

重力场致量子效应的首次成功观测

许 可

(清华大学化学系 2000 级 北京 100084)

量子力学指出,陷于任何势阱中的粒子,应处于束缚态并具有分立能级,在较低能级处会出现明显背离经典力学理论的量子化效应。重力作为常见力,很早就有人从理论上研究过它可能对粒子产生的量子化影响,并预言出陷于重力场势阱中的粒子各分立能级的大小。然而,与电磁力、核力相比,重力实在太小,其量子效应难于观测。但最近内斯维泽夫斯基(V. V. Nesvizhevsky)等在《自然》杂志(Nature 415, 297-299[17 January 2002])上发表报告,宣告首次观测到了重力场所导致的量子效应。

本次实验之所以取得成功,是因为设计合理、严密,并采用了较先进的技术——超冷中子(UCN)。

实验设计思路

本实验的目的是观测重力场所导致的量子效应。但单靠重力自身是无法建立起势阱的,它只会使粒子一直竖直向下运动。而如果用反射镜将粒子限制在镜面上方,反射镜的斥力就能和重力场建立起一个势阱,将粒子束缚于其中。粒子的波函数将在镜面反射并发生自干涉,形成驻波,此时解出的波函数将成为与时间无关的定态波函数。粒子在竖直方向上处于一维束缚态,能量只能取分立的能级,且不同能级对应不同的本征定态波函数。若能观测到这些分立的能级,便可验证量子化效应的存在;这就是实验设计的主体思路。

实验对象的选择是实验设计的关键一环,也是

更多,而且要求精度更高。上述各种类型反应堆的设计建造离不开对于裂变反应规律的定量了解。目前,虽然完成了大量与裂变有关的实验测量,但还远远不能满足反应堆的技术需求。缺少完整精确的核数据已成为反应堆向小型化、经济化、高效化发展的一大障碍。目前虽然已经有了不少的裂变理论模型,但是在现有条件下,大量的相关实验数据还无法测量,而这些数据也没有任何理论能够定量预言。

因而裂变理论还有大量课题尚待研究;例如重粒子引起的裂变、非稳定核裂变的物理描述、裂变产额与入射能量的关系;裂变后的级联衰变物理现象

本次实验的成功之处。本实验所用的粒子应具有以下性质:

1. 必须选用电中性粒子来完成实验,否则电磁力将掩蔽掉重力效应,因为重力与电磁力相比太小。
2. 为使量子效应显著,粒子质量不能太大。
3. 粒子应当稳定,具有较长寿命,以便观测。

正是出于以上三点考虑,本实验采用了中子,它基本符合上述要求。但若使用普通中子源,仍存在问题,因为普通中子源射出的中子速度过大。这将导致两方面的问题:

1. 由于反射镜的表面势垒很小,速度过大的中子只有以小角度入射,才能被其反弹而控制在镜面上方,其余将穿透或被吸收,这就使实验难以进行。
2. 中子速度过大使得观测时间 $\Delta\tau$ 过短。由测不准原理, $\Delta\tau \cdot \Delta E \geq \hbar/2$ 。若 $\Delta\tau$ 太小,则 ΔE 太大,测得的能量值分辨力差,达不到实验要求。

因此,必须尽量减小中子的速度。实验中采用了超冷中子(UCN),其速度仅约10m/s,基本解决了上述问题。若能进一步减小中子速度,从而延长观测时间 $\Delta\tau$,可能会得到更好的实验结果。

实验过程

按以上设计思路,理想的实验方式应是让中子在镜面上方竖直落下,然后观测前述的能级分立现象;但是难以实现。实际一些的方法是让一束中子在反射镜上方近乎水平地飞过。中子除重力和反射

的定量描述,如裂变碎片的各种衰变行为以及中高能核反应伴随核散裂中的非平衡态裂变过程。特别是目前上述裂变模型理论都不能解释裂变的质量和电荷分布,根本的改进是要建立一种新的模型理论,它可以将裂变描述为各种裂变碎片处理成为重离子发射,并伴随其他各种粒子发射的竞争。只有这种新的模型理论才能同时完整解决裂变截面,裂变碎片角分布,以及质量和电荷分布,瞬发中子数等一系列问题。因而在裂变反应领域,无论是在核反应机制研究方面还是在核工程应用方面都有重要的现实意义。

镜斥力外不受其他力作用,可将其速度分解为竖直分量和水平分量两部分来讨论:重力场和反射镜的斥力只对竖直分量产生作用,并在这一方向上形成势阱,于是在竖直方向上应当产生前述的能级分立现象;在水平方向上,中子不受外力作用,且与实验观测目的无关,可不予考虑。

实验具体是这样操作的(见图 1):在反射镜上方装有水平放置的中子吸收装置,该装置到镜面距离 Δz 可以调节,于是在反射镜和吸收装置之间形成一道高为 Δz 的狭缝;现将一束超冷中子(UCN)在镜面上方略斜向上射出,由于重力作用,中子将沿一条抛物线射到镜面上并被反弹;竖直方向上能量高于 $mg\Delta z$ (m 为中子质量, g 为重力加速度)的中子在反弹过程中由于到达吸收装置的高度时仍具有速度而被吸收;只有竖直方向总能量低于 $mg\Delta z$ 的中子才可以通过,这就控制了能够通过狭缝势阱的中子在竖直方向的能量;狭缝后是中子检测器,可记录不同 Δz 时中子得以通过的数量 N 。

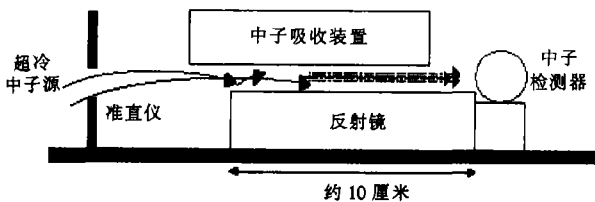


图 1 实验装置示意图

按量子力学理论,如果 $mg\Delta z$ 比中子在竖直方向上可能具有的最低能量(即第一能级,零点能)还小,则所有中子均能量过大,被吸收而不能通过狭缝;当 Δz 增大,使 $mg\Delta z$ 恰等于中子的最低能级时,处于最低能级(第一能级)的那些中子将可以通过, N 就会迅速增长; Δz 继续增大时,由于中子的能量不能取介于第一、第二两能级之间的值, N 将不再明显增长;直到 $mg\Delta z$ 达到第二个能级时,处于第二能级的中子得以通过, N 再次迅速增长。于是, N 将持续这样阶跃式地增长,当 Δz 很大之后将趋近于经典力学模型的 $N \sim \Delta z^{1.5}$ 。本实验就是要验证这种阶跃式增长的存在,从而证实量子力学理论在重力势场中的适用性。

实验结果及结论

实验结果和量子力学理论所预期的基本吻合,尤其是观察到了 $mg\Delta z$ 到达最低能级之前没有任何中子通过,这充分说明了零点能的存在。实验者将实验结果绘成 $N - \Delta z$ 图线(见图 2),并与理论预期

值相比较。

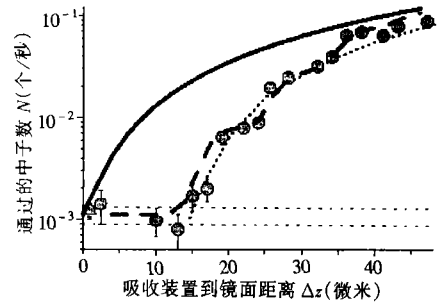


图 2 $N - \Delta z$ 图

图中,虚弧线是量子力学理论计算值;虚点线是仅考虑第一能级(零点能)时的理论值;实弧线是经典力学(不考虑量子效应)理论值;实心圆是测得数据。水平的 3 道线表示背景噪音(即中子源关闭时检测器的空白示数)

我们可以看到,在第一能级(零点能)处 ($mg\Delta z = E_1 \approx 1.41\text{peV}$, 对应于 $\Delta z \approx 15$ 微米),中子由不能通过变为大量通过, N 变化得很快;这就确证了零点能的存在,重力势场中的量子效应首次被清晰地观察到了。后面的能级也能大致分辨出阶跃的迹象,与量子力学的预期结果(虚弧线)基本相符,但(实验者自己也指出)数据还不够充分,变化趋势尚不够明显。瑕不掩瑜,本实验已经基本肯定了量子力学理论在重力势场中的适用性。这并不是件小事,它进一步验证了量子力学的普适性,对揭示自然界相互作用的基本规律具有深远意义。其结果及实验手段还可能用于精确验证引力质量是否严格正比于惯性质量(即精确测量不同粒子在相同引力场下是否具有相同加速度),以及中子是否严格电中性(即观察它们之间是否确实不存在任何静电作用)。

