

# 薛定谔猫佯谬与重离子耗散反应激发函数的测量

王 琦 董玉川 李松林 田文栋

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

量子力学的建立与相对论的提出,是 20 世纪物理学最伟大的成就,它们构成了现代科学的理论基础,也是当代人类物质文明的理论基础。有趣的是,一方面量子理论已经为无数的实验事实所证实,到目前为止甚至还找不到一个与它的预言相悖的实际事例;另一方面,量子力学的基本概念又与人们对现实宏观世界的传统认知极不协调。这种不协调实质上是对量子理论的根基的质疑。所以,从量子力学诞生前后一直到现在的近百年间,对量子理论的争议一天也没有停止过。其中,最著名的议题之一就是所谓的薛定谔猫佯谬。

1935 年,薛定谔提出了一个思想实验,人称薛定谔猫。他设想有一只猫被关在一个笼子里,这个笼子里有一个毒气瓶,瓶的开关由一个放射性原子装置控制。当这个装置中的原子处于激发态时,瓶子关闭,猫是活的;当原子跃迁到基态时,伴随有光子释放,毒气瓶被打开,猫立即被毒死。薛定谔用下列波函数来描述这个猫与原子组成的复合体系:

$$|\Psi\rangle = \alpha|\text{活猫}\rangle|\uparrow\rangle + \beta|\text{死猫}\rangle|\downarrow\rangle$$
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

其中,  $|\alpha|^2$  表示原子处于激发态且猫是活着的概率,  $|\beta|^2$  表示原子处于基态且猫是死的概率,这个波函数表示猫处于不死不活的状态。

薛定谔用他描绘的介于生与死之间的猫,不仅

上,无论是量子并行计算还是量子模拟,都本质性地利用了量子相干性,即量子纠缠态的有效保持。失去了量子相干性,量子计算的优越性就消失殆尽。但在实际系统中,量子相干性却很难保持。消相干(即量子相干性的衰减)主要源于系统和外界环境的耦合。因为在量子计算机中,执行运算的量子比特不是一个孤立系统,它会与外部环境发生相互作用,其作用结果即导致消相干。有研究表明量子相干性的指数衰减不可避免。一旦相干性丢失就会引起运

想形象地说明量子力学的基本原理,而且想袒露他对量子理论的疑惑。我们知道,放射性元素中的原子不是在某一特定的时间点蜕变,而是以某种概率在某一特定的时间段内发生蜕变。换句话说,一个特定的原子的蜕变在时间上是不能准确预报的。量子理论认为,无论是粒子、光、力,还是整个世界,都具有这种不确定因素。一个粒子可以同时分布在几个不同的位置;一道光可以在这里,而同时又在另一个地方,它们相互之间能够以超过光速的速度沟通;即使真空中也存在许许多多这种不确定的微粒和波。对笼子里的猫来说,因为没有人知道原子蜕变的准确时间,所以外面的观察者也没有人知道里面的猫此时此刻是活着还是已经死了。从某种意义上说,这只猫生与死并存,或两者都无从谈起,它处于一种介于生与死之间的混合状态之中。而在现实的宏观世界中,猫非死即活,两者必居其一。猫是活的,猫也是死的,显然有悖于我们日常的生活经验,令人难以接受。

哥本哈根学派的解释是,一旦进行测量,这种奇特的、既模糊又不确定的世界,顿时就会转变为我们习以为常的、确定的可知世界,而进行测量非得采用宏观的测量仪器不可,这种遵循经典物理学定律的仪器,破坏了量子状态的叠加,它使得量子状态塌缩。这时,量子物理靠拢经典物理,微观世界过渡到

算结果出错,这就是量子错误。因此,有效地保持量子纠缠态及相干性是量子计算机进行可靠的量子运算的基本保证。

量子信息学的发展方兴未艾,最突出的特点是量子物理学的原理和计算机科学的交融和相互促进,更多的有如量子纠缠这样的量子效应也会成为当代人们耳熟能详的名词。人类也将更加积极地致力于量子技术的开发,推动科学和技术更迅速地发展。

宏观世界。在日常的宏观物理现象中,由于观察的体系很大,两种状态的不定态的寿命太短,以至于我们很难观测到量子态的叠加现象。

对于那只猫而言,打开笼子朝里面张望的观察者就是“宏观测量仪器”。问题在于,处在叠加态的猫的生死并不依赖打开笼子前的“客观存在”,而是决定于打开笼子后的“观察”。这似乎是不合理的,因而称之为薛定谔猫“佯谬”。测量仪器竟然改变了世界,竟然能够变不确定因素为确定因素,变模糊状态为精确状态。这种想法确实异乎寻常,不少科学家为之绞尽脑汁,寻找有效的解释。庆幸的是,几十年来关于量子力学以及它对现实世界解说的各种争论引发了大量创造性的思维,引发了实验物理学家让薛定谔的猫成为现实的不懈努力,这些都极为深刻地影响了现代科学的不断深入与发展。

不久前,我们与意大利南方国家实验室联合完成了一个实验,测量了  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  重离子耗散反应产物的激发函数。入射束流的能量从 114 到 127 MeV, 能量变化步长为 200 keV, 靶子的厚度是  $38\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 用 3 套 ( $\Delta E-E$ ) 望远镜鉴别反应产物的电荷数  $Z$ , 整个探测系统覆盖的角度范围在实验室系是连续从  $10.4^\circ$  到  $57.4^\circ$ 。对反应产物的能谱的耗散部分积分, 作出激发函数, 实验数据按逐个事件、依两体反应运动学从实验室系转换到质心系, 角度分析范围在质心系连续从  $50^\circ$  到  $90^\circ$ , 间隔  $4^\circ$  (质心系角分辨率好于  $4^\circ$ )。

与类似的其他耗散反应实验中的产物一样, 激发函数表现出不平滑的截面涨落结构, 能量自关联函数呈现长程的周期性 with 衰减。特别令人感兴趣的是, 对不同角度的激发函数作角度关联函数的结果显示: 从质心系  $50^\circ$  到  $90^\circ$ , 各个角度  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  耗散反应产物的激发函数之间有强烈的关联, 互关联系数大多在 0.6 以上。不同寻常的是, 角度相干宽度超过了  $40^\circ$ , 角度关联函数相对于中心参考角呈现出明显的非对称性。

按照埃里克森的核反应统计理论, 对于角度之间的关联, 可以用核的相互作用来解释, 其关联角的大小等于擦边角动量的倒数, 在  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  耗散反应的情况下, 角度相干宽度还不到  $3^\circ$ 。至于几十度之间长程的非对称关联, 至今难以找到能够为大家所接受的好的说法。有一种可能的理解, 那就是宏观情况下态的叠加, 即薛定谔猫。

让我们仔细考察一下实验结果。(1) 耗散反应不同于复合核: 复合核的特点是失去记忆, 系统达到了平衡, 其蒸发粒子是各向同性的; 而耗散反应中形成的中间双核系统却始终达不到平衡状态, 产物的角分布是前冲型的, 一般可以用两个明显不同的斜率来拟合。(2) 激发函数不同于角分布: 角分布测量各个角度的反应截面, 这些截面是彼此独立的, 不考虑关联; 而激发函数研究的是不同能量、不同角度的反应截面及其涨落之间的关联。(3) 这里所说的关联, 并不是一个反应事件中出射的不同粒子之间的符合, 而是不同事件出射的相同粒子之间随时间而演化的一种复杂的协同关系。

这就是说, 通过粒子鉴别我们考察的是相同的粒子; 通过对反应机制的分析我们知道产物之间存在相互干涉; 能量自关联函数分析表明产物之间有强烈的关联; 角度关联函数可以分析在同一个时间出射的产物。有理论预言: 这样的产物在质心系  $180^\circ$  由于反射对称性而具有相同的出射几率。于是, 我们研究的问题实质上是处于量子态叠加的、在耗散反应中形成的双核系统的衰变产物。这些产物具有不同的内部态 (自旋) 和可区分的宏观态 (出射角度) 彼此纠缠。其中, 宏观探测角度就是笼子里的那只猫, 如同死猫与活猫的几率之和等于 1 一样, 在质心系相隔  $180^\circ$  的两个角度, 耗散产物也是同时存在, 而且具有相同的出射几率; 与不死不活的猫相纠缠的是具有不同的内部态 (激发态和基态) 的放射性原子, 而与在质心系相隔  $180^\circ$  的两个宏观探测角度  $\theta_1$  和  $\theta_2$  相纠缠的则是具有相同宇称和不同自旋  $J$  (不同的内部态) 的耗散产物。这个系统的波函数可以表述为:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\theta_1\rangle|J_1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\theta_2\rangle|J_2\rangle$$

薛定谔猫的研究对深入理解量子理论, 探讨量子物理与经典物理的关系具有重要的学术意义。研究薛定谔猫的专著与文章虽然不少, 由于技术条件的限制, 在一个实际系统中验证薛定谔猫态存在的实验并不多, 而且这些实验又多局限于激发能比较低的单粒子系统或者可以认为不存在相互作用的多粒子系统。重离子耗散反应是高激发的、具有强相互作用的多体系统, 其激发函数的大角度关联表现出薛定谔猫态的叠加特征显然不同寻常。当前, 进一步研究的相关工作正在积极进行。