

浅谈量子力学中观察方法的问题

吴 柯

(咸阳市渭城高级中学 陕西 咸阳 712000)

(收稿日期:2016-05-18)

摘 要:描述了量子力学中的观测方法,其中包括测不准原理、贝尔不等式、薛定谔之猫,最后给出了测不准原理的一个区间,也许会对量子力学的观测方法的完备性有一些进展.量子力学的观测问题从一开始就存在,直到量子力学发展的全盛时期,它的完备性也是研究量子力学的物理学家争论最多的问题,文章就这些问题做出描述,以及一些对观测方法的新观点.

关键词:测不准原理 贝尔不等式 薛定谔之猫 量子力学

1 引言

20世纪,物理学存在一个飞速发展时期,相对论和量子力学的物理分支分别形成,其中基本相对论原理表述了宏观物体的运动效应,和牛顿力学的不足之处.量子力学在微观粒子的实验效应里展示

了它的闪光点,量子力学是反映微观粒子运动的最好的实验效应.量子论发展在19世纪初,开始由普朗克等人从黑体辐射建立了基础理论,并发展至今,形成了量子力学.

在科学发展的不断进步下,量子论逐渐成熟,形成了量子力学.量子力学具体叙述了微观系统中粒

量守恒定律的理解,对学生剖析、深刻理解相关物理规律在类似问题中的应用也是有所帮助的.

参 考 文 献

- 1 马文蔚,解希顺,周雨青.物理学.北京:高等教育出版社,2006
- 2 赵近芳,王登龙.大学物理学(第4版).北京:北京邮电

大学出版社,2015

- 3 邱晓燕,唐志海.一道力学碰撞问题中动量守恒与角动量守恒辨析.物理教学探讨,2011,29(433):40~41
- 4 王宗昌.木棒和子弹组成系统的动量守恒问题.南阳师范学院学报,2005,4(9):36~37

Analysis on the Conservation Laws of Momentum and Angular Momentum

Hao Yafei

(Physics Department, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004)

Abstract: This paper analyzes the application conditions of the conservation laws of momentum and angular momentum, helping students to come to a better understanding of these two laws. By analyzing three examples, and choosing parameters, the values of internal force and resultant external force are calculated, and the conditions that resultant external force (resultant external moment) is far less than internal force (internal moment) are analyzed. The results show that it is imprecise to come to the conclusion that the gravity of the object with very small mass is far less than internal force, whether the gravity of object is far less than internal force also depends on the preceding collision velocity of the object. Whether the resultant external moment is far less than internal moment depends on not only preceding collision velocity of the object but also the collision location.

Key words: momentum; angular momentum; conservation; moment; force

子的行为等,粒子还被诠释为具有一种波的性质,这也称为波粒二象性.

我们熟知光是一种粒子,也是一种波.粒子既是一个独立的粒子,也是一种波.这个观念起初由德布罗意发现并推广,在之后的量子力学-双缝实验的基础上,证实了波粒二象性.多年之后,薛定谔建立了波动方程,海森伯发现了测不准原理,说明了位置与动量的不确定性,不确定性关系随后成立,不确定性关系也成为量子力学的一大疑难.

不确定性关系的简单叙述如下:一个已知粒子,已知它的动量就会不确定它的位置.

光是一种波,这个观点首先由惠更斯提出.16世纪,牛顿首先分解了光,在他的著作《光学》里,他提出光是一种粒子,由粒子的行为解释了光线的折射、反射,及其一些光学理论.

同一时期,物理学家惠更斯提出光同时是一种波,在他的《光论》中,光的波动学被首次提出,随着是机械波这一理论没有被人们忽视,波的理论也就逐渐成熟,直到20世纪中黑体辐射、原子光谱、光电效应的出现.法国物理学家德布罗意首先提出光是一种物质波,从爱因斯坦的相对论质能关系 $E = Mc^2$ 和普朗克的波长定理 $E = h\nu$ 中,德布罗意发现了能量和波的关系,提出物质波的理论.

测不准原理的公式由 $\Delta x \Delta p \geq h$ 引出,最初是由海森伯在量子力学的不确定中提出.其中,量子力学的状态为叠加态,具体表述方式为波函数,也就是一个粒子的状态随时间的演化由薛定谔方程表示,薛定谔方程是薛定谔对量子力学的诠释,而波函数的状态有不同解,量子力学的运算方式和经典力学的差别就在此.在实验中,人们只能知道一些,而不能知道另一些,爱因斯坦用“上帝不扔骰子”这句话反对这个理论.

在电磁波的干扰下,也就是可观测时,粒子会受到干扰,运动轨迹与不观测时的运动轨迹大不相同,这也许就是测不准原理.

测不准原理(或不确定性原理),这个理论的不确定性,引出了“上帝不扔骰子”这句话.这就表明,它关键性地影响到了量子力学的经典发展.历史上,量子力学无不引起科学家的争论,这个争论给人们带来一种困惑,也就是量子力学中著名的薛定谔之猫.

然而,研究不确定关系式,或许是研究这个未知关系的唯一钥匙,可以设想,已知不确定关系式的关系对量子力学发展的重要性.

2 测不准原理

不确定关系式首先由海森伯提出,是描述物体位置与动量的乘积,一定大于普朗克常量的某一下限值.由于量子力学的发展,海森伯等人主观舍弃了电子轨道的创建,那么接下来的问题是,既然不需要粒子路径的观点,怎么解释粒子的路径呢?然而任何一个完善理论都需要直观的观测依据,海森伯推导出了不确定关系式的方程

$$\Delta x \Delta y \geq \frac{h}{2}$$

首先,动态表象的态函数和坐标表象的态函数表示为

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(p) e^{\frac{ixp}{\hbar}} dp$$

$$\varphi(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) e^{-\frac{ixp}{\hbar}} dx$$

从此式的解可以看出这两个函数偏离其平方的平均值的方均根偏差是

$$\Delta x \geq \frac{a}{2} \quad \Delta y \geq \frac{h}{a}$$

两式相乘,可以得出

$$\Delta x \Delta y \geq \frac{h}{2}$$

这是海森伯最初提出的不确定关系式.

在海森伯提出不确定性关系的同时,又出现了一个假想实验“ γ 射线显微镜”.

“例如,当我们对电子施加光照,并在一台显微镜下进行观察,那么,在测量中可达到的最高精确度取决于光的波长.然而,原则上我们能够建造一台 γ 射线显微镜,并且用它来进行精确度要多高就有多高的位置测定.在这种测量中的一个重要特征是Compton效应.当测定位置的瞬间,因而也正是光子被电子散射的瞬间,电子的动量产生一个不连续的改变.当所用的光的波长愈小,即位置测定得愈精准,这一动量改变就愈大.”

因此,在这种情况下,得到方程

$$pq - qp = ih$$

其中, q 与 p 是光的波长的精确度,也可以理解为测量前后的波长值,且满足关系式

$$q_1 p_1 \approx h$$

如图1所示,AB是 γ 射线显微镜的物镜,P是电子与光子发生散射的中心, e 是物镜半径对P点的张角.设投射到电子上的 γ 光子的波长是 λ ,那么,在

与显微镜光轴相垂直的物平面的 x 方向上,位置测量精度的极限是

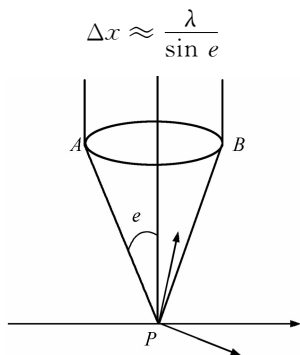


图1 γ 射线显微镜示意图

如果,我们仍认为散射光子的动量为 $p = \frac{h}{\lambda}$,显微镜接收到光子的横动量 $p(x)$ 的范围是 $-p \sin e$ 或 $p \sin e$,所以,光子(电子)横动量的不确定度为

$$\Delta p(x) \approx \frac{h}{\lambda \sin e}$$

两式相乘,得

$$\Delta x \Delta p(x) \approx h$$

3 贝尔不等式

量子力学对物理实在的描述来说是完备的吗?这个问题曾经引起了轩然大波,其后由爱因斯坦、波多尔斯基、罗森提出的 EPR 佯谬很全面地反映了这个问题。

“考虑 2 个自旋为 $\frac{1}{2}$ 的粒子 A 和 B 构成一个体系,在一定时刻后, A 和 B 完全分离,不再相互作用。当观察者测得 A 自旋的某一分量后,根据量子力学,就能预言 B 在相应方向上的自旋值。”

这看似是不可能的,但是在量子力学中真实存在,如果坚持把量子力学看作是完备的,那就必须承认对 A 的测量值可以影响到 B 的状态,就要承认某种超距作用。

其实 EPR 佯谬存在明显的局域性假设,但是德布罗意坚持“导波”理论,这就间接承认了这种完备性,这就是量子力学的隐变量理论,但是后来却被人放弃了这个理论。

随后,贝尔精心设计出一个思想实验,一个粒子衰变成 2 个处于单态 $\frac{1}{2}$ 的粒子,分别朝 2 个相反方向移动,在 3 维的空间中,每一次测量的结果是自旋 + 或自旋 -。

“假设角动量为零的粒子衰变为两个粒子 A 和

B,根据角动量守恒定律,此光子必须具有和另一个光子相同的偏振态。”

光子碰到测量偏振片时,若 A 光子完全通过, B 也总会通过,相反同样,但是当二者不处于平行或垂直时,在两个地点测量的结果概率仍一致,所以假设两根直轴相互垂直,则只可以 50% 的概率得到结果一致,50% 得不到的结果也一致。

经过测量,贝尔得出了贝尔不等式

$$|p_{xz} - p_{zy}| \leq 1 + p_{xy}$$

4 薛定谔之猫

奥地利科学家薛定谔曾提出一个假想实验,是对于量子力学测量结构的一种否定,这和测不准原理的内容虽不同,但是量子力学带给人们的困惑却始终消失不掉。

薛定谔曾创立了薛定谔方程,薛定谔方程是将粒子的波动性和波动方程统一从而诞生的,它的解波函数则是通过粒子的坐标和动量来描述物体的状态,但是我们不得不通过量子力学的发展过程来解释量子力学,而粒子状态的方程恰好是通过叠加态描述的,这就成为了量子力学又一个难题。

在叠加态被广泛使用以后,许多人对量子力学表示困惑,其中薛定谔提出了著名的假想实验——薛定谔之猫。

“假设一只猫被关在一个封闭的盒子中,盒子里面有一个可以引发打碎毒瓶的仪器,放射性源可以引发这个仪器,但是在我们的观察这个盒子时,我们熟知的波函数会从 2 个变为 1 个,我们就无法得知盒子里的猫是死猫还是活猫,这个几率只有 50%。”

如今,薛定谔之猫这个假想实验已经成为解释波函数叠加态理论的一种方式,它也是量子力学观测方法上的一个很明显的问题。

5 结论

不论是测不准原理,还是其发展后的贝尔不等式,或者是薛定谔之猫,都给我们提示出了一个问題,量子力学是一个完备的理论吗?

因此,我们再次考虑完备性的时候,就必须先考虑它的局域性,量子力学是一个存在局域性的理论吗?

由这个观点出发,许多问題似乎都有了一些可以被人们接受的思考方式,包括贝尔不等式的实验证明。贝尔也曾提出:如果不等式被证明,则局域性存在,假设不等式被推翻,也就是说局域性或测不准

原理中的某一个有错误.

测不准原理的观测是拥有局域性的吗?这个问题就随着量子力学的发展变得更加重要. 我们知道贝尔不等式、EPR 佯谬、波函数的叠加都是由测不准原理为基础导出的, 所以不确定性原理成为了这些问题的关键.

从数学的角度, 我们可以假设动量等于坐标量, 分别算出动量与坐标量, 那么相等的动量与坐标量的关系, 则与不相等的动量与坐标量的关系形成一个区间

$$\frac{h}{2} > \frac{h}{8}$$

代入测不准方程变为

$$\frac{h}{8} < \Delta x \Delta p < \frac{h}{2}$$

我们谈论的是这个区间, 在这个区间的范围内, 我们确实无法观测.

既然量子力学的观测关键是测不准原理, 或许这个区间就是一个测量标准. 如果量子力学真的是一个不完备的理论, 可它的发展却正确且令人激动, 这似乎也是我们继续选择研究它的原因.

参考文献

- 1 关洪. 量子力学的基本概念. 北京: 高等教育出版社. 1999. 8
- 2 Blaylock, Guy. The EPR paradox, Bell's inequality, and the question of locality. American Journal of Physics. January 2010, 78(1): 111 ~ 120
- 3 爱因斯坦 A, 玻多尔斯基 B, 罗申 N. 能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗? 物理评论(usA), 1935, 47: 777 ~ 780

- 4 J. S. Bell. On the problem of hidden variables in quantum mechanics. Rev. Mod. Phys., 1966, 38: 447
- 5 Bell, John. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. Physics 1964, 13: 195 ~ 200

附录: 得出区间的数学方法 不确定性关系式

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2}$$

假设坐标量与动量相等, 即

$$\Delta x = \Delta p$$

不确定性关系式变为

$$\Delta x \Delta x \geq \frac{h}{2} \quad \Delta p \Delta p \geq \frac{h}{2}$$

化简为不确定性关系式

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h^2}{4 \Delta x \Delta p}$$

又假设

$$\Delta x \Delta p = \frac{h}{2}$$

化简为 $\frac{h}{2} > \frac{4h}{2} \quad \frac{h}{2} > \frac{h}{8}$

假设坐标量不等于动量

$$\Delta x \neq \Delta p$$

不确定性关系式仍为

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2}$$

以上我们为什么要假设动量等于位置呢? 因为我们假设粒子的位置与粒子动量恰好相等, 这样就可以得出最小的可以区分的量子测量范围.

Talking Shallowly about the Issue of Observation Method in Quantum Mechanics

Wu Ke

(Weicheng Vocational High School, Xianyang, Shaanxi 712000)

Abstract: Observation method in quantum mechanics are described, including the uncertainty principle, Bell inequality, Schrodinger's cat. Finally, measuring a range of uncertainty principle, may the completeness of the observation method of quantum mechanics has some progress. The observation of quantum mechanics problem from the start there, the heyday of until the development of quantum mechanics, its completeness is the study of quantum mechanics physicists argue most of the problems, the article on these issues make a description, and some of the observation methods of the new point of view.

Key words: uncertainty principle; Bell's inequality; Schrodinger's cat; quantum mechanics