波

成驻波系统，气体的状态不可能是稳定的。他采用金斯 (Jeans) 的计算方法，得出在单位体积内，在 ν 到 $\nu + d\nu$ 的频率间隔内连续的驻波数为

$$n_\nu d\nu = \frac{4\pi}{UV^2} \nu^2 d\nu = \frac{4\pi}{c^3} \beta \nu^2 d\nu.$$

气体原子的频率 ν 和动能 W 的关系式由下式确定：

$$h\nu = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = W + m_0 c^2 \\ = m_0 c^2 (1 + a),$$

式中 $a = W/m_0 c^2$ 。

将以上二式联立可得

$$n_\nu d\nu = \frac{4\pi}{h^3} m_0^3 c^3 (1 + a) \sqrt{a(a + 2)} dW.$$

这是在单位体积内，在 W 到 $W + dW$ 间隔内的驻波数。因为每个波可以传输一个、二个或若干个原子，与这些原子相应的能量为 $h\nu, 2h\nu, \dots, nh\nu$ 。按玻尔兹曼分布每个波传输的能量为 $h\nu$ 的原子数为

$$\frac{\sum_1^\infty n e^{-\frac{n h \nu}{kT}}}{\sum_1^\infty e^{-\frac{n h \nu}{kT}}}.$$

所以在体积元中，动能在 W 到 $W + dW$ 间隔内能量为 $h\nu$ 的原子数为

$$dn_W = \text{const} \frac{4\pi}{h^3} m_0^3 c^3 (1 + a) \sqrt{a(a + 2)}$$

$$\times dW dx dy dz \cdot \frac{\sum_1^\infty n e^{-\frac{n h \nu}{kT}}}{\sum_1^\infty e^{-\frac{n h \nu}{kT}}}.$$

对于质量较大、速度较小的原子所构成的气体，上述级数中除第一项以外，其它各项可以忽略不计，即有 $1 + a = 1$ ，则动能在 W 到 $W + dW$ 内的原子数为

$$dn_W = \text{const} \frac{4\pi}{h^3} m_0^{3/2} \sqrt{2W} e^{-\frac{W}{kT}}$$

$$\times dW dx dy dz.$$

这就得到了麦克斯韦分子按动能分布的规律。

3. 电子衍射的预言和干涉现象的解释

在第二篇物质波论文中，德布罗意假设自由动点的轨迹是与其相波波射线一致的，即沿着垂直于等相面的方向运动。如果动点从一个线度相当于相波波长的孔通过，它的轨迹就会象衍射波的射线那样发生弯曲。从而他提出了如下预言：“从很小的孔穿过的电子束能够呈现衍射现象，这或许就是人们能借以寻找关于我们的想法的实验证据的方向”。在这里，德布罗意提示了用电子衍射实验来证实物质波存在的可能性。

德布罗意在此进一步发展了他的相波概念。他把相波看作是导引能量转移的导引波。相波确实存在，允许他进行波与量子的综合。他还指出“自由质点的新动力学与古典力学(也包括爱因斯坦的动力学)的关系，犹如波动光学与几何光学的关系。通过深思熟虑可以看出，我们提出的综合，似乎是从17世纪以来动力学和光学的发展比较中得出的一个逻辑结果”。

接着，德布罗意用量子观点解释了干涉现象。他假设“原子具有一种吸引或辐射光原子的几率，这一几率由一个与之交织在一起的相波波矢来决定”。“这一假设归根结蒂是这样一种对于电磁理论的类比，这种电磁理论将光的可测强度与由此产生的电矢量强度联系起来”。他又指出：“自然，只有当原子处于受激状态，才有可能辐射，只有当光原子处于其邻近位置，吸收才有可能发生”。由处于激发态的某一原子辐射的光量子，“其相波在通过邻近原子时会引起其它的量子辐射，假定这种量子辐射的内在振动在相位上与波本身一致，所有被辐射出来的光原子具有与先前一样的相波”。“这些辐射与波耦合，与单一的相波一起传输着”。在博士论文第五章第五节“干涉和相干性”中，德布罗意指出，由于这些波是一样的，这样一个波就能输运很多小的光原子，每个光原子是一个能量凝聚中心，这些能量中心轻轻地波面上滑动，形成了小块的能量，正如他在《干涉与光量子》一文中所讲的那样，干涉现象与光原子的集合有关。

四、物质波思想的影响及实验验证

由佩兰 (Perrin), 朗之万, 卡坦 (Cartan) 和莫格温 (Maugain) 组成的论文答辩委员会对德布罗意的工作印象极佳。朗之万审阅了德布罗意的论文, 他在报告中强调“除了思想的独创性外, 德布罗意以非凡的技巧作出努力来克服阻碍物理学家的困难”^[1]。他赞赏德布罗意理论的连贯性, 真实性。但是, 由于当时物质波理论还没有任何实验证据的支持, 所以多数考试委员对物质波的真实性存在疑虑。当答辩委员会主席佩兰问道: “这些波怎样用实验来证明?” 德布罗意回答说: “用晶体对电子的衍射实验是可以做到的”^[2]。这是他早已考虑过的方案, 并曾向他哥哥的同事道维耶 (Dauvilier) 提出做这个实验, 但是后者因忙于其他实验而搁置下来。

德布罗意的物质波理论, 最初并未受到物理学界的重视, 但在他的导师朗之万将论文的复印本寄给了爱因斯坦后, 事情起了戏剧性的变化。爱因斯坦向来欣赏物理学中的对称性, 所以对德布罗意的想法很感兴趣, 非常赞同, 竭力支持。1924年12月, 爱因斯坦在给朗之万的复信中对德布罗意的工作给予很高的评价, 声称这是“揭开了大幕的一角”^[3]。同年12月26日, 爱因斯坦写信给洛仑兹, 非常详细地谈到德布罗意的工作: “我们熟知的 M. 德布罗意的弟弟已经对于解释玻尔和索末菲的量子规则作了非常有趣的解释。我相信这对于揭示我们物理学中最难以捉摸的谜, 开始露出了一线微弱的光芒。我还发现了支持他的解释的一些东西。”^[4]次年1月, 爱因斯坦在柏林科学院的会议周报上发表的一篇文章中写道: “我将很仔细地探讨这个解释, 因为我相信它包含了比类推更多的东西。”^[2]他在同年2月发表的爱因斯坦-波色统计的论文中, 指出德布罗意在“非常值得注意的文章中”, 把一个粒子归结为一个波场。他写道: “看来粒子的每一运动都伴随着一个波场, 这个场应该是能观察到的”。爱因斯

坦认识到德布罗意工作的重大意义, 他对玻恩说: “您一定要读它, 虽然看起来有点荒唐, 但很可能是有道理的”^[5]。玻恩在1925年7月15日给爱因斯坦的信中写道: “随后, 我读了 L. 德布罗意的论文, 并逐渐明白他们搞的是什么名堂, 我现在相信物质波理论可能是非常重要的”。

德布罗意的论文经爱因斯坦推荐后, 引起物理学界的广泛重视, 特别是对奥地利物理学家薛定谔产生了深刻的影响。薛定谔也是在朗之万的促使下阅读了德布罗意的论文, 他在1926年4月23日给爱因斯坦的信中说: “如果不是你的关于气体简并的第二篇论文把德布罗意的思想摆到了我的面前, 单靠我个人, 很难想象波动力学会建立起来, 甚至有可能永远也搞不出来”^[6]。在发表波动力学的一系列论文以前, 薛定谔写了一篇关于气体理论的文章, 清楚地说明了他对德布罗意假设的看法。他在绪言中说: “这意味着除了认真地考虑德布罗意-爱因斯坦的运动粒子波动理论之外, 再无别的途径可言”。在1926年初, 薛定谔发表他的第一篇波动力学论文时, 曾清楚地表示他的“这些考虑的灵感主要得自德布罗意先生独创性的论文”^[7]。这就说明波动力学是在德布罗意物质波思想的直接影响下所获得的一个丰硕成果。

最早从实验上证实电子衍射现象是美国的戴维孙 (Davisson) 和他的合作者革末 (Germer)。1926年他们将电子枪中射出的电子束投射到镍单晶体表面上, 研究了散射电流与轰击电压和散射角的关系, 肯定了这是电子衍射的结果。经过定量计算, 证明了德布罗意波长公式的正确性。1927年4月, 他们把实验研究结果公布在《自然》杂志上。

同一年, 英国物理学家 J. J. 汤姆孙之子 G.P. 汤姆孙 (George Paget Thomson 1892—1975) 也完成了电子衍射实验。他和 F. 里德做了高能电子束透射金属薄层的实验, 很快就观察到了衍射环。根据这些圆环的半径可以计算出电子波的波长, 从而令人信服地证明了德

布罗意波长公式,证实了电子的波粒二象性。戴维孙和汤姆孙同时获得1937年的诺贝尔奖金物理学奖^[1]。

后来,接连发现物质波的衍射现象。1929年,伊斯特曼和斯特恩成功地研究了原子和分子的衍射。他们把氢分子束和氦原子束对准氟化锂晶体的解理面,发现实验结果定量地与德布罗意公式相符。1936年,在约里奥实验室工作的冯哈尔巴恩和普赖斯沃克用来自氡(Rn)-铍(Be)源的散射中子在铁上的衍射,获得了中子衍射的实验证据^[2]。几十年来,德布罗意的物质波思想不仅成了量子理论的起点,而且还促使人们去进一步做一系列新的实验。

本文经清华大学物理系秦明华教授审阅并校对,作者在此表示衷心的感谢。

- [1] William C. Price et al., ed. *Wave Mechanics the First Fifty Years*, Butterworths, London, (1973), 12.
- [2] Max Tammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York, (1966), 236, 247, 249.
- [3] 阎康年,物理, 12(1982), 758.
- [4] Tagdish Mehra and Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer-Verlag, Vol. I, Partz New York, (1982) 582-587, 592, 594, 602, 604.
- [5] 梅迪卡斯著,闻人军译,科学史译丛,第一辑, (1982), 37.
- [6] 王福山,近代物理学史研究(一),复旦大学出版社, (1983), 1.

位置灵敏原子探针在材料研究中的新应用

沙 维

(北京科技大学材料物理系,北京 100083)

一、马氏体时效钢的时效初期反应

马氏体时效钢是一类特殊的超高强度钢^[1,2]。我们对一种 C-300 马氏体时效钢(Fe-18.5%, Ni-9.0%, Co-4.8%, Mo-0.6%, Ti-0.1%, Al-0.1% max, Si-0.03% max; C(ωt%))的时效初期反应进行了研究。实验发现,相变初始于 Ti 偏析^[3]。这种偏聚现象说明在 C-300 钢时效过程中是 Ni₃Ti 相先形成(C-300 钢时效析出产物为 Ni₃Ti 和 Fe₇Mo₆^[4])。因为这些偏析团很小,并且在场离子像中不显示,由常规原子探针分析的成分经常是偏析团与其周围基体的混合,其结果是系统地给出低于真实值的偏析浓度。然而,采用位置灵敏原子探针分析就没有这个缺陷,因为我们可以观察到聚团内选区分析,从而更准确地测定其浓度。

二、双相不锈钢内铁素体相的调幅分解

双相不锈钢广泛应用于电力工业中,用作元件与管道材料。但是,双相不锈钢中的铁素体相可能发生一种 Spinodal decomposition 失稳分解,产生 Cr 成分波动。采用常规显微结构观察手段很难确定这种调幅相变发生的程度,因为这种成分波动发生在很小的区域,而且 Fe 和 Cr 的 X 射线和电子散射常数大小很接近。原子探针技术很适于研究这类钢中的微小成分变化,但是常规原子探针只能得到一维成分纵分布图。采用位置灵敏原子探针可直接显示富 Cr 区的三维联结网络^[5,6]。采用位置灵敏原子探针,材料相变产物的形状与成分通过一次实验便可确定。

三、铝合金中的时效析出反应

在 Al-Cu-Mg 合金中添加少量 Ag 可促
(下转第 182 页)