

不确定原理及其应用

张玮 王泽农 厉光烈

不确定原理是量子力学的重要原理之一。1927年,德国物理学家海森堡(1901—1976)在研究微观粒子“波粒二象性”的过程中提出了这一原理,其大意是:微观粒子在运动过程中不能像宏观物体那样有确定的运动轨迹,也就是说,微观粒子在运动过程中不能同时具有确定的时空位置和能量动量。若以 Δt 、 $\Delta \mathbf{x}$ 分别表示时空位置的不确定度, ΔE 、 $\Delta \mathbf{p}$ 分别表示能量动量的不确定度,则它们分别满足以下关系式:

$$\Delta \mathbf{x} \cdot \Delta \mathbf{p} \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (1)$$

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (2)$$

当然,这只是不确定原理的一种常见的表达方式,要想知道不确定原理的严谨表述和详细推导,可参考曾谨言先生的《量子力学教程》,这里就不赘述。应当指出的是,在不确定原理的具体应用中,通常只需要估计不确定度的数量级,故将(1)、(2)两式近似地表示为

$$\Delta \mathbf{x} \cdot \Delta \mathbf{p} \sim \hbar \quad (3)$$

和 $\Delta t \cdot \Delta E \sim \hbar。$ (4)

在这篇文章里,我们主要通过解释微观世界中的“小猪生象”现象、讨论“芝诺疑难”和“不确定原理中的时空观”来阐明不确定原理在科学和哲学上的意义。

1. 用不确定原理解释“小猪生象”现象

所谓“小猪生象”,指的是在微观世界里出现的一种能量不守恒的反应中间过程。例如,中子的 β 衰变:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (5)$$

这是一种弱作用过程,也可用图1的费恩曼图表示。图中传递弱作用的是中间玻色子 Z^0 ,其质量约为 $100\text{GeV}/c^2$ 。图1左边的中子和电中微子与右边的质子和电子,其质量之和均小于 $1\text{GeV}/c^2$ 。显见,实验可以测量到的左右两边是能量守恒的:

$$E(n + \nu_e) = E(p + e^-)。 \quad (6)$$

而实验无法测量的中间过程:

$$n + \nu_e \rightarrow Z^0 \quad (7)$$

和 $Z^0 \rightarrow p + e^- \quad (8)$

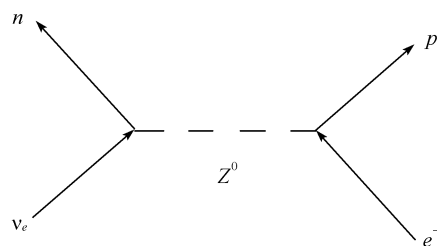


图1

是能量不守恒的,有人就将其形象化地称之为“小猪生象”和“象变小猪”。在宏观世界里,这种“怪”现象是绝不可能发生的,因为那里的运动过程必须遵从能量守恒定律。但是在微观世界里,按照不确定原理,反应中间过程是可以“透支”能量的。以上述的中子 β 衰变为例,中间玻色子 Z^0 所传递的弱作用的力程极短,若令其为 d ,则在反应中间过程里以光速传递的虚粒子 Z^0 的平均寿命应为 $\tau = d/c$,它就是反应中间过程的时间不确定度 Δt ,将其代入(4)式,便可得到相应的能量不确定度为

$$\Delta E \sim \hbar c / d, \quad (9)$$

它就是为了产生虚粒子 Z^0 所需要“透支”的 100GeV 的能量,将此数值代入上式,便可算出弱作用力程为

$$d \sim \hbar c / \Delta E \sim 2 \times 10^{-18} \text{米}。 \quad (10)$$

这已是目前实验上能测量到的极限距离。正因为此,20世纪30年代,费米研究 β 衰变理论时认为弱作用是四费米子直接作用,即四费米子直接作用于一个“点”:

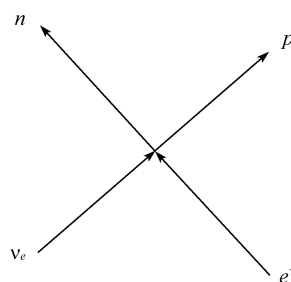


图2

因为那时实验上根本测量不出小于 10^{-15} 米的距离。顺便说一则故事：1935 年，日本科学家汤川秀树，根据他所提出的核力介子场论，预言在核子之间传递核力的 π 介子的质量，用的也是这种方法。当时，人们已经知道：核力力程约为 10^{-15} 米。将其作为 d 代入(9)式，便可算出 π 介子质量约为 200MeV。1947 年，莱梯斯等利用核乳胶在宇宙射线中发现了 π 介子并测出其质量约为 140MeV，与汤川秀树的预言在数量级上是一致的。由此可见，不确定原理在粒子物理和核物理中有广泛的应用。

2. 不确定原理与“芝诺疑难”

芝诺(Zenon Eleates, 约公元前 490 年—公元前 436 年)，古希腊哲学家、数学家。他以提出“两段法”、“阿基里斯追不上龟”、“飞矢不动”等疑难问题而闻名于世。

“两段法”。芝诺认为，物体不能从 A 运动到 B。理由是：物体若想从 A 点运动到 B 点，必须先通过 AB 中点 C。要到达 C 点又须经过 AC 中点 D……依次类推，还有 E、F 等无穷个中点。这样，物体就被无穷个中点所阻碍，所以物体不能从 A 到 B。

“阿基里斯追不上龟”。在芝诺看来，阿基里斯作为古希腊神话中善于奔跑的英雄，是追不上龟的。理由是：假设龟速度为 1 米/秒，且超前阿基里斯 100 米，阿基里斯以 10 米/秒的速度去追赶龟。当阿基里斯跑到龟原来的位置时，龟已前进了 10 米；当阿基里斯跑完这 10 米的时候，龟又前进了 1 米……照此下去，阿基里斯虽可不断缩短与龟的距离，但却始终处于龟后面，即阿基里斯追不上龟。

“飞矢不动”。飞行的箭处于静止状态，这本是荒谬的，但却是芝诺的观点。他的想法是：在整个飞行轨迹中，箭在某一瞬间，只能处于一个确定位置上，它不能同时占据两个位置，故某一瞬间的箭理应是静止的。箭，此时在这位置，彼时在那位置，一系列的静止组成了整个过程，而静止的总和不能构成运动，因此“飞矢”是不运动的。

19 世纪辩证法大师黑格尔和恩格斯为上述的“芝诺疑难”提供了答案。他们认为，运动本身就是一种客观存在的真实矛盾。“运动的物体在瞬间既在某一点上又不在某一点上，既在这一点上，又在那一点上。”恩格斯说，“运动本身就是矛盾，甚至简单的机械的位移之所以能够实现，也只是因为物体在同一瞬间既在同一个地方又不在同一个地方。

这种矛盾的连续产生和同时解决正好就是运动。”

山西长治医学院郭嘉泰老师用不确定原理对“芝诺疑难”作出了解释（参见本刊 2007 年第 5 期）。郭老师认为：芝诺谈及的“无穷”个中点和“一系列”静止，实际上已让运动物体进入微观领域，而按照不确定原理，在微观世界里，物体在某一时刻所占据的“位置”不可能是一个确定的几何点，而应在一个范围 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 里。当两物体所占据的“位置”不重合时，两物体谁先谁后是可知的；当它们重合时，先后便不能确定了。这样，“芝诺疑难”也就不复存在了！郭老师利用不确定原理来解释“芝诺疑难”，观点新颖，值得肯定。但是，我们认为，郭老师的解释没有击中“芝诺疑难”的要害。以“飞矢不动”为例，“芝诺疑难”的要害在于否定运动。辩证唯物主义告诉我们：静止是相对的，运动是绝对的，物质永远处于不断运动之中！对于微观粒子，不确定原理对此提供了充分的证据。按照不确定原理，当一个微观粒子处于确定位置(即 $\Delta x = 0$)时， Δp 应为无穷大，这意味着粒子速度可以无限大，从而可以在无穷小时间内，或者说不需要时间，就能到达空间里任何一点，换句话说，这就意味着微观粒子不可能处于一个确定的几何点上，而应处于不断运动之中，因此，“飞矢不动”是不可能的。困惑众多哲学家的“芝诺疑难”，借助不确定原理得到了彻底解决，这无疑是科学与哲学完美结合的典范！

3. 不确定原理中的时空观

谈到时空观，人们首先想到的是牛顿的绝对时空观和爱因斯坦的相对时空观。绝对时空观认为：时空是分离的，是 3 维空间加上 1 维时间，而且与物质及其运动无关。因此，空间距离和时间间隔与参照系的选择无关，是绝对的。绝对的空间距离除以绝对的时间间隔应该给出绝对速度。但是，伽利略相对性原理指出：力学规律在不同惯性参照系中具有相同的形式。也就是说，物体的位置和速度都是相对参照系而言的，不应该是绝对的。这就与绝对时空观的结论产生了矛盾。后来，爱因斯坦提出狭义相对论克服了这一矛盾。他认为，时间和空间是等价的，即时空是四维的。他还引入洛伦兹变换来描述四维时空的惯性参照系，指出：位置、速度、空间距离和时间间隔均与参照系的选择有关，是相对的，但时间顺序(即因果关系)是不变的。狭义相对论的相对性原理认为，物理学规律在不同惯性参

纳米材料的奇异特性

冯翠菊

纳米是一个长度计量单位,1 纳米等于 10^{-9} 米,纳米结构通常是指尺寸在 100 纳米以下(1—100nm)的微小结构,纳米技术是在纳米尺寸上对物质和材料进行研究处理的技术,其本质上是一种用单个原子、分子制造物质的科学技术。目前,世界上已形成发展纳米科技的“三大板块”的格局,即美国、亚洲和欧盟,纳米科技的研究和发展已进入一个新阶段,纳米技术将引起一场各个领域生产方式的变革,也将改变未来人们的生活方式和工作方式。

纳米尺度上的新特性并不能根据大尺度上观察到的特性来预测,性能的改变不是由尺寸量级减少引起的,而是由于纳米尺度特有的或在纳米尺度时变得显著起来的现象引起的,小尺寸效应、表面界面效应、量子尺寸效应、量子隧道效应是纳米颗粒与纳米固体的基本特性,这些基本特性使其呈现许多奇异的物理、化学性质,甚至出现一些“反常现象”。

一、 纳米粒子的磁学特性

超顺磁性 铁磁性纳米颗粒的尺寸减小到一

定临界值时,进入超顺磁状态,原因是在小尺寸下,当各向异性减小到与热运动动能可比拟时,磁化方向就不再固定在一个易磁化方向上,结果导致超顺磁性的出现,此时磁化率不再服从居里-外斯定律。

高矫顽力 纳米粒子尺寸高于超顺磁临界尺寸时,通常呈现高的矫顽力,起源有两种模型:1)一致转动模型,当粒子尺寸小到某一尺寸时,每个粒子就是一个单磁畴,例如 Fe 的单磁畴临界尺寸为 12nm, Fe_3O_4 为 40nm,每个单磁畴的纳米粒子实际上成为一个永久磁铁,要使该磁铁去磁,必须使每个粒子整体的磁矩反转,这需要很大的反向磁场,因此具有较高的矫顽力。2)球链反转磁化模型,由于净磁作用球形纳米粒子形成链状,以此作为理论推导的前提。

居里温度降低 例如,70nm 的 Ni 粒子的居里温度比常规粗晶 Ni 低约 40°C ,有人认为这是由于大量界面引起的,常规块体 Ni 的居里温度约为 358°C 。

照系中具有相同的形式,因此在不同惯性参照系中测出的光速是一样,但是同时性是相对的。另外,他还提出广义相对论,用时空弯曲来描述引力,这样一来,时空便与物质及其运动有关。爱因斯坦的相对时空观的精髓也正在于此。

在微观世界里,描述时空的 x 和 t 与描述物质及其运动的 p 和 E 通过不确定原理,即(1)和(2)式,联系起来,因此我们说不确定原理中的时空观在“时空与物质及其运动有关”这一点上与爱因斯坦时空观是一致的。但是,不确定度 Δx 和 Δp 的出现意味着微观粒子的运动不存在轨道,因而也就不存在因果关系。这正是爱因斯坦不能接受量子力学的一个重要原因。

宇宙大爆炸、超新星爆发和 γ 暴,都在极其短暂的时间里释放出极其巨大的能量,那么,这些能量是从哪里来的呢?我们认为,它可能与时空量子化有关。若时空的出现不是从零开始,而是量子化的,

即一份一份出现的,时间的最小间隔和空间的最小尺度分别是普朗克时间(10^{-43} 秒)和普朗克尺度(10^{-35} 米),那么,按照不确定原理,伴随着一份时间(10^{-43} 秒)出现的就应该是 10^{16} TeV 量级的能量,比加速器目前能够将粒子加速到的最高能量(TeV 量级)还要大 10^{16} 倍。这是何等巨大的能量?按照超弦理论,宇宙形成之初是十维时空,后来逐步蜷缩为四维,然后时空分离为三维空间加上一维时间,若时空分离时产生的时间和空间是量子化的,则量子化时间的出现便带来了导致宇宙大爆炸的巨大能量。

综上所述,运用不确定原理,我们成功地解释了微观世界里能量不守恒的“小猪生象”现象和困扰哲学家多年的“芝诺疑难”,讨论了不确定原理中的时空观,特别是推测宇宙大爆炸、超新星爆发和 γ 暴的能量来源可能与时空量子化有关,从而阐明了不确定原理在科学和哲学上的重要意义。

(南京晓庄学院物理与电子工程学院, 210017)