

模拟电子衍射的 CAI 课件

王祖源 邱丹

(西南交通大学 成都 610031)

如何理解微观粒子的波粒二象性, 如何将经典观念上对立、排斥的波和粒子两个概念统一于一体, 是大学物理教学中的一个难点. 电子衍射实验说明电子具有波动性, 它是证明德布罗意波存在的重要实验之一, 一般的教材都对此作了介绍, 并给出了相应的照片. 但是, 同学们在学习过程中却感到很抽象, 对其衍射条纹的形成过程以及电子的波动性和粒子性的统一很难理解. 利用微机软件, 则可以很方便地模拟出电子通过单缝或双缝时在接收屏上形成条纹的过程, 同时表现出了与经典粒子和经典波在行为上的区别, 帮助同学加深对微观粒子波粒二象性的理解.

一、课件模拟的物理规律和处理方法

设想一狭缝, 其宽度 a 与电子的德布罗意波长数量的相当. 当电子通过这样的狭缝时会产生衍射图样, 其强度分布规律与光的单缝衍射规律相同. 用 p 表示概率密度 (接收屏上电子数的面密度), 则:

$$p = p_0 \frac{\sin^2 \delta}{\delta^2}, \quad \delta = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

p 与 δ 的关系如图 1 所示. 当电子一个一个地穿过狭缝时, 表现出随机规律; 而时间足够长, 电子数足够多时, 便显示出这种衍射的规律.

同理, 让电子通过缝宽与其德布罗意波

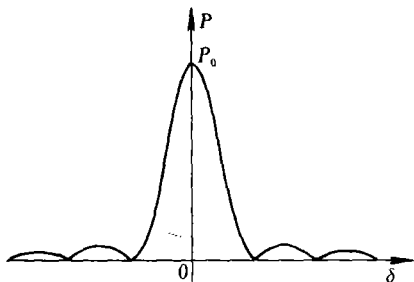


图 1 电子通过单缝后的概率分布

长数量级相当的双缝时, 将得到与光的双缝干涉光强分布相同规律的干涉条纹. 至此, 屏上电子概率密度可表示为: $p = p_0 \cos^2 \delta$

p 与 δ 的关系曲线如图 2 所示. 经过足够长的时间和足够多的电子数, 其屏上将出现电子的这种干涉规律.

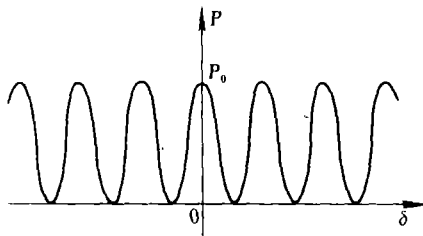


图 2 电子通过双缝后的概率分布

我们在设计微机模拟演示过程中, 采取了微观粒子与经典粒子分别经过单缝和双缝进行比较的方法. 为了形象地演示出接收屏上条纹的形成过程, 设想粒子打在记录底片上用一个小亮点记录其位置, 以亮点的疏密表征到达记录屏上的粒子数分布. 粒子数较少时, 随机分布, 表现出偶然性. 随着粒子数的增多, 粒子概率分布的规律性增强, 粒子足够多, 便显示出必然的规律性. 对于经典粒子, 经过狭缝后无衍射现象, 而电子经过狭缝后则会出现单缝衍射条纹或双缝干涉条纹. 通过这种模拟, 既显示了屏上条纹形成的过程, 又给出了经典粒子与微观粒子的区别.

二、程序设计和结果显示

1. 电子衍射模拟方法

对于经典粒子, 设置一放射枪放出粒子, 计算出它们的运动轨道和屏上的实际位置, 建立函数, 通过函数显示其运动状况. 对于微观粒子, 设计一灯丝, 让其受热后释放出电子. 利用图 1 和图 2 所示的图形, 建立二维数组, 然后对数组元素进行抽样, 并根据抽样结果决定是否在接收屏上画点 (代表粒子). 设置一随机函数 $f(p)$, 其最大值为 H , 产生分布的自变量 δ 的范围为 $[\delta_1, \delta_2]$, δ 方向上两点间的距离为 $d\delta$, p 方向上两点间的距离为 dp , 则有:

- (1) $H_\delta = H / dp$ $H_p = \delta_2 - \delta_1 / d\delta$
 (2) $\delta' = \text{Random}(H_\delta) * d\delta$ $p' = \text{Random}(H_p) * dp$. 如果 $p' > f(p)$, 则转至 (2)
 (3) 返回 p'

由于 $\text{Random}(x)$ 中 x 的范围为 $0 < x < 65535$, 因此, 对 dp 和 $d\delta$ 要有一定的限制, 其范围为:

$0 < dp < H / 65535$ 和 $0 < d\delta < (\delta_2 - \delta_1) / 65535$, 由此便可以方便地在屏幕上画出随机分布图样.

为了增强演示的直观性和生动性, 在计算机屏幕上画出了射线源、缝和接收屏的立体图, 用动画模拟粒子穿过缝后打到记录屏上的过程. 经典粒子的运动, 有明显的中间路径, 着重表现其粒子性. 电子运动时, 则表现出一种无确定轨道的随机运动, 先像处理经典粒子那样计算出可能的“轨迹”, 实际显示的位置却是在其轨迹附近随机出现. 以一种朦胧的方式推进电

子, 即可区别于经典粒子的运动.

2. 程序流程

按照上述设计思想, 在程序设计中首先是要随机产生经典粒子或电子, 然后让其通过狭缝, 进而继续运动直至打到记录屏上. 在屏幕上设置一个记录器, 以“ $N = \dots$ ”来表征打到记录屏上的粒子数. 以电子衍射为例, 其程序流程图如图 3.

3. 程序运行结果

按照以上的流程, 设计出了在 VGA 显示器、286 以上微机运行的程序, 经反复运行得到了满意的结果. 我们得到了经典粒子和电子经过狭缝后的两组记录底片.

关于经典粒子经过狭缝后到达底片的记录片, 第一张记录了前 25 个粒子经过上单缝后打在底片上的分布, 第二张记录了前 784 个粒子通过上单缝后打在记录底片上的分布, 第三张则记录了通过下单缝的前 773 个粒子在底片上的分布, 第四张记录了诸多粒子经过双缝后到达底片上的分布. 这组底片记录的结果显示出: 经典粒子经过单缝后呈现正态分布, 无衍射条纹; 经典粒子通过双缝后也只能是两单缝分布的非相干叠加.

关于电子经过狭缝后在底片上的分布: 第一张记录了前 46 个电子通过上单缝后在底片上出现的位置, 这是一个明显的随机分布, 第二张底片记录下的是前 3391 个电子通过上单缝后出现的衍射图样, 它是按图 1 的规律表现出来的, 这是对电子波动性的证明. 由此可见, 单个电子的运动是无规律的, 但大量的电子通过单缝后却表现出了波动特性的分布规律. 同样, 第三张底片记录的是大量电子通过下单缝后出现的衍射图样, 第四张底片则记录了电子通过双缝后发生相干叠加, 进而出现双缝干涉条纹, 这正如图 2 所示的规律.

以上结果表明: 用计算机模拟演示微观粒子的运动, 可以有效地表现出微观粒子的波动性, 详尽地显示微观粒子干涉、衍射条纹的形成过程, 帮助同学认识微观粒子与经典粒子的区别, 深刻理解微观粒子的波粒二象性.

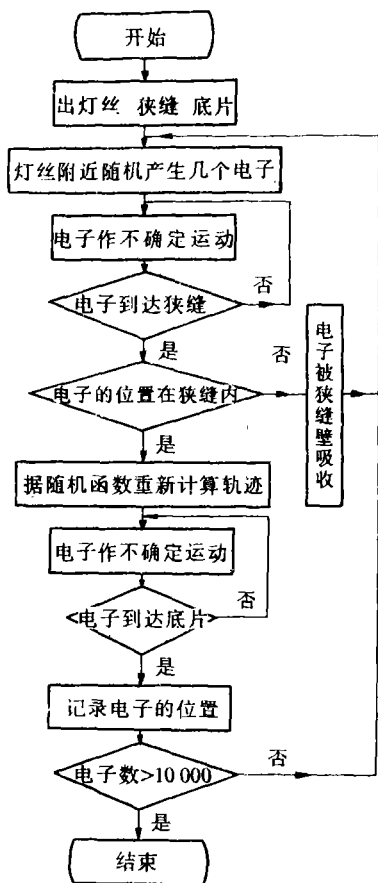


图 3