

浅谈“隧道效应与扫描隧道显微镜”的课堂教学

喻莉 邓磊 何艳 罗志娟

(空军预警学院基础部 湖北 武汉 430019)

(收稿日期:2018-08-09)

摘要:为了让非物理专业大学生能对近代物理以及现代科学知识有所了解,并培养其一定的科学思维和科学方法,本文重点介绍了量子力学中隧道效应的基本理论和扫描隧道显微镜研发制备的科学探索.针对学生数学知识相对薄弱的特点,本文在讲解隧道效应时,着重突出了其物理原理与物理思想,而忽略了相关的数学计算.同时,为了让学生深刻地体会到物理学对现代科学技术发展的影响,引导和激励他们有将科学服务于人类的意识,本文还重点介绍了扫描隧道显微镜在人类认识和改造世界过程中所起到的显著作用.

关键词:隧道效应 扫描隧道显微镜 应用

大学物理课堂教学重在让学生掌握物理学的基本理论和方法,具备一定的科学思维方法与科学探究精神,提高将科学服务于人类的意识.下面我们将以大学物理中“隧道效应与扫描隧道显微镜”这一课为例,探讨如何在教学中加强对这几个方面素养的培养.

1 隧道效应原理介绍——理论学习 知识增长

1.1 提出问题 引入主题

《聊斋志异》中的故事离奇古怪,其中有一位崂山道士,他能轻松地使用穿墙术从墙外进入屋内,给我们留下了深刻的印象.穿墙术,在影视科幻片中我们也经常见到,那穿墙术是否真的存在呢?谁都没见过.然而,在微观领域“穿墙术”早已实现,而且已经对我们人类认识世界和改造世界起到了极为重要的作用.

本内容所要介绍的扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope,简称 STM)利用的正是电子穿墙术.

1.2 建立模型 解决问题

在1905年,爱因斯坦提出了光的波粒二向性学说,即光既具有波动性,又具有粒子性.之后,德布罗意在此基础上,提出了实物粒子也具有波粒二向性,并被实验所证实.也就是说,我们可以实实在在看到

的物体,大到天体,小到原子分子,都是具有波动性的.但这种波与普通的机械波(如水波、绳波)和电磁波不同,它的强弱体现的是物体在某处出现的概率大小.下面我们在此基础上来探讨一下微观世界中神奇的穿墙术,也就是所谓的“隧道效应”.大家假想有一个微观粒子(可以是电子或是原子等),具有一定的能量,换句话说它具有一定的速度,向前走着走着突然遇到了一堵很高的墙(势垒),如图1所示.

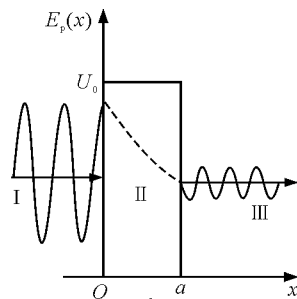


图1 隧道效应

微观粒子开始时位于 I 区域,想到达 III 区域,但在区域 II 有一堵墙.粒子的能量太小,不足以使它能越过这堵墙,按照经典理论,粒子将只能被墙反射回去,但在量子力学中,微观粒子是具有波动性的,那它到底能不能穿过去呢?这就要看粒子的波函数在区域 III 的概率,或者说粒子的穿墙几率了.根据量子理论中薛定谔方程求解得,透射率

$$T = e^{-\frac{2a}{\hbar} \sqrt{2\mu(U_0 - E)}}$$

其中 a 为势垒宽度(墙的厚度), U_0 为势垒高度(墙高), E 为粒子的能量. 可见, 即使 $E < U_0$, T 也可能大于零. 也就是说, 粒子的能量即使不足以越墙而过, 但在墙中似乎有一条隧道, 能使大量粒子中的少部分粒子穿过. 人们形象地将这一微观粒子的穿墙术现象称为隧道效应. 当然, 这里的隧道效应并不是说真的有隧道存在, 这只是微观世界中一种量子效应而已.

1.3 数值举例 加强理解

粒子的穿墙几率究竟有多大呢? 以电子为例, 当穿越墙(势垒)所需要的能量与粒子实际能量间的差值为 5 eV, 墙的厚度为 0.1 nm 时, 通过计算穿墙几率为 0.1, 就是说如果有 100 个粒子入射, 其中就有 10 个粒子是能透射过去的, 这个几率还是比较大的, 可见, 穿墙术在微观世界中真实存在. 但是当墙厚增加到 0.2 nm 时, 穿墙几率就下降到了 0.012, 100 个粒子中就只有 1.2 个粒子能穿过去了, 而当墙厚增加到 0.5 nm, 1 nm 时, 就可以基本认为 $T=0$, 电子失去了穿墙能力. 用同样的方法, 我们也可以来看看为什么宏观世界中没有人能穿墙而过. 我们假设: 一个成年人体重 60 kg, 最高能跳 6.999 m, 面前有一堵高墙, 墙高 7 m, 厚度为 1 mm, 代入透射率公式计算得, 其穿墙几率为 $10^{-6.9 \times 10^{31}}$, 也就是说一个人如果撞击墙面 $10^{6.9 \times 10^{31}}$ 次, 也只有 1 次能穿墙而过, 几率非常非常的小. 所以即使你的寿命足够长, 长到和宇宙年龄一样(大约 10^{18} s), 并且不停地撞墙, 每秒撞 100 次, 撞墙次数高达 10^{20} , 穿墙的可能性也几乎为零.

2 STM 的发明 —— 科学探究 能力提升

2.1 背景知识 自主探索

课前给学生布置任务, 让学生广泛查阅书籍和文献, 了解宾尼和罗雷尔发明 STM 的历史背景, 了解当时表面形貌探测技术的发展概况, 总结各种探测技术的优缺点, 再通过自主分析归纳得出表面探测技术所急需解决的难题. 让学生在自主对知识的归纳、分析、总结的过程中, 逐步提高其发现问题、分析问题和解决问题的能力. 课堂实施过程如下.

(1) 学生代表一介绍历史背景. 正在研究超导隧道效应的宾尼(Binning G) 和罗雷尔(Rohrer H)

在一次偶然的机缘中看到了物理学家罗伯特·杨撰写的一篇有关“形貌仪”的文章, 其中有关驱动探针在样品表面扫描的方法深深地吸引了他们.

(2) 学生代表二总结归纳各种探测技术的优缺点. 通过分析归纳, 表面探测技术急需解决的两个问题是: 不损坏样品表面; 提高 X, Y, Z 3 个方向的测量分辨率, 使其均在纳米级范围内.

(3) 教师激发学生思考: 宾尼和罗雷尔是如何将看似无关的理论与技术结合起来, 从而解决以上两个问题的? 沿用探针式测量方法, 为避免探针直接接触对样品的损害, 探针和样品表面间就必须留有一定的间距. 能否将此绝缘间距看作是探针与样品表面间的势垒, 然后再利用隧道效应呢?

2.2 原理介绍 适当引导

图 2 就是 STM 的工作原理简略图.

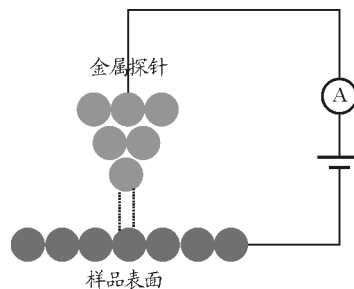


图 2 STM 的工作原理

将待测样品和 STM 的金属探针分别作为两电极接入某一电路中, 为保证水平方向(XY 方向)上的原子分辨率, 探针的针尖一般就一两个原子. 让两电极通过真空隔开, 当其间加一电压时, 从经典理论来看, 回路中不会有电流产生. 但根据隧道效应, 如果样品和探针间的距离(势垒厚度)小于 1 nm 时(Z 方向), 样品表面的电子是有一定的几率穿过势垒到达金属探针的, 有电子通过, 回路就会产生电流, 我们把该电流称为隧道电流. 显然, 两者间的间距越小, 电子的穿墙几率越大, 穿过的电子越多, 产生的隧道电流也就越大. 所以我们可以通过测量回路中电流的大小, 从而得到样品表面的高低起伏变化. 这就是 STM 的恒高工作模式^[1], 如图 3(a) 所示. 保持探针在同一水平面上移动, 由于原子表面的凹凸起伏, 表面各处所对应的样品和探针间的距离就各不相同, 所以回路中电流也就不同, 根据各处电流的大小, 我们就可以知道其样品表面的形貌了.

激发学生思考: 如果样品表面的起伏太大会怎

么样? 学生回答: 此时探针就会碰到样品, 探针和样品都会被损坏. 进一步提问: 这一问题又该如何解决? 引导学生回答: 在样品与探针间的距离保持不变的情况下, 让探针跟随样品表面的高低起伏一起变化. 样品与探针间的距离不变, 实际上也就是让电流不变. 从而引出另一种更加合理更加科学的工作模式——恒电流模式, 如图 3(b) 所示. 由于此时探针与样品表面的间距不变, 所以探针的运动轨迹反映的就是样品表面形貌.

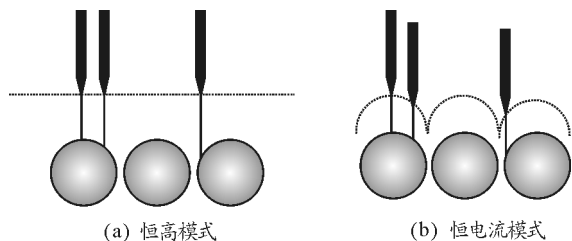


图 3 STM 的工作模式

2.3 科学方法与思维

STM 的诞生让我们看到了建立不同知识点间联系的重要性. 可见, 我们在学习知识的同时, 还应该构建各知识点间的相互联系, 同时学会与其他知识进行交叉与融合, 进行更深入的思考, 利用更新、更全面的观念去分析问题、解决问题. 量子隧道效应和表面探测两个领域看似无关, 实则可以构建为一个统一的观念团. 联想主义心理学家赫尔巴特的“统觉论”认为, 任何新的观念的取得都是“统觉”的结果, 而“统觉的主要表现则在于观念的综合, 把许多个别的不同的观念联合成一个观念团”^[2]. 此外, 心理学中学习迁移理论也认为, 无论是学生的学习还是科学家的科学探索, 都不是孤立知识的学习和研究, 知识和能力的提升应该是“已获得的知识、技能、策略或学习态度对学习新知识、新技能和解决新问题所产生的一种影响”^[2]. 宾尼和罗雷尔正是在科学探索中, 将已获得的量子隧道效应理论很好的应用到了表面探测技术, 才克服了其它表面探测技术的局限性, STM 才得以问世.

3 STM 的应用——激发兴趣 使命担当

科技, 源于人类, 用于人类, STM 也不例外.

由于隧道电流对势垒高度十分敏感, 所以 STM 的分辨率非常高, 可以达到 0.01 nm. 可见, 通过 STM, 人类可以真正意义上触摸原子, 揭开原子的

神秘面纱. 那 STM 到底对人类产生了怎样的影响呢?

3.1 形貌结构探测 认识世界

目前, STM 的应用非常的广泛, 涉及到的领域包括材料、物理、化学、生物、医学等等. 比如说, 我们可以通过 STM 来观测某个物品的表面原子结构, 观测材料表面的吸附、缺陷等情况, 帮助我们分析材料的物理、化学性质. 图 4 就是人们观测的碘原子吸附在铂表面时, 材料表面的吸附情况. 利用 STM, 铂表面的碘原子缺陷清晰可见, 这对分析材料的性质起到了非常重要的作用. 在生物、医学领域, 也随处可见到 STM 的身影. DNA 作为携带生命遗传物质的分子, 早期关于其结构的探索, 在实验上主要是采用 X 射线衍射技术, 这种方法在反映 DNA 结构真实性方面存在着很大的缺陷. 但随着 STM 的出现, 我们可以清楚地看到 DNA 的真实结构, 在 1990 年, 中科院化学所就利用 STM 在世界上首次拍摄到了三链状脱氧核糖核酸的 DNA 变异结构, 为生命科学的发展起到了非常重要的作用.

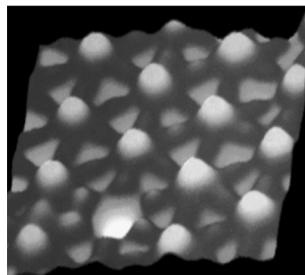


图 4 吸附在铂表面的碘原子阵列图

3.2 粒子操纵 改造世界

我们除了可以通过 STM 认识世界外, 还可以用它来改造世界, 这一过程主要是利用 STM 对原子和分子的操纵来完成的. 20 世纪 90 年代初, IBM 的科学家利用 STM, 用 35 个 Xe 原子在 Ni 表面拼出了世界上最小的广告“IBM”. 首次展现了人类对原子操纵的可能性, 也标志着纳米科学技术的正式诞生. 通过 STM 对原子的操纵, 我们可以制造出很多纳米级的量子器件. 如图 5 所示^[3], 这是由 Loth 等人利用 STM 操纵设计的首个原子级存储器. 它是利用 12 个 Fe 原子两两并排排列所组成的原子级存储器, 可以存储 1bit 的容量, 而普通的磁盘存储器要上百万个原子才能存储 1bit 的信息. 可见其存储效率将会被大大的提高, 这对存储设备的小型化发展来说无

疑是一个可喜的进展.目前,这一相关研究在实验上又得到了进一步的突破^[4].除了可以通过STM来制造纳米量子器件外,我们还可以用它来操控量子器件.美国塔夫茨大学 Tierney 等人利用STM,制造出世界上第一个单分子电机^[5],如果能够很好地控制它,纳米机器人也就离我们不远了.

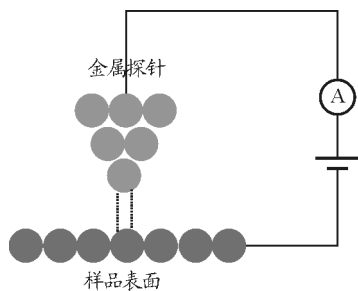


图5 原子级存储器

量子理论的发展将人类的视野带入了纳米级的原子世界,物理学中每一项新理论的突破都必将进一步推动新科技的蓬勃发展.本文通过介绍量子隧道效应理论与当代物理学前沿科技之间的联系,以及它们在生产技术各领域中的应用,培养学生对实际问题特别是当前高新技术中物理问题的兴趣,引导和激励他们解决实际问题的愿望.同时,让学生切实体会到STM在人类认识世界、改造世界中的重要作用,从而培养其有将科学服务于人类的意识,使学

生成成为有理想、有抱负,热爱祖国,有振新中华的使命与担当的有志青年.

4 结论

笔者通过上述方法在本课教学中达到了较好的效果,相信对其他大学物理知识内容的教学也能起到一个较好的借鉴作用.

参考文献

- 1 东南大学等七所工科院校. 物理学·下册(第六版). 北京:高等教育出版社,2014. 404
- 2 单力丽. 略论历史教学中的学科交叉与融合:[硕士学位论文]. 上海:华东师范大学,2010. 6
- 3 S. Loth, S. Baumann, C. P. Lutz, D. M. Eigler, A. J. Heinrich. Bistability in Atomic-Scale Antiferromagnets. *Science*. 2012,335:196 ~ 199
- 4 F. E. Kalf, M. P. Rebergen, E. Fahrenfort, J. Girovsky, R. Toskovic, J. L. Lado, J. Fernández-Rossier, A. F. Otte. A kilobyte rewritable atomic memory. *Nature Nanotechnology*. 2016,11:9269 ~ 29
- 5 H. L. Tierney, C. J. Murphy, A. D. Jewell, A. E. Baber, E. V. Iski, H. Y. Khodaverdian, A. F. McGuire, N. Klebanov and E. C. H. Sykes. Experimental demonstration of a single-molecule electric motor. *Nature Nanotechnology*. 2011,6:625 ~ 629

The Classroom Teaching on Tunnel Effect and Scanning Tunnel Microscope

Yu Li Deng Lei He Yan Luo Zhijuan

(Department of Basics, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019)

Abstract: In order to make non-physics majors understand modern physics and modern scientific knowledge, train their scientific thinking and method, the basic theory of tunnel effect in quantum mechanics and the scientific exploration of the research and development of scanning tunneling microscopy are introduced. To explain the tunnel effect, our paper emphasizes its physical principles and ideas, but neglects the relevant mathematical calculation. In addition, To make students understand the influence of physics on the development of modern science and technology, and then inspire them to have the consciousness of utilizing science to serve Human Beings, our paper also focuses on the significant role of scanning tunneling microscopy in the process of human for understanding and reforming the world.

Keywords: Tunnel Effect; The Application of Scanning Tunneling Microscope