

# 在磁场中运动诱导的偶极子量子相位\*

尉海清 韩汝珊

(北京大学物理系,北京 100871)

1995年9月,美国《物理评论通讯》(Phys. Rev. Lett)第75卷第2071页上发表了由北京大学物理系韩汝珊教授指导他的学生尉海清完成的一篇介观物理量子相位方面的文章.下面对该文的意义和内容作一简要介绍.

## 1 量子相位概念及其重要性

量子力学与经典力学的一个本质的不同在于量子力学认为粒子具有波动性,粒子的运动由薛定谔波动方程来决定.而相位是对一切波动现象都很重要的一个物理量.相位在量子力学中的重要性可以用电子双缝干涉实验来说明.如图1所示,从缝1和缝2射出的电子束是相干的.由于在屏上不同位置的两电子束的相位差不同,从屏上可以观测到电子流强度的周期性干涉条纹,类似于光学中的杨氏双缝干涉实验.非常有趣的是,一些系统,在某种情况下,从经典力学的角度看没有任何作用力施加在粒子上,而量子力学却认为有某种相位附加在粒子的描述其状态的波函数上,并且可以通过量子干涉显现成为可以观测到的效应.这一类现象最早被发现的是 Aharonov-Bohm 相位<sup>[1]</sup>,后来又有 Aharonov-Casher 相位<sup>[2]</sup>和 Berry 相位<sup>[3]</sup>,最近尉海清和韩汝珊指出量子相位具有可加性,并预言了中性原子在互相垂直的静电场和磁场中也会有某种量子相位<sup>[4]</sup>.

量子相位之所以重要,并引起人们广泛的注意,是因为量子相位的各种效应是量子力学所特有的,在经典力学中找不到任何可以对应的现象.所以研究量子相位,对于我们加深对量子世界的理解和认识是非常重要的.它是对已建立的量子力学理论的很好的检验,也定会为量子干涉现象的新应用开辟广阔的前景.

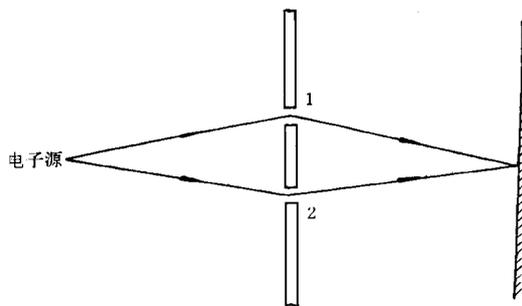


图1 电子双缝干涉实验( )

## 2 从 Aharonov-Bohm 相位谈起

Aharonov-Bohm 在 1959 年最先发现带电粒子在磁场强度  $B = 0$  但磁矢势  $A \neq 0$  的区域内运动,其波函数要附加一个相位

$$\Delta\phi_{AB} = \frac{e}{\hbar c} \int A \cdot dr. \quad (1)$$

而经典力学认为,在  $B = 0$  的区域内,带电粒子不会感受到任何作用.下面仍用电子双缝干涉实验作为例子.如图2所示,由垂直于纸面的无穷长细螺线管产生的磁场  $B$  被限制在一个有限的区域内,在螺线管外的区域  $B = 0$ .假定两束电子离得足够远,以致于任何一束电子都没有可能进到螺线管内部去.由于电子运动的区域  $B = 0$ ,电子没有受到任何力的作用,但是却有一个附加的  $AB$  相位.两束电子的  $AB$  相位之差为

$$\Delta\phi_{AB} = \frac{e}{\hbar c} \int A \cdot dr = 2\pi \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} \right), \quad (2)$$

\* 国家自然科学基金资助项目.

1995年12月15日收到初稿,1996年6月10日收到修改稿.

$\phi_{AB}$  决定于穿过螺线管的总磁通量  $\Phi$  与磁通量子  $\phi_0$  的比值,  $\phi_0 = 2 \hbar c / e = 4.0 \times 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2$ . 所以随着  $\Phi$  的变化, 两电子束的相位差也随着变化, 干涉条纹将发生移动. 而且每增加一个磁通量子, 干涉条纹就恢复原状, 因为干涉条纹是关于相位差  $\Delta\phi$  的周期函数, 周期为  $2\pi$ . Aharonov-Bohm 预言的这个效应被 Shambers 的实验所证实<sup>[5]</sup>, 但批评者指责 Shambers 的实验中电子束并没有被完全排除在螺线管之外. AB 相位引起了强烈的争议. 这也从侧面说明了人们对量子相位的重视. 有兴趣的读者可以参看 Peshkin 和 Tonomura 关于 AB 效应的专著<sup>[6]</sup>. 直到 1986 年, Tonomura 等人以无可非议的电子全息实验证实了 AB 效应的存在<sup>[7]</sup>, 才算结束了这场激烈的争论.

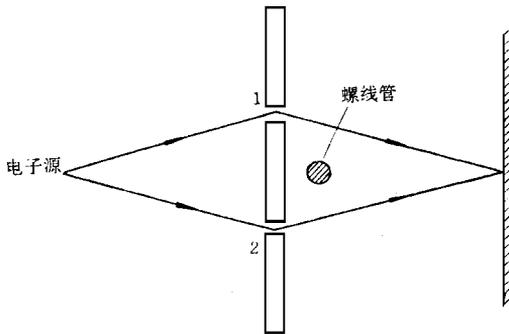


图 2 电子双缝干涉实验 ( )

许多理论物理学家发现在这个问题背后隐藏着很多涉及量子力学基本概念的问题. 近 40 年来, 对这些问题的讨论一直在进行着. 获得的进展是 Aharonov-Bohm 两人所预料不到的. 其中包括规范不变性、电子被矢势  $A$  的散射、因果率与超光速信息传递、电磁场的本质以及 AB 效应的各种推广 (如 AC 相位、Berry 相位等).

### 3 量子相位的可加性

尉海清和韩汝珊最近的工作表明, 在一个非均匀电场和一个垂直方向上的均匀的磁场中, 运动的中性原子将会有个量子相位. 这个量子相位可以解释为组成中性原子的正电荷和负电荷的 AB 相位之和. 他们的工作实际上揭

示了量子相位的可加性. 如图 3 所示, 中性原子在电场中将被引发出一个电偶极矩, 正电荷和负电荷的中心不再重合. 当该中性原子作圆周运动时, 正负电荷的运动轨迹所围绕的面积不同, 因而所包围的磁通量也不相同. 他们发现, 附加在该中性原子上的量子相位正好是正负电荷的 AB 相位的未抵消部分.

$$\begin{aligned} \phi_{AB} &= \frac{e}{\hbar} \int A(r_+) dr_+ - \frac{e}{\hbar} \int A(r_-) dr_- \\ &= \frac{1}{\hbar} \cdot 2 \cdot B (r_+^2 - r_-^2) = 2 \cdot k B / \hbar \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $+e, r_+$  及  $-e, r_-$  用来表示诱导偶极子的一对电荷及位置.  $k$  是磁化率,  $B$  是与电极有关的一个常数,  $B$  是磁场. 上式表明, 这个复合粒子 (偶极子) 的量子相位等于其组分各粒子的量子相位之和, 即量子相位的可加性. 该文发现的中性原子的量子相位有重要的理论意义和实际意义. 特别是近年来原子束干涉技术的进展<sup>[8]</sup>, 使得实验上观测文中预言的量子相位较

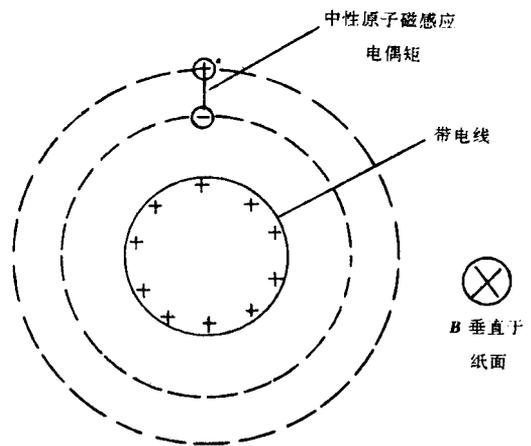


图 3 实验装置示意图

容易实现. 对于既不带电又无磁矩的原子来说, 该文建议的巧妙办法, 可能是唯一 (至少是最可行的) 可以给这原子附加一个量子相位, 并从而能够控制原子束干涉的一种方案. 这对于将来原子束刻蚀微结构技术可能是重要的. 另个, 对于人们已熟知的超流体 He, 它既是不带电又是无磁矩的原子, 该文提出的办法可以给它们附

加量子相位,从而观测各种宏观的量子干涉现象。

100多年前(1865年)麦克斯韦创立电磁场方程的时候曾引入了所谓的‘electrotonic state’的概念,这相当于后来人们所认识的矢势  $A$ 。麦克斯韦认识到它是一种电磁动量,借助它,麦克斯韦把电磁场表示为一组微分方程。此后一段时间,对于矢势  $A$ (和标势  $\phi$ )人们并没有给予足够的重视,甚至认为“仅仅电场  $E$ 和磁场  $H$ 是有物理意义的, $A$ 和  $\phi$ 只是计算有用的一个二级概念”。1900年,Heaviside把麦克斯韦方程组改写为不含  $A$ 和  $\phi$ 的形式,被认为是一大成就,因为他“从方程组中清除了废物(rubbish): $A$ 和  $\phi$ ”。

直到AB效应提出后,人们才认识到势  $A$ 和  $\phi$ 并非单纯的数学工具,而是具有更深刻的物理内涵的物理量。因为依靠电磁力  $E, H$ ,不能完全地描述电磁场,从而使物理学家开始了

重新认真研究  $A$ 和  $\phi$ 的历程。它和规范场论的进展紧密相关。

科学发展的道路是曲折的,但总是不断前进的!

## 参 考 文 献

- [1] Y. Aharonov and D. Bohm, *Phys. Rev.*, **115** (1959), 485.
- [2] Y. Aharonov and A. Casher, *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 319.
- [3] M. V. Berry, *Proc. Roy. Soc. London A*, **392** (1984), 45.
- [4] Wei Haiqing and Han Rushan et al., *Phys. Rev. Lett.*, **75**(1995), 2071.
- [5] R. G. Shambors, *Phys. Rev. Lett.*, **4**(1960), 344.
- [6] M. Peshkin and A. Tonomura, *The Aharonov-Bohm Effect*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (1989).
- [7] A. Tonomura et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 792.
- [8] M. Kasevich, S. Chu, F. Riehle et al., *Appl. Phys.*, **B54** (1992), 321.

## 激光光钳在生物技术中的应用新进展\*

吉望西 王义道

(北京大学无线电电子学系,北京 100871)

**摘 要** 介绍了激光光钳在生物技术中的应用,阐述了应用机理并展望了进一步的发展。

**关键词** 光钳,光阱,微束激光,细胞,染色体,应用

**Abstract** The use of optical tweezers in biotechnology is described, with an overview of the theory and future development.

**Key words** optical tweezers, optical trap, microbeam laser, cell, chromosome, application

因为光可以以多种形式在空间和精度上得到很好的控制,从而使光成为研究生物物理现象的基本工具。窄线宽的高强度激光与分子科学相结合,促进了激光生物技术的发展。原子力显微镜、基因排序、细胞分析器等许多新近发起

来的技术都与激光有关。在这些技术发展的同时,产生了另外一种以激光技术为基础的新技术,这就是光钳技术。

\* 1995年11月8日收到初稿,1996年7月8日收到修改稿。