

光和实物的统一性与物理学基础探讨 (I)

相对论和量子论带来的困惑

王 国 文

(北京大学物理系,北京 100871)

本文通过对现有理论和实验事实的考察,对电磁波或场作为物质看待提出疑问;对于相对论,指出它对光与实物缺乏统一的认识和对等的处理方式;关于量子论,重点对波粒二重性解释的论战作了简介和简评;最后,怀着自然界具有客观实在性和统一性的信念,对所述观念上的矛盾的起因做了推测。

我们都有深刻印象,在19世纪至20世纪交替时期,基础物理学的成就特别大。19世纪后叶,物理学界从实验和理论两个方面艰难地探索以太的存在和黑体辐射谱的解释,导致了现代物理学的两大台柱——相对论与量子论——的建立,从而开始了一个技术上突飞猛进的时代,我们因而有了核能利用装置、高能加速器、电子计算机、宇宙飞船、激光器和高温超导体等奇妙的东西。但是,在赞叹种种伟大成就之际,我们或许会有一种不安的感觉,那就是,在基础物理学中存在着观念上的巨大困难。的确,相对论与量子论成就辉煌,但是在二论框架内,光与实物处于不平等的地位,微观粒子的波粒二重性极难获得合理的关联,而更困难的要数二论本身的融合问题了,物理学家几乎落到了山穷水尽的地步。

面对这种危机,我们首先需要现代基础物理中观念上的矛盾进行反思。下面这些或许是最感困惑的问题。

一、电磁波或场是物质还是其属性?

通常见到的波动是实物的属性,例如湖面上的涟漪是水面起伏形成的;麦浪是麦草梢头起伏形成的,凡是这类波动都有干涉和衍射现象。显然这些波动不是物质,而是水和麦草的运动属性。那么电磁波是什么物质的属性呢?

曾有人设想电磁波是以太的运动属性,然而这种设想被种种实验事实的理论分析断然否定了。似乎已有了结论:光就是电磁波,电磁波是一种物质,那么场也是一种物质。这一结论意味着光具有连续的结构,它与牛顿的光具有分立结构的观点相对立。

但是,一个弱光束多次分割后的某些部分可能是空的,即其中探测不到光子,这说明电磁波并不一定包含能量和动量,看来电磁波本身不象是物质。爱因斯坦把电磁波看作是虚幻的波,其波幅绝对值的平方决定光子出现的几率^[1]。他称这种波为鬼波。如果他的论断是对的,那么电磁波或场是不是物质就成为一个问题了。光与实物及类似的东西都是物质,都是物理实体,但电磁波或场也许又当别论了,可能是物质的属性。这是一个尚未解决的问题。

二、光与实物统一认识的困难

光与实物的统一认识是相对论框架内未能解决的问题。看来有必要再考察一下相对论是如何以不同方式对待光与实物的。爱因斯坦在1905年发表的论文《关于运动媒质的电动力学》中,提出相对论的两个基本原理——相对性原理和光速不变原理。可以注意到,第二个原理唯独涉及光的传播,即相对论一开始就置光与实物于不对等地位。还有,在相对论中,由质

量-速度(或能量-速度)关系式勉强推出一个论断:光子的静止质量为零。做这种方式推论也表示相对论对光与实物的处理是不对等的,因为质量-速度关系式的导出完全是针对实物的,与光毫不相干。还有,已知在真空中光波的相速度为 c ,而速度为 v 的实物粒子的相对论性德布罗意波的相速度为 c^2/v ,相对论对这种超光速相速度的含义也未能加以说明。

现在看来,为使理论中光与实物的地位对等,或许相对性原理要加以推广。而且也许,物质有一个极限速度(光速)假设比光速不变假设更有普遍意义。有的文章里已把相对论的第二个原理写成“在自然界存在一个不变的极限速度”^[2]。

三、无人懂得量子力学

德布罗意从爱因斯坦的光的波粒二重性观点推论实物粒子具有波动性,并且发现了一个自由实物粒子的动量 p 与该粒子连带的无限伸展的平面波的波长 λ 的关系式,即

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad \text{或} \quad p = \frac{h}{\lambda},$$

其中 h 是普朗克常量; $m = m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$, m_0 是该实物粒子的静止质量。要知道康普顿曾提出过同样的公式^[3]。

海森伯感到玻尔的原子理论未有经验证明,因为那是根据不能直接可观察的东西,诸如轨道中运动电子的图像。他发展了一种表述微观过程的矩阵力学体系。稍后,薛定谔把德布罗意关于自由粒子运动连带着波的观念用到束缚粒子上,提出了波动力学。两种新力学不久被证明是等价的,后来二者都称为量子力学,它是研究微观世界的工具。

然而,至今物理学家们还不认识统治微观世界的那种鬼波,对量子力学的形式体系,量子力学的专家也只会用,而还不理解。费因曼(Feynman)说过:“无人懂得量子力学。”^[4]

量子力学一问世,诠释的论战就开始了,而且60多年来争论一直未衰。下面将列举几种

典型的各异的诠释,可以看到,争论不只是技术性的,还涉及哲学观点。试看孰是孰非及症结何在。

早在量子力学建立之前,1923年,德布罗意产生了一个思想:头为粒子身为波的光量子不是自然界唯一的“半人半马”,微观世界的一切粒子,一般来说,以至一切物体,都应当具有这种古希腊神话中的半人半马形象。往后,在他的所谓“双解理论”中考虑光的波动方程和电子的波动方程(当时误认为是克来因-戈登方程)都有两种解:一种连续函数 ψ 和一种运动奇点函数 u 。与玻恩的几率解释一致,德布罗意认为 $|\psi|^2$ 是粒子出现的几率密度;而函数 u 则描述粒子本身的运动轨道,粒子沿着等位相面的垂线运动。在他看来,在奇点区域能量集中所代表的粒子基本上保持经典粒子性质,即有精确的位置和速度,但不象经典粒子,粒子是被一个扩展波引导着,因此受到远处障碍物的衍射影响。所以,他认为不是波或粒子,而是波与粒子共同构成物理实体。

薛定谔坚持波包与粒子等同的想法。他对自己发现的波函数 ψ 做这种诠释看来是最为“自然的”和最为“直观的”。考虑到这种诠释是继承了古代的原子观念,薛定谔曾有趣地称它的创始人留基伯(Leucippus)和德谟克利特是最早的量子物理学家。然而,薛定谔的这种“自然的、直观的”诠释遇到了严重的困难。问题在于,用这类波叠加而成以群速运动的波包在行进中原则上要发散,只在特殊情况下能保持稳定,因此这种波包不能视作全同于一个本性上稳定的粒子。

1926年,玻恩提出了波函数的几率诠释。他用量子力学微扰法对电子与原子碰撞进行计算发现,如果得到的公式容许从粒子观点来解释,那么只有一种可能性,即归一化波函数的绝对值平方是量度电子出现的几率密度。但是,玻恩的思想中包含着神秘的东西,因为对于象双缝衍射,否定了电子(或光子等)一定经过一个缝或另一个缝的想法,如坂田昌一所说:“我们要进入一个房间,一个人绝对不能通过两个

人口，而电子却可以做到这一点。”^[9]玻恩诠释中的统计性不是指我们了解得不够详尽，而是关系到对世界本质的理解。他认为宇宙中的事物偶然性是根本的，必然性是偶然性的平均表现。

鉴于量子力学方法的物理诠释很分歧，玻尔在1927年提出了互补描述以取代因果描述，后来被称为互补原理。他曾写道：“一方面，正如通常所理解的，一个物理体系的态的定义，要求消除一切外来的干扰。但是在那种情况下，按照量子公设，任何的观察都将是是不可能的，而且最重要的是，空间概念和时间概念也将不再有直接的意义了。另一方面，如果我们为了使观察成为可能而承认体系和不属于体系的适当观察器械之间有某些相互作用，那么体系的态的一种单义的定义就很自然地不再存在。就这样，量子论的本性就使我们不得不承认时空标示和因果要求是依次代表着观察的理想化和定义的理想化的一些互补而又互斥的描述特点，而时空标示和因果要求的结合则是经典理论的特点。”^[6]他解释说：“互补一词的意义是：一些经典概念的任何确定的应用，将排斥另一些经典概念的同时应用，而那另一些经典概念在另一种条件下却是阐明现象所同样不可缺少的。”^[7]量子力学的互补原理诠释遭到爱因斯坦等许多物理学家的反对。

爱因斯坦相信，自然界不依赖于感觉主体独立存在，事物的联系具有因果性，以及自然规律根本上是决定论的。因此，他认为微观世界和宏观世界一样具有实在性，物理体系的实在状态原则上可以用物理的表达方式来描述，而物理状态的变化总是连续的。据爱因斯坦看来，决定论是物理学的纲领，量子力学的描述是不完备的。如果理论是完备的，那么测量使得波包编缩意味着发生奇怪的超距作用，这与相对论的假设相矛盾。爱因斯坦反复强调： ψ 函数所描述的并不是实体。他还认为麦克斯韦方程的解也并不是实体^[8]。

爱因斯坦反对非决定论，他无论如何也不能采纳玻恩关于电子和其它粒子的几率波的思想，他把几率看成掩盖对原因的无知的一种权宜之计。因此，他希望量子力学终于被证实为可以从一种更深入一步的几率性理论中推导出来。爱因斯坦认为：“目前量子理论的这种统计特征应当是量子力学对体系描述的不完备性的一个必然结果，而且不再有任何理由可以假定物理学将来的基础必须建立在统计学上。”^[9]不过，爱因斯坦没有明确支持过潜变量诠释。他觉得理论中未考虑到某种东西，即某些“隐含的原因”还没有揭露出来。爱因斯坦本人早在1927年第五次索耳维会议上看来表示倾向于对量子力学做系综诠释。1936年他在文章《物理学与实在》中给出了明确的观念：“ ψ 函数所描述的无论如何不能是单个体系的状态，它涉及的是多个体系，从统计力学的意义上来说，就是‘系综’。如果说，除去某些特殊情况， ψ 函数只提供可度量的统计数据，其理由不仅在于度量操作带进了一些只能在统计上掌握的未知因素，而且也因为 ψ 函数在任何意义上都不描述单一体系的状态，不管单个体系有没有受到外界作用，薛定谔方程都决定着系综经历的时间变化。”^[10]对单个粒子的态函数作系综诠释也的确是很难让人接受的。

鉴于量子力学对测量结果的预言具有统计性质，于是一种称为随机诠释出现了，它视量子力学基本上为一种随机过程的经典理论。还有赖欣巴哈(Reichenbach)对量子力学作三值逻辑分析，他把不确定也看作是一种逻辑状态。玻恩曾经说：“三值逻辑肯定是有兴趣的，但我不相信自然哲学会由于玩这种符号游戏而得益甚多^[11]。此外，还有一种叫做多宇宙诠释，是1957年厄威瑞特提出来的，企图在概念上消除测量时奇怪的波函数编缩^[12]。

是不是可以说，以上各家的论说似瞎子说象，各有各的道理，但是终究未揭真相，期待有人把他们各自坚持的正确一面综合出一个完整的形象。

对于这场无休止的争论，许多人期待有一个裁决实验来判定爱因斯坦和玻尔谁是是非非。如果在实验上能够证明量子力学中局域潜变量

不存在,那么就可以最终宣告爱因斯坦失败了。且看是否能如愿以偿。

贝耳(J.S Bell)在1956—1966年根据一条公理:远距离的两个系统具有局域性(即无超光速关联)或分离性,提出一个不等式,并“证明”严格重复量子力学预言的任何潜变量理论都是非局域的理论。还有人“证明”,即使没有局域性要求,潜变量理论与量子力学不相容。1969年,克劳赛(Clauser)等人证明贝耳的分析可以推广到实际系统进行实验检验^[13]。例如,一个光源发射分离又相关的光子对,用远隔的不同取向的偏振器,可进行光子的偏振的相关测量。对于两个偏振器的特殊取向,由量子力学预言的两个光子关联不服从贝耳型不等式。

迄今已有若干个实验企图检验贝耳不等式,认为最成功的是1982年阿斯佩(Aspect)等的实验,实验结果违反贝耳不等式^[14]。于是一些人宣称裁决实验已经问世,判决了潜变量不可能存在,说量子力学无疑是一个完备的理论,爱因斯坦错了。对于这种说法我们不能轻易相信,因为贝耳的潜变量理论是用类似经典统计的方法建立的,运用这样的方法是否合理是个疑问。现在有人在分析贝耳不等式建立的根据是否可靠。

四、观念上矛盾的可能起因

现代基础物理学中观念上的矛盾问题,特别是量子力学诠释的问题,半个多世纪来难以解决,症结何在?如果我们对自然界具有客观实在性和统一性的信念未曾被动摇,那么继续探索的勇气不会消失。在探索中,本文作者认为下面三点是值得警惕的:

第一是,成见。成见必然会带来观念上的矛盾,而为了调和矛盾又可能出现种种似是而非的解释,甚至编造出奇特的原理,这是有够多历史教训的。狄拉克在论述物理学家的自然观的发展时强调克服成见的重要性,他说:“那些大的跃进常常在于克服成见。我们长期持有成

见,即是我们无疑地接受了某种东西,因为它似乎如此地明显。后来一位物理学家发现他不得不提出异义,他必须以更精确的某种东西取代那个成见,从而产生某种完全新颖的自然观。”^[15]他还说过:“我认为很可能在将来某个时候,我们会得到一个改进了的量子力学,使其回到决定论,从而证明爱因斯坦的观点是正确的。但是这种重新回到决定论,只有以放弃某些基本思想为代价才能办到,而这些基本思想我们现在认为是没有问题的。”^[16]非常可能有某种深信不疑的成见在妨碍着我们对统治微观世界的鬼波的真面目的认识。

也许,记住燃素说和热质说的兴衰会大有教益。关于燃素和热质的成见曾占了漫长统治地位的历史事实给了我们一个极宝贵的启示:小心不要把物质的属性当作一种物质。比如说现在我们不妨可以问一问,光波是光的属性呢还是光物质本身。

第二是,人为中心。哥白尼革命更广泛的启示是,如贝耳所说:“如果我们不设想以自己为中心,世界会易于理解。”^[17]人是一种实物,光不象实物,现在不妨请你想一想,如果你变成一个光怪,你将会看到什么情景。如同用日心说代替地心说一样,你设身处地站在光的立场上能说些什么。改变一下立场或许对本身及一切事物的本性的理解会变得容易些。如果以人为中心,那么对光的认识就难以做到不失偏颇。或许只有在对光子和实物粒子有一个统一认识的基础上,关于量子本质的谜才易于解开。

第三是,眼见为实。如果囿于经验,则对科学可能有碍开拓和深掘。比如空间的开拓问题,它可能与对光与实物的统一认识有关,因而也可能与量子力学诠释有关。谁都知道,我们的感觉空间是三维的,假如我们是电影银幕上的影像,那么我们的感觉空间就是二维的,这样我们就很难想象三维世界是个什么样子了。尽管三维以外设想的空间看不到,但仍有许多人去考虑它。如果按俗语所说,眼见为实,则哪会有空间第四维,因此认定物理上不需要再开拓

空间了。不过,这种观点是否会妨碍物理学的进展呢?

还有波的层次问题,它可能与量子力学诠释争论的关系更为密切。薛定谔的失败在于他的波包不是总能稳定的,或者说原则上是不稳定的。但是他的波动一元论思路还不能说是一条死胡同,因为我们还有考虑不同波动层次的余地。看来只要能合理地构造一个波包,它与粒子完全等同,那么波粒二重性的因果联系就最终解决。如果事情真是这样,那么这种不发散的波包就是光子与实物粒子统一形式的物理实体。如果一味强调经验,不运用思辩,不去向自然界更深的层次挖掘,我们也许就很难揭开自然界的层层奥秘。囿于经验看来比较保险,但很可能既不利于开拓也不利于深掘。

总之,以上尖锐地提出了现代物理中若干极为困惑的问题,并推测了观念上矛盾的可能起因。当然,对付同样的症结可以有不同的药方,有好的,有坏的,好坏要等待效果来检验。

- [1] M. 玻恩著,侯德彭译,关于因果和机遇的自然哲学,商务印书馆,(1964),96.
- [2] J.D. Jackson, *Phys. Today*, **40-5** (1987), 34.
- [3] A.H. Compton, *Phys. Rev.*, **23-1** (1924), 118.
- [4] R. P. Feynman, *The Character of Physical Law*, M.I.T. Press, Cambridge, Mass., (1978), 129.
- [5] 坂田昌一著,安度译,自然科学哲学问题丛刊, No. 3 (1984), 79.
- [6] N. 玻尔著,都韬译,原子论和自然的描述,商务印书馆,(1964),40-41.
- [7] *ibid*, 9.
- [8] R.S. Shankland *Am. J. Phys.*, **31-1** (1963), 47.
- [9] 许兰英,范岱年编译,爱因斯坦文集,第一卷,商务印书馆,(1976),38.
- [10] *ibid*, 367.
- [11] Ref. [1],112.
- [12] H. Everett, III, *Rev. Mod. Phys.*, **29-3** (1957), 454.
- [13] J.F. Clauser et al., *Phys. Rev. Lett.*, **23-15** (1969), 880.
- [14] A. Aspect et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49-25** (1982), 1804.
- [15] J. Mehra (ed.), *The Physicist's Conception of Nature*, Reidel, Dordrecht, (1973), 1.
- [16] P.A.M. 狄拉克著,张宣宗等译,物理学的方向,科学出版社,(1981),9-10.
- [17] J.S. Bell, *Phys Reports*, **137-1** (1986), 7.

(上接第 435 页)

四、场离子显微镜原子探针技术的局限性

场离子显微镜原子探针所研究或分析的材料,必须有一定的导电性和一定的强度。一次实验只能观察限于直径为 200nm 的范围。试样必须呈针尖状,限制了可研究材料的类型。分析是破坏性的,不能在同一试样上重复分析。将该技术与常规电子显微镜等技术结合使用才能取得最佳效果^[16]。

- [1] 陆华,物理,**12**(1983),38.
- [2] E. W. Müller, *Z. Tech. Phys.*, **17**(1936), 412.
- [3] E. W. Müller, *Z. Tech. Phys.*, **131**(1951), 136.
- [4] E. W. Müller and J. A. Panitz, *Proc. 14th Int. Field Emission Symp.*, National Bureau of Sta-

- ndards, (1967).
- [5] E. W. Müller et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **39**(1968), 83
- [6] W. P. Poschenrieder, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, **6**(1971), 413.
- [7] W. P. Poschenrieder, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, **9**(1973), 357.
- [8] E. W. Müller and S. V. Krishnaswamy, *Rev. Sci. Instrum.*, **45**(1974), 1053
- [9] 沙维,物理,**18**(1989),436.
- [10] A. Cerezo et al., *Materials Characterization (Metallography)*, **25**(1990), 143.
- [11] W. Drachsel et al., *J. de Physique*, **50-C8**(1989), 541.
- [12] W. Sha et al., *J. de Physique*, **50-C8**(1989), 407.
- [13] A. J. Melmed, *J. de Physique*, **50-C8** (1989), 547.
- [14] N. Ernst et al., *J. de Physique*, **50-C8** (1989), 471.
- [15] A. J. Melmed et al., *J. de Physique*, **49-C6** (1988), 459.
- [16] G. D. W. Smith, in *Metals Handbook*, Vol. 10, 9th ed., ASM, (1986), 583.