

关于超距作用

张元仲

(中国科学院物理研究所)

人类关于力的概念最初是由于观察物体在直接接触时所发生的相互作用而产生的。这种“接触作用力”的观念曾经处于统治地位,成了人们的一般常识。虽然重力现象和磁力现象早为人们所知,但是并没有想到这些现象有什么“非接触”作用的性质。只是在牛顿理论中才清楚地告诉人们,万物之间存在着一种吸引力,这个力的方向在物体之间的连线上,大小与物体间的距离的平方成反比;在某一时刻作用于物体上的力只决定于同一时刻其他物体的位置,而与物体的速度和加速度无关;远离物体之间引力信息的传递不需要时间。这就是牛顿瞬时超距作用力的基本特征。“超距作用”的概念,是同人们早先在日常生活中意识到的接触作用的概念格格不入的。然而,牛顿万有引力理论不仅可以使人们能够精确地计算太阳系内天体的轨道,预言海王星的存在等等,而且也标志着在因果地联系自然现象方面的重大进步。同时人类对地球上和天体上的自然现象的研究,为牛顿引力理论提供了丰富的例证,这就不得不使人们面对着“瞬时超距作用”这种与以往的常识不相容的概念。

在“接触作用”和“超距作用”这两种完全相反的概念面前,具有不同哲学思想的人,态度是不同的。在牛顿看来,时间和空间是客观存在的(这种概念在牛顿以前很久就已经有了,无疑,这是人类认识的一大进步),但是空间、时间和物质是彼此分割开而孤立存在的,远离物体之间的相互作用力的信息,不是通过物质而是通过真空传递的¹⁾。牛顿的后继者们在某些方面甚至比牛顿走得更远。他们企图把所有看来是“接触作用”的力都纳入超距作用的范畴。另外一些人则选择了一条不同的道路,他们把看来象“超距作用”的力看做是靠充满空间的一种介质传递的,这样就把超距作用归并到接触作用的概念之中了。这种观念导致了“以太”假说的出现。

与牛顿引力理论相对应的,是静电的库仑定律,它把瞬时超距作用带进了电磁理论之中。对于静磁效应,也完全类似。因而,在静电和静磁效应中,只要引入只与电荷的距离有关的静电势和只与磁极的距离有关的静磁势,就可以在力学的框架内进行讨论。但是,对于电场和磁场之间的相互作用,情况就不同了。人们发

现,放在环形导体电流中心的磁针所受的力,并不在磁针与导线的连线上,而是在其垂直方向上,并且和电流的大小有关。如果这个力是作圆周运动的带电体产生的,那么实验表明,它与带电体的速度有关。这是同牛顿力学中的概念相矛盾的。人们对电磁现象的广泛深入的研究导致了安培定律和法拉第电磁感应定律的发现,而后麦克斯韦以精密的数学形式统一地描写了各种电磁学定律,建立了完整的电磁理论,消除了瞬时超距作用。在此之前,人们以为,物理实在就是质点,质点的变化仅仅是由那些服从全微分方程式的运动构成的。而在法拉第-麦克斯韦理论中,物理量满足的是偏微分方程,这些量不能做机械论的解释,而被看成是一些连续的“场”。“场”,做为一种客观实在,最早是由法拉第引入的。这种新的物质观念是消除牛顿瞬时超距作用的关键,也是物理学中的一次深刻的变革。在法拉第-麦克斯韦电磁理论中,做为场源的电荷连续地分布在一个孤立的带电体上,于是麦克斯韦引入了电荷密度和电流密度的概念。只是在后来,电荷的原子性质被发现以后,洛仑兹才在电磁理论中引进了“点电荷”的概念。这样,点电荷被看做是电磁场的奇点,电磁场量在点电荷以外的场所,处处满足麦克斯韦方程。法拉第-麦克斯韦电磁理论不但预言了电磁波的存在,揭示了光学现象和电磁现象的同一性,使得光学现象在电磁学基础上得到了较完备的解释。而且,电磁扰动是通过邻近场的变化而以有限速度传播出去的,作用在(点)电荷上的力,是由其邻近的场决定的。这样,就以邻近场的作用(接触作用)代替了“超距作用”,而库仑超距作用定律只对静电场成立。在赫兹用实验发现了电磁波之后,法拉第-麦克斯韦电磁理论得到了突飞猛进的发展,呈现出“电的世界”,电磁场成为人类社会的一种不可缺少的“粮食”。而那些死抱着牛顿瞬时超距作用不放的牛顿继承者们,只好让他们永世生活在“蜡烛”时代了。

1) 牛顿后来对这种概念也曾有过怀疑,他曾写道:“一个物体可以通过没有任何别的中介的真空作用于远处的另一物体,……这对我来说是如此之荒唐,使我相信没有一个在哲学上有充分思考才能的人 would 陷入这种观点。”

法拉第-麦克斯韦电磁理论不但是对电磁作用中的瞬时超距作用概念的否定,也是直接与经典力学中的相对性原理格格不入的。在光学实验和电磁学实验明显地与“静止以太说”矛盾的情况下,为了消除这种矛盾,菲兹杰若、洛仑兹和拉摩曾假定,在以太中运动的尺子会收缩,运动的钟会变慢,把“静止以太说”发展成“收缩以太说”。为了使麦克斯韦方程与相对性原理符合起来,洛仑兹和彭加勒曾在数学形式上达到这一目标,导致了“洛仑兹变换”的出现。但是他们的概念仍然束缚在牛顿的绝对时空观念之中。爱因斯坦放弃了绝对时空观,废弃了以太,把电磁辐射看成是客观实在的物质。这种物理观念的突破是使他在对法拉第-麦克斯韦电磁理论的研究之中提出狭义相对论的关键所在。按照狭义相对论,运动的尺子缩短了;运动的时钟走慢了;不同地点的同时性在不同的观察者看来不再一样了。另一方面,爱因斯坦(1916)又把狭义相对性原理推广成任意坐标变换下的广义相对性原理,同时假定惯性力与引力等价(即所谓“等效原理”),提出了广义相对论,预言了光线偏折、谱线红移、水星近日点进动和引力波的存在。牛顿万有引力定律也就成为只是在静态情况下成立的理论了。至此,曾经有人以为,如果说法拉第-麦克斯韦电磁理论是从电动力学的领域内消除了超距作用,那么,相对论则由于消除了时间和空间的绝对性而在整个物理学领域内把“超距作用”开除了出去^[1]。可是,电磁理论和相对论的出现并不是“接触”作用观念同“超距”作用观念之间的斗争的完结,相反,却是在新形式下的开始。事实上,一方面决不能认为狭义相对论是普遍适用的框架。在有重力时它要由广义相对论所代替;而在 10^{-13} 厘米以下的范围内直到现在还没有为实验证实,人们正在这一范围内尝试寻找超光速传播的相互作用的可能性。另一方面,长期以来为建立满足相对论的超距作用理论,很多人进行了各种努力。例如,讨论的比较多的是超距作用电动力学。众所周知,麦克斯韦电动力学在处理荷电粒子相互作用方面有着基本的困难。点电荷是场的奇点,在点电荷所在的位置上,它自身产生的场变得无穷大,因而点电荷同自身场的作用(即自作用)成为无穷大,这就是所谓的无穷大自作用的困难。为了解决这一困难,有着多种尝试^[2],超距作用理论就是其一。在相对论以前,高斯就曾建议把牛顿的瞬时超距作用修改成以光速传递的超距作用。这就是后来发展起来的以光速传播的超距作用理论的出发点(有时也把这种理论称为“直接作用”理论,在这种超距作用理论中,远离物体之间的相互作用信息不是以无穷大速度而是以光速、不是通过物质而是通过真空直接传递的)。福克(1929)曾经指出,在物体的电磁作用理论中,可以把电磁场量消去,代之以物体运动状态的变数(如坐标、速度和加速度等等)。因而荷电粒子体系的

作用量只是粒子的坐标、速度和加速度等等的函数,没有电磁场量出现,没有自作用项进入。粒子的运动方程是由这个作用量对粒子的世界线变分(通常称为福克变分原理)得到的,这就回避了粒子无穷大自作用的困难。但是,在这种非瞬时的超距作用理论中,每个荷电粒子感受到的势是由其他粒子产生的李纳-维谢尔推迟势和超前势的平均值。大家知道,在通常的电动力学中,也有推迟解和超前解。超前解是同人们的经验矛盾的,通常只取推迟解,而把超前解排除在外。所以人们认为超前势的出现是福克超距作用理论中的一个困难。另一方面的问题是,如果只有荷电粒子而无场存在,那么这种理论就不能描写电磁辐射现象。为了解决这些困难,威勒和费曼(1945、1949)^[3]假定,在远离荷电粒子的周围,存在着由大量粒子构成的完全吸收体(相当于加上一个边界条件),吸收体和荷电粒子的势给出的是与经验符合的推迟效应。有人证明^[4],这种理论与通常的“粒子加场”的电动力学等价。对于这一理论的不同方面,也有不少人进行了一些讨论^[5]。最近还有人把它推广成了量子理论^[6]。但是这种超距作用理论并没有正面解决无穷大自作用的困难,而是回避了这一问题(从兰姆移动和电子的反常磁矩来看,电子的有限自作用效应似乎是应当存在的)。相反,却把相互作用机制弄得模糊不清,带上了神秘主义的色彩。

除了上述以光速传递的超距作用电动力学以外,也有人讨论过相对论性超距作用量子场论和引力理论等等^[7-10]。然而,所有这些超距作用理论的讨论只不过是理论物理研究工作中的一个小小的侧面。为了解决经典场论和量子理论中的基本困难,人们所做的大量研究都是排除了超距作用的理论工作。例如,寻找传递相互作用的中间粒子以及基本粒子的结构理论等等,其中不少理论曾取得一定的成功。

综上所述,我们看到,从接触作用观念到牛顿瞬时超距作用理论、从经典力学到电磁场理论和相对论的历史发展,雄辩地证实了毛主席的伟大论断:“**人类的历史,就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史。这个历史永远不会完结。**”^[1]在整个物理学发展的历史过程中,始终贯穿着唯物主义同唯心主义的斗争。虽然,以“超距作用”形式出现的具体物理定律(例如牛顿万有引力定律以及静电的库仑定律等)近似地反映了某些客观自然规律,对物理学的发展曾起过一定的历史作用;而且,在人们认识自然规律的一定阶段和一定的近似条件下,它们的出现是必然的,有时甚至是必要的;然而,一切“超距作用力”,不管是以无穷大速度传递的牛顿瞬时超距作用力还是以光速传递的相对论性超距作用力,都具有“超距”性质。所谓“超距”,

1) 《毛主席语录》,人民出版社,174。

[名][词][浅][释]

兰姆移动和电子反常磁矩

按照狄拉克的电子理论, 对于在库仑场中运动的电子, 主量子数 n 和总角动量子数 l 相同而轨道角动量子数 $l = l \pm \frac{1}{2}$ 的两个态的能级应完全重合。

1947 年兰姆等人精确测量了氢原子的 $2^2S_{1/2}$ ($n = 2, l = \frac{1}{2}$) 和 $2^2P_{1/2}$ ($n = 2, l = \frac{1}{2}, l = 1$) 两个态的能量差, 发现 $2^2S_{1/2}$ 态的能量略高于 $2^2P_{1/2}$ 态的能量。这两个能级之间的跃迁频率为 $\frac{\Delta E}{h} = 1057.90$

± 0.06 兆周/秒。原子能级的这种对狄拉克理论的偏离称为兰姆移动。狄拉克理论还断言电子的磁矩 μ_e 等于一个玻尔磁子 $\frac{eh}{4\pi m_e c}$ 。1948 年库希等人的实验发现 μ_e 略大于一个玻尔磁子。 μ_e 值对狄拉克理论的偏离称为电子的反常磁矩。 μ_e 的实验值为 $(1.0011596577 \pm 3.5 \times 10^{-9}) \frac{eh}{4\pi m_e c}$ 。按照量子电动力学, 上述两个效应都来源于电子与它自身所产生的辐射场以及与“真空”的相互作用。在量子电动力学中对电子的自作用及它与“真空”的作用也得到一些无穷大的项, 这反映了点模型场论的基本缺陷。但是这些无穷大项可归结为电子的质量和电荷的改变。如果用电子质量和电荷的实验值代换掉这些无穷大项, 就可以对其他的物理量得到有限的结果。理论的计算得到兰姆移动值为 $\frac{\Delta E}{h} = 1057.911 \pm 0.012$ 兆周/秒, 电子磁矩为 $\mu_e = (1.0011596554 \pm 3.3 \times 10^{-9}) \frac{eh}{4\pi m_e c}$, 在误差范围内与实验完全符合。这个事实证明电子与它自身的场是有相互作用的。

就是说, 远离物体之间的相互作用信息不是通过物质而是通过真空传递的, 伟大的列宁告诉我们: “世界上除了运动着的物质, 什么也没有, 而运动着的物质只有在空间和时间之内才能运动。”¹⁾ 因此, 神秘主义的“超距”观念是与唯物主义不相容的。基于这种观念建立起来的理论体系总是要为人类的社会实践所否定。而那些以超距作用形式出现的物理定律作为一种近似或一种暂时的手段, 只不过是人类正确认识自然界这出长剧中的“前奏”或“插曲”。然而, 在人们深入研究的过程中, 一旦搞清了“超距作用力”的物质机制, 就将把人类的认识带到更高级的阶段。

感谢中国科学院原子能研究所何祚庥、数学研究所戴元本, 和复旦大学物理系孙鑫等同志对本文提出的宝贵意见和帮助。

参 考 文 献

- [1] (a) 1946 年,《自传》,《阿尔伯特·爱因斯坦: 哲学家-科学家》, 纽约 (1957), 55-61.
(b) 伯格曼,《相对论引论》, 人民教育出版社中译本 (1961), 150.
- [2] 张宗燧,《电动力学及狭义相对论》, 第九章, 科学出版社 (1957).
- [3] Wheeler, J. A. and Feynman, R. P., *Revs. Mod. Phys.*, 17 (1945), 157; 21 (1949), 425.
- [4] (a) Panofsky, W. and Phillips, M., *Classical Electricity and Magnetism*, Addison-Wesley Publ. Co., Inc., Reading, Mass. (1962), 394.
(b) Leiter, D., *Am. J. Phys.*, 38 (1970), 207.
- [5] Andersen, C. M., and Von Baeyer, H. C., *Phys. Rev.*, D5 (1972), 2470.
- [6] Hoyle, F. and Narlikar, J. V., *Ann. Phys. (N.Y.)*, 54 (1969), 207; 62 (1971), 44.
- [7] Dirac, P. A. M., *Revs. Mod. Phys.*, 21 (1949), 392.
- [8] (a) Thomas, L. H., *Phys. Rev.*, 85 (1952), 868.
(b) Bakamjian, B. and Thomas, L. H., *Phys. Rev.*, 92 (1953), 1300.
(c) Bakamjian, *Phys. Rev.*, 121 (1961), 1849.
- [9] Sudarshan, E. C. G., *Fields and Quanta*, 2 (1972), 175
- [10] Volkov, A. B., *Can. J. Phys.*, 49 (1971), 201.

1) 列宁,《唯物主义和经验批判主义》, 人民出版社 (1960), 169.