

A- B 效应及其物理诠释

王长荣

两个值得思考的问题

经典电磁理论中,描述电磁场和带电粒子运动的麦克斯韦方程和洛伦兹力公式都是用场强来表述的,基本物理量是电场强度 E 和磁感应强度 B 。它们满足规范变换不变性,具有真实的物理意义,是客观实在的直接可观测量。引入矢势 A 和标势 φ 只为数学上的方便,而不具有真实的物理意义,它们只是作为描述场的辅助量,并不具有直接的可观测效应,这是经典理论所决定的。但是在量子力学中,直接进入基本方程的是势,那么 A 和 φ 是否存在具有物理意义的可观测量呢?此外,在量子力学中,根据波函数的统计解释,确定体系的状态只能准确到一个相因子,即当 α 为实数时, $\psi(r, t)$ 与 $e^{i\alpha} \psi(r, t)$ 描述体系的同一状态,那么波函数中的相位是否无关紧要?1959年,阿哈伦诺夫(Y. Aharonov)和博姆(D. Bohm)对这两个令人困惑的问题作出了理论解释,提出了以他们的名字命名的 A- B 效应。

A- B 效应

A- B 效应是一种很奇异的量子效应。它表明,对于由量子力学所描述的微观世界而言,在某些电磁过程中,具有局域性质的电磁场强 E 、 B 所提供的信息不足。它们已经不能有效地描述带电粒子的量子行为,而势 (A 、 φ) 虽然能描述全部微观电磁现象,但由于它们是规范变换可变的,因而它们却又提供了过多的信息,就是说,也包含了一部分没有用处的非物理的信息。所以只有在规范条件约束下的势才能保证既能描述全部电磁现象,又很少(并非完全没有!)提供多余的非物理信息。在对这些条件作出全面的分析后,阿哈伦诺夫和博姆断言:在量子力学中,直接进入基本方程的是势,而不是场强,电磁势有直接可观测量的物理效应,是实实在在的物理量;在没有场强而只有电磁势作用的情况下,由于相位的变化仍能导致干涉条纹的移动,微观电磁现象正是不可积相因子的规范不变的表现,这就是 A- B 效

一致。就是说,是 10^3 这个可公度性的物理常数把微观世界的粒子和宏观世界的宇宙紧密地联系在一起,使最小和最大的世界和谐地井然有序地运行。

人们通过细致的计算还可以发现:宇宙总质量与质子质量之比约为 1.2×10^{78} ,恰为 10^{39} 的平方;行星大小正好是宇宙大小与原子大小的几何平均值;人的质量恰巧是行星质量与质子质量的几何平均值;宇宙的大尺度和中子星的尺度之比十分接近宇宙中所包含的粒子总数和恒星内部所包含的中子数之比;标志恒星演化结局的两个重要质量极限,即钱德拉塞卡质量和奥本海默质量竟是由基本粒子的物理常数所确定的。宇宙中光子和重子数之比亦与 10^{39} 有关等。种种数据表明宇宙中各个层次结构之间存在着十分和谐的内在关系。物质具有一定的层次结构,是因为物质的存在及运动需要一定的空间和一个量变到质变的时空区域,需要较之稳定的电磁引力维系它们,也只是一组特殊物理常数的存在,宇宙才有可能演化出生命和智能,才能使宇宙在特定层次和特定时刻“组合”了人类。并时

时刻刻对人类施加影响。

物质各层次间除具有 10^3 数量级的相关性,同时各个层次还应有其自己的运动规律。例如,依据目前已确认的科学事实,原子核与电子通过电磁相互作用而结合成原子,若干原子通过电磁相互作用而结合成分子,这两个层次的规律性由原子物理、量子化学研究;卫星、小行星的物质层次由经典物理学和经典化学来研究;星系、星系团的规律由相对论星系动力学和宇宙学研究;生物大分子所构成的细胞是生命体的形态结构和生命活动的基本单位,其规律性由分子生物学、细胞学研究;个体、生物群落及其生活的无机环境构成生物圈,其规律性主要由个体生物学、生态学和环境科学等研究。

总之,物质层次结构间 10^3 数量级关系,把一个统一、完整、和谐、有序的宇宙展示在我们面前,让我们看到的是美丽、博大、神秘的世界。

(闫正一、王培伟,山东省枣庄市第二中学 277400; 金士美,山东枣庄市泥沟镇教委 277400)

应。我们可以将其更简单地描述为：在无场强的情况下，由于电磁势的变化导致量子干涉条纹移动的效应，称为 A- B 效应。

A- B 效应的实验分析与验证

1959 年，阿哈伦诺夫和博姆在理论上设计了一套类似于电子双缝衍射的实验装置，不同之处在于缝屏后面两缝之间放置一个螺线管，通电后管内磁感应强度 $B=0$ ，但磁矢势 $A \neq 0$ ，如图 1 所示。阿哈伦诺夫和博姆的解释是：通电后，即是粒子路径限制在场强 E 、 B 为零的区域，粒子不受定域场强的动力学作用，但电磁势仍会影响到粒子的相位，导致两束电子产生相对相位差，从而导致干涉条纹极大值与极小值发生一个平移，改变了双缝干涉的极值位置，由于这个位相因子并不改变单缝衍射的强度分布，所以条纹在移动时，诸条纹极值的包络线仍不变，衍射花样的图形并不发生变化。但由于极值位置的变化同样可以观测到宏观物理效应。

对于 A- B 效应的真实实验验证是 1960 年由实验物理学家钱伯斯 (R. G. Chambers) 首先完成的，钱伯斯的实验装置如图 2(a) 所示，点源发出的电子束入射到电子双棱镜上，它的结构是两个接地平板间有一处于正电位的细丝，入射的电子波从丝的两侧经过，被吸引而会聚发生干涉，在下面的平面上形成干涉图样。一个直径约 $1\mu\text{m}$ 的磁化铁尖细丝，其一端是锥状尖端，它内部及外面的磁感应线如图 2(b)，没有尖细丝时两束电子波会聚于垂直于双棱镜细丝的平面内，由于尖细丝外的磁场，两侧的电子受到相反方向的磁场的偏转力，它们会聚的平面和双棱镜细丝不再垂直而成一定角度，因而干涉条纹就倾斜了。图 2(c) 上方的一对箭头，在锥状尖端前方（没有磁通）和后侧（磁通限于尖细丝内）没有磁场，干涉条纹仍然平行于细丝，中间的倾斜正好在两端和平行的条纹相连，表示了由于尖细丝内磁通产生的条纹移动。此后，在 1962 年，M Ilerrstedt 和 Bayh 也用类似的方法，通过连续记录条纹移

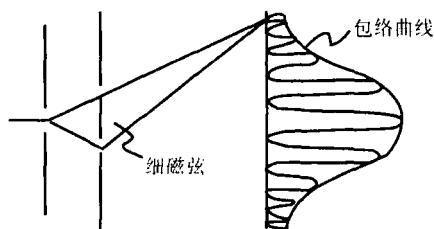


图 1

动的方式验证了阿哈伦诺夫和博姆的预言。

需要指出的是，A- B 效应提出以后，在近 30 年的过程中一直存在着比较大的争论，一方面有许多工作集中在对实验的重新解释上，另外一方面则是对 A- B 效应理论工作本身的怀疑，认为它是“数学的编造”。直到 1986 年，情况才发生了根本性的变化。“判定性”的实验是殿村 (A. Tonomura) 和他的合作者用超导体包围的环形磁体所作的电子全息干涉图，这项研究充分反映了实验技术和工艺对基础物

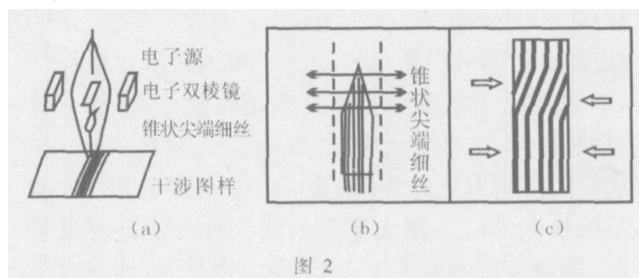


图 2

理研究的重要作用，集中解决了对 A- B 效应持怀疑态度的物理学家们的意见，对 A- B 效应的正确性作了全面的验证，令人信服地证明了 A- B 效应是确实存在的，而受到了一致公认。

A- B 效应完全是从量子力学基本原理出发的，并未提出新的原理或假设，但它的意义却是非常深远的。它明确地显示：在量子理论中，对于电磁现象而言，场强是欠定的，而势对电磁现象是超定的，电磁势具有确定的物理意义，不可积相因子可以以一种物理的事物而表现出可观测的物理实在，而此前的宏观电磁现象只是电磁势场局域性质的物理体现，从而大大加深了人们对量子力学以及电磁场的本质的认识。

(杭州浙江科技学院物理系 310023)

