

现代物理的“距离”观

朱世豹

(苏州轻工研究所 215005)

距离,这个在日常生活和科学技术中使用频率较高的概念,它涉及到物体大小、相距远近、运动位移等,其量纲是长度,在SI制中的单位是米(m).

现代物理涉及的距离范围为 $10^{-35}\text{m} \sim 10^{26}\text{m}$,当今技术可观测的距离范围约为 $10^{-19}\text{m} \sim 10^{24}\text{m}$.

从哲学、文化和历史看,距离,它与价值、伦理等观念颇为相像——它们都随社会生产力的发展不断修正自身而日趋完善.“纵观”距离,在我们眼前重现一部物理学的发展简史;而“横观”距离,则触及到与物理学密切相关的数学、宇宙学及生物学等领域,如此分析会把“距离”涂上一层奇特而朦胧的色彩.

经典力学中,距离是直线线段或是具有方向性的矢量的长度.

在三维空间中,A、B两点间的距离 r 为:

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 与 (x_2, y_2, z_2) 分别为 A 和 B 点的坐标.

力学中,位移对时间的导数和二阶导数构成了速度和加速度的定义.力的大小与物质间或电荷间的距离平方成反比,这是万有引力或库仑力的基本特征.

协同学主要从动力学角度阐述自组织、自适应行为形成的机制.

实际上,介于自然科学和社会科学之间的交叉学科——信息论、控制论、系统论、系统工程等基本上也属非线性学科.可以这样说,非线性科学是一门汇总各交叉学科研究的“集成”学科,它是关于体系总体演化过程及其本质的一门新理论科学,也是涉及自然、社会各个领域的

狭义相对论认为距离的测量与参考系有关.

狭义相对论中的四维空时间隔 δS ,表示两事件在闵可夫斯基空间的距离:

$$\delta S^2 = \delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2 - c^2 \delta t^2$$

式中: $\delta x, \delta y, \delta z$ 为空间坐标间隔, δt 为时间间隔, c 为光速.时间作为空时的第四维出现.

相对论中,与“钟慢”对应的便是所谓“尺缩”——长度收缩,即物体沿运动方向的长度 l 比其静止时的长度 l_0 要短:

$$l = r^{-1} l_0$$

式中: $r^{-1} = \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 为收缩因子,其中 v 为尺子的运动速度, c 为光速.

长度收缩效应是一个普遍的时空性质,它与物体的具体组成和结构无关.当 v 接近光速,这种收缩效应就变得显著.

我们容易想象,球面上两点间的距离可用连接它们的大圆弧长度表示.对任意曲面,情况就复杂得多,要用黎曼几何处理,距离呈现弯曲特性,例如所谓测地线,便是沿一条曲线长度为极值之线.广义相对论推论,空间弯曲的性质是由物质的分布及其运动决定的.星光经过大质量的太阳近旁,会产生 $1.75''$ 的偏转角的预言已被证实.空间某点弯曲的程度用黎曼曲率张量作定量表述(张量是矢量和矩阵概念的推广,有 n' 个分量, n 为空间维数, r 为张量的阶, $r=0$ 即标量, $r=1$ 即矢量).一般来说,对于弯曲空间,只要我们知道任意两点间的最短距离,就可以精确得出表面是如何弯曲的.引力场扭曲了时空.

应用广义相对论可以计算出引力场——时空中的间隔(ds)的公式:

一门应用科学.

当前,世界范围内对非线性问题的研究正方兴未艾,异军突起.可以相信,随着非线性科学的迅猛发展,人类对客观世界的认识必将提高到一个崭新的层次.透过它,人们可看到一个演化的、开放的、复杂的、更接近真实的世界图景;应用它,人类将从自由王国向必然王国迈进一大步.

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu$$

式中: $\mu, \nu = 1, 2, \dots, n$, $g_{\mu\nu}$ 是坐标的函数, 称为度规张量(简称度规), 它决定了具体的空间几何性质. 应该特别提出的是度规 $g_{\mu\nu}$ 不是“刚性”的而是“柔性”的, 也就是它为坐标的函数.

量子力学中的位置的测量服从测不准关系. 海森堡的著名的测不准关系不等式为

$$\Delta x \Delta p > \hbar$$

式中: Δx 为坐标(位置)测不准量, $\Delta p = \Delta mv$ 为动量测不准量, $\hbar = h / 2\pi$, h 为普朗克常数. 对于一个运动的粒子, 若要求其速度测量得越精确, 那么其位置的测量误差就越大. 测不准效应对微观粒子颇显著. 我们试比较一个子弹和一个电子, 设它们的运动速度均为声速 ($v = 340\text{ms}^{-1}$), 速度不确定量 $\Delta v = 0.01\%v$, 则计算表明, 子弹的位置误差仅 10^{-32}m , 而电子的位置误差可达 4mm , 这是不能忽略的.

测不准关系的本质是波粒二象性, 即微观粒子既有波动性(可用波长表示)又有粒子性(用空间坐标表示). 所以, 在局部空间 Δx 内的粒子又相应是波长范围为 $\Delta\lambda$ 的波包. 测不准和二象性, 实际上不仅对微观粒子而且对一切物质及其运动均适用, 只是在宏观条件下, 这种属性往往很不明显.

在标准模型理论中, 强相互作用的强度随距离减少趋近于零. 标准模型理论完成于 1973 年, 它是电磁作用和弱作用统一理论和量子色动力学(QCD)的结合. 在电磁、弱和强作用中传递作用力起媒介作用的粒子分别是光子、 W^\pm 和 Z^0 粒子以及胶子. 对电磁作用, 当动量很小即距离很大时, 带电粒子间的相互作用为零. 对强相互作用, 当动量很大即距离很小时, 夸克与胶子间的相互作用强度趋近于零, 称为渐近自由. 有的物理学家把夸克作用与距离的关系比作一些恋人一样: 当他们彼此远离时, 他们彼此想念; 但当他们紧密相处时, 他们几乎都意识不到对方的存在!

在把物质与各种力统一起来的理论(超对称理论, 大统一理论, 超弦理论)中, 在极小距离上, 也就是在更高的能量标度, 会出现一些新奇

的现象.

70 年代初, 现代物理中兴起了一个诱惑力大而数学深奥的流派, 即超对称理论. 它以容纳引力、统一四种相互作用为目标, 以拓扑学和群论为主要数学工具. 所谓超对称, 是一种在更基本层次上的对称. 它是将玻色子和费米子统一起来的对称性.

根据超对称理论计算, 在 10^{-18}m 尺度上将产生超对称自发破缺的物理过渡, 会产生超伙伴粒子(超电子、超质子等); 在 10^{-32}m 尺度上电磁、弱与强作用这三种作用可能会统一, 且具有相同的强度. 特别需提出的是普朗克长度(l_p)下的奇特性:

$$l_p = (Gh / c^3)^{1/2} \approx 10^{-35}\text{m}$$

式中, G 为万有引力常数, h 为普朗克常数, c 为光速.

据推测, 宇宙大爆炸后的膨胀开始是多维的, 只是达到 10^{-35}m 尺度后才开始转变为三维膨胀, 如我们当今所见到的宇宙那样. 因此 10^{-35}m 是三维空间的起始尺度; 超弦理论认为, 超弦是构成一切粒子的基元, 超弦如同一根根的超细尺度的“小橡皮筋”, 而超弦的长度是 10^{-35}m .

目前, 科学家们尚未发现超对称粒子, 也没有能力产生更高能量以造就如上所列举的三种极小尺度.

数学中, 距离可应用集合论严格定义: 在集合 s 上, $p(x, y)$ 是距离, $p(x, y)$ 是 s 上的正实函数, 且满足① $p(x, y) = 0$, 并且仅当 $x = y$; ② 对称性 $p(y, x) = p(x, y)$; ③ 三角不等式 $p(x, y) < p(x, z) + p(z, y)$. 显然, 直线、平面和球面上的距离均符合上述定义.

同理, 可定义两个集合 M, N 间的距离 $p(M, N)$:

$$p(M, N) = \inf\{p(m, n) | m \in M, n \in N\}$$

式中: \inf 为下确界. 平面上两直线间的距离及空间中异面直线的距离均符合此定义. 在黎曼几何中, 两点间的距离可表示为坐标微分的不变的二次齐次函数式.

数学中, 距离可取 0 及 ∞ 两个极值; 但现代

物理学尚未发现它们的“对应物”！对力的平方反比律，距离为 0 意味着力的无穷大；对“无界有限”的宇宙，距离的 ∞ 也是一种悖论。物理学家似乎在回避这两个极值，不知自然的设计究竟是偏向数学还是偏向物理。杨振宁博士曾用一根树枝上的两瓣树叶来描述数学和物理学的微妙关系。他说：“尽管数学和物理学之间的联系很深刻，但认为两门学科交叠很多，那将是错误的。……在下一世纪交叠区域将继续扩大，这对两门学科都会有益”。

如上所述，拓扑学的主要研究对象是空间曲线和曲面的整体性质，它的特征是变换方式从刚性发展到弹性。例如移动一个图形可随意伸张、扭曲、拉或折，甚至可以切断打结再将切口缝合，故俗名为“橡皮几何”。在拓扑学中距离的定义为：在拓扑空间，只要相互关系位置保持一定，其间的距离是允许伸长或压缩的。

在现代宇宙学中宇宙的尺度是随时间而变大的。地球、太阳、银河系的尺度分别为 10^7 、 10^{16} 、 10^{20} m。宇宙至少不会小于 10^{26} m。因为天体相互间的距离很大，因此宇宙学中距离的单位常用光年 (l.y.) 或秒差距 (pc) 表示。1 l.y. = 9.46×10^{15} m, 1 pc = 3.26 l.y.

测定天体距离的主要方法有两种：一是光度比较法，即观测到的天体的视光度与已知天体的绝对光度比较；二是角直径比较法，即将观测到的天体的角直径与已知的它的实际直径比较。

大量的观测结果表明：所有的星系均在离我们而远去（退行），而且退行速度和相互间的距离成正比。由于太阳系并不在宇宙中心，由此推论，在每个星系上均可观察到其他星系全在离它而远去。这就是表示星系退行速度 v 的著名的哈勃定律：

$$v = H_0 D$$

式中： H_0 为哈勃常量， $H_0 = (50-100) \text{kms}^{-1}$ ， D 为星系间的距离。

哈勃定律的实质是宇宙大爆炸后产生的膨胀，它还告诉我们存在一个称为视界的可观测宇宙的极限（近似值约 5×10^9 pc），比视界更远

的星系发出的光是到达不了地球的。

与基本粒子及天体都不同，植物、动物及人体的器官与细胞乃至更小的细胞核、染色体、DNA、核苷酸、碱基、氢键其尺度的测定均处于现代物理学技术可及的范围内。我们知道，细菌的平均大小为 $1 \mu\text{m}$ (10^{-6} m)，病毒的平均直径约 $0.1 \mu\text{m}$ ，而细胞膜的厚度为 $0.01 \mu\text{m}$ 。本世纪 50 年代，由物理学转向生物学的科学家沃森和克里克首次用 X 射线衍射技术揭开了遗传学的千古之谜。他们拍摄出 DNA（脱氧核糖核酸）有一个螺旋结构，正是这个直径约为 $0.4 \mu\text{m}$ 的螺线管保存着全部遗传信息。对其编码及调控乃在深入研究之中。生命科学发展至今，对重大的基础理论，如生命起源、物种形成、光合作用、衰老问题、固氮作用等尚处在迷惘的摸索阶段。我们已知，原子及分子之间的作用力的方向和大小均随其间的距离而变：在几个原子或分子直径的尺度内，可由强的排斥力转向弱的吸引力。此特性不仅与化学过程密切相关，当然也与生命现象有关。这里，列举一个固氮酶中钼金属离子的位移变更数据：固氮酶提供了一个还原大气中氮为氨的主要途径，而其中的钼离子被假定为氮分子被络合和又直接还原为氨的位点。已测定在此过程中，钼随着近旁的铁原子被键合到距离它 $2.36 \pm 0.02 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m) 的 3 个或 4 个硫原子上。

让我们回顾克里克的一段话：“现代生物学研究的最终目的是以物理学和化学解释生物学”。因此，笔者深信，借助于物理学的基本概念之一——长度或距离来深入分析细胞工程、染色体工程和基因工程是迟早要进行的事。

我们人类的尺度居于微小和宏大之间。我们视原子之小犹如星系视我们之小。宇宙中两星系间的距离，光需花亿万年才能穿过；而一滴水中两个原子间的距离小到只能凭想象去体会！物理学家的基本信念在于：相信物理学所反映的自然具备简单和美的特征，而物理学所表达的自然基本概念之一——距离，理应具有对称而统一的美。