

学术论文

# 波粒二象性理论的若干问题

黄志洵

(北京广播学院, 北京 100024)

**[摘要]** 论述了光波和物质波的波粒二象性理论的发展, 讨论了该理论的存留问题。认为光子的静质量和光子的内部结构仍是科学中的关键性疑点。指出, 虽然波粒二象性成立的前提是波长足够小, 但在现有理论中却提不出一条清晰的界线。讨论了光波和电磁波是物质还是物质属性的问题。提出了对 de Broglie 波超光速相速的疑问。分析表明, 如何建立电磁脉冲的粒子形象的问题仍需解决。此外, 探讨了当电磁脉冲以超光速传播时相对论是否受破坏。最后, 讨论了消失波的粒子性和虚光子问题。

**[关键词]** 光子; 光波; 物质波; 波粒二象性; 孤子; 电磁脉冲; 超光速; 消失波; 虚光子

**[中图分类号]** O412; O413 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2002) 01-0054-10

波粒二象性的一般原理已为人们所熟知, 但笔者认为它还不是十分严谨而成熟 (即充分自洽) 的理论。A. Einstein 过去多次把电磁波称为“引导光子的鬼波” (ghost waves) 决非偶然。对于电磁波 (光波) 的本性再作研究探讨决不是多余的。

## 1 光子理论的提出和确立

早在 I. Newton 时代, 光的微粒说即被一些思想家所坚持。但在后来 (19 世纪初), 由于 A. J. Fresnel 的关于光波干涉的出色发现和研究, 光的波动说取得成功, 使几乎所有物理学家都抛弃了微粒说。1865 年, J. C. Maxwell 提出了“光是一种按电磁规律通过场传播的电磁扰动”, 即光是电磁波的一种。1887 年, H. Hertz 发现了电磁波。然而, 到 20 世纪之初, 电磁理论 (认为电磁波能量与场幅二次方成正比, 与频率无关) 却解释不了光照向金属时产生电子射线的有关现象, 这里关键的因素恰恰是频率。就是说, Maxwell 电磁理论无能力解释光电效应实验。1900 年, M. Planck 提出能量子 ( $hf$ ) 的概念后, 1905 年, A. Einstein 设想“光的能量不是连续分布在空间中, 而是由数目有限的、局限在空间各点的能量子所组成; 它们能运动, 但不能再分小, 只能整个地被吸收或产生”。

Einstein 为光电效应导出了一个简单的公式:

$$mV^2/2 = hf - P,$$

式中:  $P$  为电子逸出金属所要消耗的功

上式表明释放的电子的速度主要取决于照射金属的光频, 这与实验完全一致。

因此, 正如 N. Bohr 所说, Einstein 对早期量子理论的伟大贡献恰恰在于认识到光电效应之类的物理现象是取决于个体的量子效应。或者说, 任何频率  $f$  (波长  $\lambda$ ) 的辐射均有粒子性, 而粒子的能量  $E$  及动量  $p$  为

$$E = hf \quad (1)$$

$$p = h/\lambda \quad (2)$$

式中,  $h$  是 Planck 常数  $h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

1905 年 A. Einstein 不仅发表了光量子假说, 而且还提出了狭义相对论和质能关系式<sup>[1]</sup>。3 篇文章发表之后, M. Planck 很快接受了狭义相对论, 但对光量子假说却持怀疑和保留态度, 以致在 1909 年的一次学术会议 (正是这次会议使青年 Einstein 跻身于一流科学家行列) 上表现出明显的反对。别人的态度也差不多, 会上唯一赞同的人是 J. Stark。著名的 N. Bohr 直到 1920 年仍然坚持认为: 光子概念提供的辐射的颗粒图景无法与干涉效应 (只能用波动理论描述) 相调和, 而干涉效应对

提供表示式中的频率(波长)定义是唯一手段。

因此,实际上是A.Einstein最早提出光的波粒二象性的。在1909年,他建议说,Maxwell方程组的解除了波以外,还可能有点状的奇异解。多年以后(1927年),Einstein把这个想法应用到广义相对论的场方程上面并取得成功。

光子假说需要实验上的证明。20世纪初俄国物理学家Lebedev的光压实验,以及1949年某位西方科学家完成的“微波的力学效应实验”,都说明光波有能量、光子有动量,但却不能提供更多的细节。1924年,美国物理学家A.H.Compton和中国物理学家吴有训发表了论文“经过轻元素散射后的钼K $\alpha$ 射线的波长”,创造性地设计了一个用X光撞击电子的实验。提出的问题是,当一个光子向一个电子入射并被散射到另一方向时,他们的能量将如何变化?当X光被散射后产生次级X光,其波长 $\lambda'$ 比入射X光的波长 $\lambda$ 大,故可导出:

$$\lambda' - \lambda = (h/mc) \cdot (1 - \cos\theta)$$

式中: $m$ 为光子质量; $\theta$ 为散射角。就是说,按照两球碰撞的动量守恒及能量守恒可算出光波长的变化。实验测量与上式一致。现在大家看到,Compton-吴有训效应证明了光子和电子一样都是物质实体;除此之外,它还证明光子具有正实数的动质量。

1921年A.Einstein因正确解释光电效应获Nobel物理奖;1927年A.H.Compton因光子碰撞电子实验获Nobel物理奖。这两件事是光子假说被普遍接受的标志,也是光的波粒二象性理论被确立的标志。归纳起来,光的粒子性是说:光是由数量巨大的微小粒子(光子)所组成;按照Einstein的理论,光子静质量为零,动质量与频率成正比,是有动量、能量的实体,以光速 $c$ 运行。光的波性是说:光是电磁波的一种,具有波动的一切特征(如有干涉、衍射现象等)。

## 2 de Broglie 和 Einstein 的理论观点

1924年(即光子概念提出19年后),Louis和de Broglie认为波粒二象性并不限于光辐射,在描述物质粒子(例如电子等)的行为时也同样不可避免。他提出,设有一个粒子(能量 $E$ 、动量 $p$ )入射,他必带有一种波动(最早叫相波phase wave,后来叫物质波),其频率、波长为

$$f = E/h, \quad (1a)$$

$$\lambda = h/p \quad (2a)$$

表面上,式(1a)和(2a)与式(1)、式(2)相同,实际上是完全不同的概念。Einstein是根据光说波有粒子性,提出时已有实验现象支持。de Broglie是根据电子说粒子有波性,过了几年才有实验证明(1928年C.J.Davisson和L.H.Germer的电子绕射实验)。

那么,de Broglie波的性质如何?设其相速为 $V_p$ ,而粒子速度为 $V$ ;则有

$$V_p = \lambda f = (h/mV) \cdot (mc^2/h) = c^2/V \quad (3)$$

注意以上推导引用了Einstein质能关系式;根据相对论, $V \leq c$ ;故有 $V_p > c$ ,即物质波的相速大于光速。de Broglie认为相速不传递信息,完成此功能的是群速 $V_g$ ,并证明

$$V_g V_p = c^2 \quad (3)$$

故粒子速度即群速( $V = V_g$ )。

1927年10月在比利时Bruxell召开了第5届Solvay会议,以“电子和光子”作为中心议题,同时也讨论量子力学的发展。在W.Bragg和A.Compton作学术报告之后,de Broglie最先发言。他回顾Schrödinger波方程和M.Born对函数 $\psi$ 的几率性粒子诠释方面的工作,表示在波动力学和粒子力学方面业已取得了进展。然后,de Broglie问道:“能量呈点状集中的理论,以及假定有 $\psi$ 波存在的理论,都很成功;但二者如何协调一致?!粒子和波的联系是什么?!”随后,他提出了自己的波导引理论(la théorie de Londe-pilote),它强调的是粒子而不是波。1927年的de Broglie双重解理论还不是非线性的;它是说量子力学波方程有两个解,其一是连续波函数 $\psi$ ,是单色平面波;其二是奇异解,奇点代表粒子。并且,前者为后者导向(导航),而粒子仿佛是跨在波上。波导引理论在会议上未受支持(以后de Broglie自己也认为有问题),但会议批评的并不是双重解——50年代以后,de Broglie重视和强调的是非线性方程的双重解理论。至于A.Einstein,他没有就de Broglie的报告发言,而是针对Copenhagen学派讲他的“系综说”:de Broglie-Schrödinger波不代表单个粒子,而表示分布在空间的一个粒子系综。他明确反对下述观点,即 $|\psi|^2$ 表示一个粒子在给定时刻出现在某处的几率,而粒子是照波包进行描述,量子力学可以完备地描写孤立的单过程。1936年,Einstein在一篇文章中更明确地说:“(J.Frank和G.Hertz

的电子碰撞)实验表明,没有两个量子数之间的状态的能量值,故函数 $\psi$ 不能描述物体的均匀状态,而只是一种统计描述。… $\psi$ 函数不能描写单一系统的状态,它涉及多个系统。”<sup>[2]</sup>

1940年,de Broglie认为现有量子力学形式体系不可能与(广义)相对论相协调。1951年,de Broglie说他已“改变了主意,(在科学争论中)转向了Einstein的观点”。1953年(即A.Einstein逝世前两年),Einstein在致de Broglie的信中说:“你建议以下式表示物理实在的完整描述:

$$\Psi = \psi\Omega$$

式中,余因子 $\psi$ 代表波结构, $\Omega$ 代表粒子结构。无疑这里包含着能在实验上接受的令人满意的双重结构概念”。在后来的双重解理论中,de Broglie以下式代替前式<sup>[3]</sup>: $u = F\exp(js/\hbar)$  (5) 式中: $F$ 为粒子结构,而指数项表示波。故相速在指数项中大于光速;而群速在 $F$ 中小于光速。

总之,de Broglie认为物质波应被描述于物理空间而非组态空间,而粒子必须永久局域在物质波中。自50年代起,他开始重视非线性的作用,认为要正确描写波和粒子的缔合必须有两个方程,一个是描写波动的线性方程,另一个是描写粒子结构的非线性方程<sup>[3]</sup>。

当我们研究波粒二象性问题时,必定会考虑到孤立波(solitary wave)和孤立子(soliton)在该理论中所起的作用和地位。正如大家所知,非线性科学的发展是1960年以后才加速进行的。然而,50年代初de Broglie就开始关注非线性方程,并引用19世纪即已发现的孤立波的例子。1956年de Broglie指出,与物质波相缔合的粒子形状与孤立波十分相似,方程中的非线性项将使表征粒子的奇异解成为可能。de Broglie和他的学生们所说的“驼峰波”、“驼峰解”实际上就是孤立波和孤立子,并体现了de Broglie的下述思想:粒子就是局域于波中的峰<sup>[4]</sup>。

联系到后来(70年代)对非线性Schrödinger方程(NLS)的研究,1971年Zaharov和Shabat用逆散射变换法求解NLS,得到亮孤子解,后来用于描述反常色散时窄脉冲在单模光纤中的传播。然后又用改进的逆散射变换法求解NLS<sup>+</sup>(反号NLS),得到暗孤子解,后来用于描述正常色散时窄脉冲在单模光纤中的传播。亮、暗孤子的共同特点是恒速运动和相互作用后不变形,呈现出鲜明的

粒子性质。

我国科学家亦曾进行研究并提出自己的见解。例如,1987~1990年间,沈惠川曾研究非线性Schrödinger方程(NLS)的精确解,是由广义AKNS方程的逆散射变换而得到的。1995年他再次论述这个问题<sup>[5]</sup>,指出当NLS写作

$$j\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = (-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + a|\psi|^2)\psi, \quad (6)$$

可以证明单孤子解为

$$\psi = \sqrt{\frac{2}{a}} \epsilon \cdot \text{Sech}[\frac{\sqrt{2m}}{\hbar} \epsilon (z - \frac{1}{m} \frac{\partial s}{\partial z} t)] \exp(\frac{j}{\hbar} s), \quad (7)$$

$$\text{式中 } \epsilon^2 = -\frac{\partial s}{\partial t} - \frac{1}{2m} (\frac{\partial s}{\partial z})^2. \quad (8)$$

现在的问题是,NLS方程的单孤子解是单个粒子还是系综?为分析起见,必须回忆de Broglie的一个论点:“只有群速才等于粒子的运动速度”。现在,孤立波所在的有效区间称为“奇异区”;de Broglie曾证明,如奇异区的运动速度代表粒子速度,则它必为小于光速的群速。但Schrödinger方程(包括NLS)中的速度 $\nabla s/m$ 只是相速。而且,由于Schrödinger方程没有相速群速之分,故该奇异区不可能是单个质点(de Broglie说粒子速度只能是群速)。因而,文献[5]认为NLS方程的单孤子解不是单粒子,而只能是系综。这些分析意见与A.Einstein于1927年10月在Solvay会议上的发言是一致的。

### 3 Bohr的互补性思想

de Broglie的贡献是把波粒二象性概念推广到实物粒子,预言了电子衍射。E. Schrödinger(1926年)把Hamilton变分原理应用到电子的物质波上,得到了波函数 $\psi$ 的二阶偏微分方程。开始时是物质波的波方程,随后推广为普遍适用的方程。Schrödinger方程简单明快,它的发现是波动力学诞生的标志,使量子力学建立在波粒二象性基础上。但是,也有人认为量子力学的两种形式体系(W.K.Heisenberg的矩阵力学和Schrödinger的波动力学)正代表粒子和波的不同方向,加深了波、粒子两种图像之间的矛盾。或者可以这样说,经典作家(物理学大师)未能向人们提供协调一致的数学物理图像。除上述例子之外,还要看看de Broglie的光子波动力学与E. Schrödinger的量子波动力学是否符合。

现在 Schrödinger 认为，一切物理现象均可归结为波，即某种连续介质的分布和运动。正是波构成了基本的物理实在，而 Schrödinger 波方程的本征解迭加而成的波包就是粒子。N.Bohr 对此作了批评，他指出，波包在传播过程中必然逐步扩散（发胖）；换言之，波包缺乏粒子所具有的稳定性，因而上述论断不能认为是正确的。……后人评价这事时开玩笑说：“Schrödinger 方程比 Schrödinger 本人更聪明”。

N.Bohr 不是量子力学发明人之一，但却始终不渝地在思考关于粒子和波这两种图像的矛盾问题。最早，他是光的波动理论的坚定捍卫者。然而，Compton - 吴有训效应对光子假说给予了绝对的支持。因此，在 1924 年，Bohr 和 H.A.Kramers 及 J.C.Slater 三人合写了一篇文章；为了解释光的波动图像和粒子图像之间的明显矛盾，企图使用几率波（probability waves）的概念。电磁波不被看成真实的波，而被解释成几率波，它在每处的强度决定该处的原子吸收或发射一个光子的几率。这种彻底的几率方法是以能量、动量只在统计上守恒为基础。……我们知道，在量子力学成型之后，几率波的概念是重要的和有用的，特别是 M. Born 作出了重要贡献。但上述 BKS 论文却是错的，不可能取代 Einstein 的关于辐射的量子结构的观念。

对 N.Bohr 而言，如果说 Compton - 吴有训实验尚不足以使他接受光子假说；那么，de Broglie 波的提出及实验证明，以及 P.Ehrenfest 主持的一项实验（该实验证明对 canal rays 的处理波动理论和粒子理论得出同样结果），最终使 Bohr 认识到“既是粒子又是波”似乎是自己的物理思想的唯一出路。……但是，1925~1927 年间，量子力学大致成型（其中包括著名的 Heisenberg 测不准关系式）；在这样的背景下，W.K.Heisenberg 和 N.Bohr 认为，任何物理量只在人们进行观察或测量时才有意义。例如对于一个电子，当人们以实验测出其能量、动量时，便认为它是粒子；当人们以实验测量其绕射并得出波长，便认为它是波。这样，电子究竟是粒子还是波，要看观察、测量而定。事前约定是粒子或波，以及说既是粒子又是波，均无意义。

W.K.Heisenberg 与 N.Bohr 多次讨论。1927 年 5 月，Heisenberg 在关于测不准关系式的论文中增加了一个附注，说“Bohr 使我认识到实验观察

中的测不准性同时与波粒二象性有关，而不是只起源于不连续的粒子或连续的波”。这是讨论测不准关系式的起源，Bohr 强调波粒二象性是根本原因。9 月，Bohr 在意大利 Como 发表演讲，正式地、全面地阐述了他的互补性（Complementarity）思想。Bohr 认为，波粒二象性是互补原理的绝妙例证——波在时空的分布是直接联系 space-time 标示，服从迭加原理；点状粒子则以动量、能量为特征，直接与因果描述相联系，服从动量、能量守恒。这样，波与粒子呈现出互斥的一面。但这两种图像又是缺一不可、同样重要，因而它们互为补充<sup>[7]</sup>。在 Bohr 看来，“Contraria sunt complementa”（拉丁文“互斥即互补”），笔者认为其意可以用 8 个汉字来比喻——对立统一，相辅相成。

必须注意的是，de Broglie 的物理思想与 Bohr 不同<sup>[3]</sup>。Bohr 相信一种两面性的物理实在，即某种情况下表现为粒子的东西在另一种情况下表现为波；而 de Broglie 则认为，只有一种东西——波和粒子的缔合，在同一时刻既是波、又是粒子。

#### 4 光子的质量问题

在物理学史上，定义质量曾遵循不同的途径。经典力学认为质量是力与加速度之比，即  $m = F/a$ 。1901 年，W.Kaufmann 通过对  $\beta$  射线的实验，证明电子的荷质比（ $e/m$ ）与速度有关；因而人们认为电子没有力学质量（它仅与加速度相联系），仅有电磁质量。1904 年，H.A.Lorentz 推导的质量-速度关系式，从而也肯定“电子质量纯为电磁性质量”的观点。1905 年 A.Einstein 建立了狭义相对论，得到了相同的质速关系，并把质量与能量联系起来，因而，相对论的质量观是由能量来规定的，即把质量看成是能量的另一种表现形式。光子不带电荷，呈电中性，似无电磁质量之可言；故只能从力学质量和能量出发来讨论。

在众多的基本粒子之中，以光速  $c$  运行的粒子主要有两种：1905 年由 A.Einstein 提出的光子（photon），和在 30 年代由 W.Pauli 和 E.Fermi 预言、1956 年由 C.L.Cohen 和 F.Reines 发现的中微子（neutrino）。它们都是不带电荷的中性粒子，前者根据狭义相对论判定光子无静质量，后者按照电弱统一理论判定中微子的静止质量为零。然而，1997~1998 年在日本的多国科学家的联合实验，已经肯定中微子有静质量<sup>[8]</sup>，其值约为  $10^{-33}$  g。



这样一来,光子是否有静质量的问题再次摆在了人们面前。图1是基本粒子族的静质量  $m_0$  的情况的扼要归纳和总结。

狭义相对论提出“光子静质量为零”的论断,专家认为是“勉强的”<sup>[9]</sup>;做这种推论,也证明相对论对光与实物的处理是不对等的。关于光子静质量的研究,在整个20世纪从未停止过<sup>[10]</sup>。不仅如此,对光子静质量的研究导致理论上的重要思考,30年代初,提出了“重电磁场理论”。在  $m_0 \neq 0$  的条件下,保持 Lorentz 不变性成立,放弃相角规范(亦称 U1 规范)不变性,导出所谓重电磁场方程组,也叫 Proca 方程组。正如大家所知,Maxwell 方程组由4个偏微分方程组成;现在,有两个方程没有变化 ( $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ ,  $\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \partial \mathbf{H} / \partial t$ )。而在另外两个方程(关于  $\nabla \cdot \mathbf{E}$  和  $\nabla \times \mathbf{H}$ )中,等式右方多了一个与  $m_0$  有关的项。显然,若  $m_0 = 0$ , Proca 方程组即简化为 Maxwell 方程组。或者说,Proca 方程组是 Maxwell 方程组的推广。

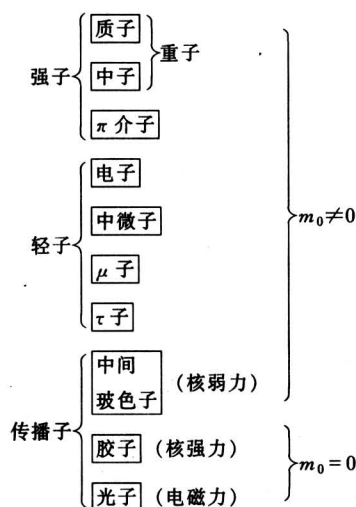


图1 基本粒子的静质量

Fig. 1 Rest mass of basic particles

根据 Proca 重光子理论设计了许多实验来测量  $m_0$ , 在这些设计者当中包括 L.de Broglie 和 E. Schrödinger。de Broglie 在 1940 年出版了《光子的波动力学》一书,其中提出了利用双星观测是确定光子静质量的方法;另外,1943 年 E.Schrödinger 提出用静磁场方法确定光子的静质量。说明,无论 de Broglie 还是 Schrödinger 都不曾在自己取得的成就上停顿,亦不受 Einstein 光子概念的束缚;而是

继续思考,以便更清楚地了解和认识光子。

表1列出了与光子静质量有关的情况。

表1 光子静质量的3种可能情况

Table 1 Three situations of the photon's rest mass

编号	$m_0$ 的值	20 世纪的有关研究情况
1	正实数	1936~1975 年间有 19 个测量实例,表示 $m_0$ 可能值在 $8 \times 10^{-59} \text{ g} \sim 8 \times 10^{-40} \text{ g}$ 之间 <sup>[10]</sup> 。另一个情况是,中微子(光子以外唯一以光速运行的粒子)的静质量已在 1998 年经实验验证不为零。
2	0	1905 年 A. Einstein <sup>[1]</sup> 提出狭义相对论,其中第二公设为“光速不变原理”,认为不会有光子的静止系,故推论光子的静质量为零。
3	虚数	1967 年 G. Feinberg <sup>[11]</sup> 提出“快子”理论,认为可能有一种超光速粒子(快子 tachyon)存在,其固有速度大于真空中光速 ( $V > c$ ),其静质量为虚数 ( $m_0 = j\mu$ )。

从能量出发考虑光子质量时排除了对静质量的考虑,以光速  $c$  运动的光子能量为  $mc^2$ ,  $m$  是运动中表现出来的质量。但光子理论认为其能量为  $hf$ , 故有

$$m = hf/c^2, \quad (9)$$

故光子动质量仅取决于频率  $f$ ; 在传播方向上,光子的动量为

$$p = hf/c. \quad (10)$$

这种能量、动量的图像使光子完全形象地粒子化了。由于  $c$  很大,故除非  $f$  很大,否则  $m$  很小。表2是计算所得结果。可见,在从无线电波到 X 射线的广大波段,光子质量都比电子质量小(电子静质量  $m_0 = 9.109534 \times 10^{-28} \text{ g}$ )。

笔者认为,与光子动质量有关的理论陈述并非无懈可击,甚至使人深感困惑。式(1)、(2)表示,任何频率的波动都可能有对应的粒子存在。但事实显然并非如此。可见光(以及波长更短的紫外光、X 光等)采取上述观点不会引起异议,因计算的光子动质量、能量都较大(参见表2)。但对波长较长的波(例如无线电波,  $f < 3 \times 10^8 \text{ Hz}$ ),计算得到的光子动质量、能量都很小,这个粒子性概念就难于建立。极端地说,例如工频(50 Hz),认为它也有对应的“光子”存在显然很荒唐。

表 2 光子的动质量与能量

Table 2 Moving mass and energy of the photon

波段	频率 $f / \text{Hz}$	波长 $\lambda / \text{mm}$	光子能量 $hf / \text{eV}$	光子动质量 $m = hf c^{-2} / \text{g}$
无线电波	$3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^8$	$10^6 \sim 10^3$	$1.2 \times 10^{-9} \sim 1.2 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-42} \sim 2.2 \times 10^{-39}$
微波	$3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{12}$	$10^3 \sim 10^{-1}$	$1.2 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-39} \sim 2.2 \times 10^{-35}$
红外光	$8.8 \times 10^{11} \sim 4.3 \times 10^{14}$	$3.4 \times 10^{-1} \sim 7 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-3} \sim 1.7$	$6.5 \times 10^{-36} \sim 3.2 \times 10^{-33}$
可见光	$4 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$7.6 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$	$1.6 \sim 3$	$2.9 \times 10^{-33} \sim 5.4 \times 10^{-33}$
紫外光	$7.5 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{16}$	$4 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$	$3 \sim 120$	$5.4 \times 10^{-33} \sim 2.2 \times 10^{-31}$
X 光	$3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{20}$	$10^{-5} \sim 10^{-9}$	$1.2 \times 10^2 \sim 1.2 \times 10^6$	$2.2 \times 10^{-31} \sim 2.2 \times 10^{-27}$
$\gamma$ 射线	$> 3 \times 10^{19}$	$< 10^{-8}$	$> 1.2 \times 10^5$	$> 2.2 \times 10^{-28}$

公式 (2a) 表示, 每个质量  $m$ 、速度  $V$  的物质粒子, 均可用波长为  $\lambda = h/mV$  的波来描述。由于 Planck 常数  $h$  非常小, 而所谓的物质粒子 (电子等) 相对而言  $m$  值是很大, 因而 de Broglie 波的波长与光 (或别的电磁波) 相比是非常小的。因而它们的相互干涉产生了基本上是直线的 (或说粒子状的) 传播, 亦即粒子概念和波动概念的表面矛盾消失。

基于以上讨论, 可以得出一个结论: 波粒二象性的成立需要有一定的条件, 这条件是波长足够小; 但迄今为止的物理学未能给出波长 (或频率) 的分界。也就是说, 理论上的完全自治并未做到。

## 5 关于光子的内部结构和体积

前面我们用图 1 展示了迄今已发现的 200 多种基本粒子的不同类型, 强子是参与强相互作用的, 轻子是不参与强相互作用的, 而光子是传递电磁作用的。强子当中, 质量最小的重子是质子, 30 年代时曾被当作是物质结构中最基本的粒子; 但在 60 年代初用高能 ( $10^9 \text{eV}$ ) 电子对质子作弹性散射研究, 发现质子的正电荷分布在半径约为  $8 \times 10^{-14} \text{cm}$  的球状区域内; 60 年代后期, 用更高能量 ( $2 \times 10^{10} \text{eV}$ ) 的电子轰击质子以进行非弹性碰撞实验, 了解到质子电荷的非均匀 (颗粒状) 分布, 故推测质子内有荷电粒子。70 年代对  $\pi$  介子的研究表明, 它的电荷分布在半径约  $5.6 \times 10^{-4} \text{cm}$  的球形区域里。…这些实验表明, 强子是有内部结构的, 并呈现一定的体积。

轻子的情况也差不多。在众多轻子中, 最早发现的是电子。电子静质量  $m_0 = 9.11 \times 10^{-28} \text{g} \cong 10^{-27} \text{g}$ , 携带电荷  $e$ ; 电子体积大小的确定, 最早是根据电荷运动产生磁场, 而磁场能量可表示为动能。那么, 在圆球状电荷的假定下, 就可求出圆球

半径为  $1.9 \times 10^{-13} \text{cm}$ 。考虑电子运动速度而作相对论修正后得到电子半径为  $10^{-13} \text{cm}$ 。现代的确定微观粒子体积的方法是使用高能粒子加速器, 用电子轰击被研究的粒子 (如质子、中子、电子), 通过相互作用的研究确定粒子的电荷区域<sup>[12]</sup>。由于用高能电子散射而研究粒子结构、原子核结构方面的出色工作, 美国物理学家 Robert Hofstadter 于 1961 年荣获 Nobel 物理奖。现代实验认为电子半径  $r < 10^{-16} \text{cm}$ 。至于最新的观点和数据, 可以引述 2000 年 10 月 11 日丁肇中教授在国际工程科技大会上所作报告中的话。他指出, 高能物理研究中, 关于 L3 组有如下实验结果: 只有 3 种不同的轻子 (电子、 $\mu$  子、 $\tau$  子), 轻子半径  $r < 10^{-17} \text{cm}$ , 几乎没有体积可言。类似地, quark 的半径  $r < 10^{-17} \text{cm}$ , 也几乎没有体积。

但微观粒子的结构和体积, 和人们习惯的宏观物体形象的观念很不相同。宏观物体 (例如一只金属球) 有明确的界面, 它的体积、半径均有确定的数值, 在材料已知的情况下也有确定的密度。但微观粒子的情况却非常不同, 例如电子, 尽管其存在确定无疑, 我们却很难用一两句话说清楚什么是电子。1897 年 4 月 30 日, J.J. Thomson 报告了关于“带负电的微粒” (即电子) 的发现, 并给出了最早的荷质比 ( $e/m$ ) 值, 从而获得 1906 年的 Nobel 物理奖; 但他并不能告诉我们电子到底是什么。1927 年 C.J. Davisson 的实验确定电子又是粒子又是波; 1978 年 W.M. Fairbank 测到了分数电荷; 这些工作亦不能使我们了解电子的本质。至于前面提到的高能加速器上的轰击实验, 所测出的只是电子电荷分布的半径; 这绝不是人们所习惯的宏观物体 (例如金属球) 的形象, 其数据亦缺乏确定性。

既然我们不能按宏观世界的习惯而说出电子是由什么材料构成的, 只能认为它是电荷凝聚而成的

粒子；它就与这里特别关注的光子有相似之处。光子是能量凝聚而成的粒子（能量子），它的体积（尺度）应通过能量分布的半径而体现。我们可以推论，光子的体积、内部结构和光子的物质性一样是无可怀疑的客观存在。由于光子不带电荷，呈电中性，无法用电子的办法求其大小。因而，可以参照同样是以光速运动的中微子的情况来考虑。美国《Science》周刊于2000年8月18日报道说，日本的大型中微子地下探测仪SK的实验数据表明，中微子也有体积！这就为研究光子的体积带来了新的启发和动力。笔者认为，应从能量密度出发来求光子的体积。

线性化的量子力学理论及各种诠释实际上均把量子视为数学点（无内部结构、无体积）。这无论如何不能令人满意。笔者猜测，量子场论所遇到的困难或许就是由点模型的假定而引起的？！

## 6 关于光的本性和虚光子

如所周知，光波与其他波动（例如水波）不同。水面波的传播需要介质（水）的支持。而光波可在真空中传播而无需依靠任何介质。1887年以前，人们认为光波的进行也要依靠一种无所不在的介质（Ether，以太）才能实现；但1887年A.A. Michelson和E.W. Morley进行的实验表明，即使考虑地球绕日的运动速度，不论光顺或逆行，光速都一样。这使“以太说”被否定。然而，与广泛流行的说法（“Michelson是为了否定以太存在而进行实验”）相反，他对以太似乎有某种偏爱；而对后来出现的狭义相对论却持保留态度。1926~1928年间，70多岁高龄的Michelson再次（一生中第3次）作出努力，以实验寻找以太漂移的征象，但仍以否定告终。但是，这位老人从未宣布过他完全放弃了以太。

著名物理学家J.S. Bell在20世纪80年代公布了以A. Aspect为代表的一系列实验结果之后，曾说过“量子力学极有成就，很难相信它是错的”；又说“我想回到以太概念”<sup>[13]</sup>；笔者曾批评Bell这样说是“思想混乱”<sup>[14]</sup>。但是，综合Michelson-Bell的态度，今天我們是否可以重新考虑以太概念有某些合理成份在内？！当然，必须在目前的科学水平的基础上考虑，例如结合暗物质和Higgs场。

电磁波是物质，还是物质的一种属性？如果我们仔细地考察光波和光子，显然，这两方面却是不

对等的——人们不会怀疑光子、光子群是物质，但却对光波（以及电磁波）是不是物质抱有疑问。A. Einstein称电磁波为“鬼波”绝非偶然。A.A. Michelson似乎一直到去世前仍在寻找某种未知的东西。

与上述情况可能有联系的是虚光子（Virtual photon）。英国剑桥大学S. Hawking教授把虚粒子定义为“在量子力学中，一种永远检测不到的粒子，但其存在确有可测效应”<sup>[15]</sup>。测不准原理意味着真空空间也充满了虚粒子和反粒子。Hawking进一步说，物质粒子间可以用交换虚粒子的方式而相互作用，这时虚粒子是携带力（force）的；例如，两个电子之间的斥力是由于交换虚光子所致，这些虚光子永远不能被检测出来。但如一个电子穿过另一个电子，则可放出实光子并以光波的形式被人们测出。又如，R. Feynman曾说：“虚光子是一种在实验中不出现的被交换的光子，是自旋为零的粒子。”……上述两位物理学家的说法均属于量子场论的观点（QED观点）。量子场论能解释用普通量子力学概念说明不了的一些物理问题，例如氢原子能级图中非常小的能级位移就是用虚粒子、虚过程来解释的。但这些虚粒子是观测不到的。…在高能物理学的研究中，则发现强子中的 $\pi$ 介子周围有虚光子云，造成其电磁质量<sup>[16]</sup>。

假定使高能电子（ $e_-$ ）与正电子（ $e_+$ ）碰撞，第一步它们湮没为一个虚光子：

$$e_- + e_+ \longrightarrow \gamma(\text{虚光子})$$

然后，这个虚光子转变为一对 $\mu$ 子：

$$\gamma(\text{虚光子}) \longrightarrow \mu_- + \mu_+$$

或者，转变为一对quark。虚光子的神秘性质令人迷惑不解。

## 7 电磁脉冲及其超光速实验现象

在光学实验以及超光速研究中，常用到微波脉冲列或激光脉冲列，这里统一称为电磁脉冲（EMP）。图2给出两个例子，（a）是用钟形脉冲（或称正态分布曲线的高斯型脉冲）调制到高频上，（b）是用阶跃式矩形波调制在高频上。所谓“高频”是指微波或激光CW信号。用作低频调制的电压，频率较低。一个实例是，低频电压重复频率147 kHz，脉冲宽度50 ns，上升时间20 ns；受调微波频率8.7 GHz。另一个实例是先进的飞秒发生

器，低频电压重复频率 90 MHz，脉冲宽度  $< 10$  fs。

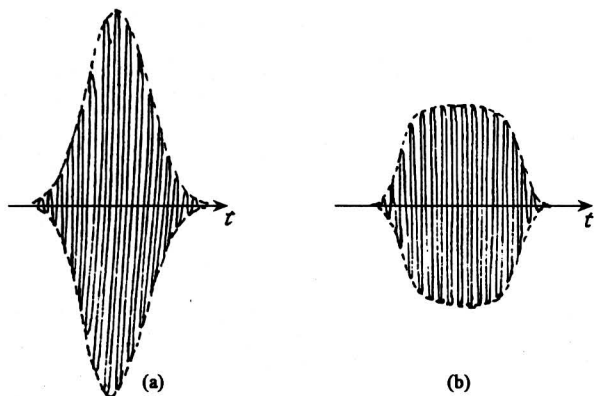


图 2 两种电磁脉冲的图形

Fig.2 Two examples of EM pulse

如何结合实验条件来检查物理理论，是极为重要的问题。在理论上常常谈论的光波、光子、波包、系综等等，一般较为抽象和理想化。实验家面临的问题却是，该如何看待 EMP？它究竟与哪一种理论概念相对应？

一般的理解是，波状脉冲将以速度  $V_g$  沿  $z$  向传播，波的能量只包含在脉冲范围以内。如  $V_g > 0$ ，波的能量向  $z$  的正向运动；如  $V_g < 0$ ，波的能量向  $z$  的负向运动。在目前情况下， $V_g$  是指波包（即低频包络）的速度， $V_p$  是指载波（即微波或激光）的速度。可能出现  $V_g > V_p$ ，也可能出现  $V_g < V_p$ 。

在历史上，E. Schrödinger 曾坚持认为波包与粒子是一回事。然而，由于群速与频率有关，波包在传播中会扩散，与粒子的稳定性形象相悖；故科学家们拒绝了他的概念。一个粒子不等同于一个波，故单粒子通过晶体到达底片时只出现一个衍射点，而非衍射图像。后者的出现只有在大量粒子通过时才有可能。与此类似，一个波状脉冲不等同于一个粒子，而是包含多个粒子。由于单个粒子出现在  $r$  处的几率正比于  $|\psi(r, t)|^2$ （ $\psi$  是波函数），故在体元  $(\Delta x \Delta y \Delta z)$  内的粒子数正比于  $|\psi(r, t)|^2 \Delta x \Delta y \Delta z$ 。然而，在一个实验中，若入射功率越大， $|\psi|^2$  值应该越大；故笔者认为，粒子数的多少取决于入射功率，或者说取决于相伴脉冲而行的能量。

王力军等人的超光速实验的报告明确讲<sup>[17]</sup>，在实验中使用脉宽  $3.7 \mu s$  而功率极弱（ $< 1 \mu W$ ）的激光束通过铯原子气室，并观察到该激光脉冲以

$310c$  的高速通过气室。实验是出色的，但他们的解释（“不是实物而是光波超光速，因而不违反相对论”）却难以令人信服。笔者曾指出王力军实验中所用激光脉冲不可能完全不携带能量，而按照狭义相对论的公式（ $E = mc^2$ ），能量等效为一定的质量；这样的光脉冲以  $310c$  运行，是相对论不能容许的。这个实验至今仍然难以理解，同时也关系到我们如何看待 EMP 的传播的问题。

这个问题其实早就出现了。我们曾经搜集整理了 90 年代时欧美科学家公布的 8 个在光频区或微波区完成的超光速实验，可以概括为下式

$$V = kc \quad (k > 1) \quad (11)$$

在实验中测得的  $k$  值有<sup>[18]</sup>：1.25, 1.7, 2, 4.34, 4.7。这些  $k$  值虽不像 310 那么大，但产生的问题在本质上并无不同。这个问题就是，在实验中发现的 EMP 在特定条件下可以超光速（ $k > 1$ ）传输，说明了什么？与狭义相对论究竟有没有矛盾？

根据 Lorentz - Einstein 关系式，粒子  $m_0$  以速度  $V$  运动时的运质量为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (V/c)^2}} \quad (12)$$

对于  $m_0 \neq 0$  的实物粒子（如电子、原子），以及宏观物体，如  $V > c$  则  $m$  为虚数，不合理，故不允许  $V > c$ 。对光子而言， $m_0 = 0$ ， $V = c$ ； $m = 0/0$ ，是不定式；动质量问题陷入困境。这时只能用式（9）计算光子的动质量，作为频率  $f$  的连续性光波等效为光子时计算光子动质量的办法。这是简谐波（单频）情况。至于 EMP，或者说波包，是由多个频率成分迭加的结果。它如何等效为一个或多个光子，是不清楚的。因而，对 EMP 而言没有现成公式以进行波粒二象性所要求的计算，因而没有清晰的光子形象。有关的设想倒是有，例如有人认为，如能合理地构建一个波包使之等同于粒子，波粒二象性的因果联系便可终极地解决，即以“不发散的波包”作为光子与实物粒子统一形式的物理实体<sup>[9]</sup>。J. Marangos 最近指出，有人认为携带信息的光脉冲的真实速度并非光滑脉冲的群速，而是位于波包传播中阶梯形状突然出现的位置的速度。另外，在只由少数几个光子组成的光脉冲中，有人认为群速与单个光子的速度相同。显然，光脉冲 FTL 实验存在理解上的困难。

## 8 关于消失波的粒子性

电磁波通过具有复数波阻抗的媒质的情况在电



磁理论上具有普遍意义,这种“媒质”可以是微波工程学中的截止波导,可以是半导体、等离子体<sup>[19]</sup>。换言之,当波在各向同性媒质中传播时,至少对三种物理机制其场(波)阻抗产生可观的电抗分量,即:导波模式、色散媒质、电离气体中的平面波。消失波(evanescent wave)也被译称为衰减波、凋落波、倏逝波,是电磁学家和光学家研究的对象,其特点是振幅沿某个空间方向迅速地按指数规律下降,而其相位无变化(相位常数 $\beta \cong 0$ )。消失波既是金属壁波导在截频以下( $f < f_c$ )的状态,也出现在介质波导和光纤的周围;而在研究光学中的Goos-Hänchen位移时也遇到消失波。更重要的是,对于量子力学中的位垒(barrier)问题,在矩形位垒内部会在粒子入射时其波函数模( $|\psi|^2$ )沿入射正向指数地减小,呈现出消失波特征。90年代时,曾有多项超光速实验是通过量子隧道经由消失波而表现出异常效应,因而对于量子隧道效应消失波的研究就极为重要。事实证明对于消失电磁波的传输过程的研究具有普遍的科学意义。

1992年,Th.Martin和R.Landauer<sup>[20]</sup>曾论述电磁脉冲在量子隧穿超光速实验方面的表现及有关理论问题,认为电磁波波包中充满了相同的光量子,只要捕捉到其中一些光量子,而让其他光量子不受干扰,就能进行有关的测量。与此相比,例如在电子的例子中(在由许多电子组成的波包中),测量波包的时延则不容易。其次,他们指出当电磁脉冲通过消失模区域时,由多种频率成分组成的EMP其不同成分会有不同的响应。例如,截止波导具有高通滤波器特性,脉冲通过时高频部分衰减减小、低频部分衰减大,在输出端脉冲的平均频率更高,故有较高群速。或者说,高频成分比低频成分更容易穿越位垒,导致对波包的有效加速。这种“在消失区可使脉冲高频部分加速”的观点有助于解释90年代的某些FTL实验,同时也说明调整脉冲频率以与波导适应在实验技术上的重要性。

## 9 de Broglie波的超光速相速意义

以上较多讨论电磁波方面的令人困惑的问题;现在来看看物质波。根据式(1)、式(2),并引用 $p = mc$ 和 $E = mc^2$ ,可以证明对电磁波(光波)而言有

$$\lambda = c/f \quad (13)$$

这个推导过程清楚地表明, $c$ 既是光子的运动速度,又是光波的传播速度。de Broglie波的情况,引用 $p = mV$ 和 $E = mc^2$ ,又据(3)式可证明:

$$\lambda = V_p/f \quad (14)$$

$V_p$ 是de Broglie波的传播速度,即相速;而粒子运动速度与波速不同,它是群速 $V_g$ ;可以证明 $V_g = 2V_p$ <sup>[21]</sup>。

前已述及,de Broglie波与光波有类似之处,即都有波粒二象性。但二者又有不同之处,例如光波波速与光子的速度一致,de Broglie波的波速与粒子速度却不一致。前面还提到,de Broglie波的相速是超光速的。为什么到物质波时相速就比 $c$ 大了呢?!相对论未能说明这种超光速相速的含义;de Broglie也未作解释。

既然de Broglie波的相速不是信息的速度,也不是粒子的运动速度,过去几乎无人重视de Broglie波的超光速,不认为是一个问题。但在这里我们却看到物质波与电磁波(光波)的重大区别,对后者而言在自由空间(真空)中传播的速度就是 $V_p = c$ ;如果 $V_p > c$ 便称为“异常传播”<sup>[22]</sup>,需要特殊的理解和解释。故电磁波与物质波之间存在奇怪的不对等。

## 10 结 语

A. Einstein在晚年时曾说:“经过了50年的思考,也没有使我更接近于解答‘光量子是什么’这个问题。”作为光子的提出者和波粒二象性的最早研究者,这位伟大科学家的话显示了惊人的坦率。本文的内容说明,尽管波粒二象性理论在20世纪取得了巨大成就,但仍存在一系列使人困惑的疑点,故在新世纪中仍需继续努力探索。研究的核心问题应放在光的本质、光子的结构上面。

但必须指出,文章所反映的成就和质疑,仍然完全以物理学、电子学的固有思维方式为基础。80年代初出现的超弦理论则抛弃了习惯的点粒子模型,把世界的基元当作具有超对称性的一维物质线(弦),其不同振动模式则与不同粒子概念相对应。1995年以后,超弦研究再次变热,并产生了M理论<sup>[23,24]</sup>。这个理论能实现空间、时间的量子化,并把4种基本作用相统一,非常值得注意。我们还不知道,这种独特的数学物理理论是否能对文章提出的8方面的问题一一作出回答。

## 参考文献

- [1] Einstein A. Elektrodynamik bewegter Körper[J]. Annalen der Physik, 1905, 17(7): 891~895
- [2] Einstein A. Physics and Reality[J]. Jour. Franklin Institute, 1936, 221(3): 1~17
- [3] 沈惠川. 德布罗意的非线性波动力学[J]. 自然杂志, 1992, 15(8): 620~626
- [4] 沈惠川. L. 德布罗意和 E. 薛定谔[J]. 自然辩证法研究, 1994, 10(3): 52~55
- [5] 沈惠川. 非线性波导理论的非局域性[J]. 自然杂志, 1995, 17(2): 119
- [6] 沈惠川. 量子力学系综诠释纵横谈[J]. 武钢大学学报, 2000, (2): 7~12
- [7] 戈 革. 玻尔和他的互补原理[J]. 自然辩证法通讯, 1987, 9(5): 1~8
- [8] 周国荣. 中微子的静止质量及其在物理学和宇宙学上的意义[J]. 物理, 1999, 28(5): 290~294
- [9] 王国文. 光和实物的统一性与物理学基础探讨(1)——相对论和量子论带来的困惑[J]. 物理, 1991, 20(7): 428~432
- [10] 张元仲. 狭义相对论实验基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982
- [11] Feinberg G. Possibility of faster than light particles[J]. Physical Review, 1967, 159(5): 1089~1105
- [12] 赵国求. 康普顿物质波与量子力学速率解释[J]. 武钢大学学报, 2000, (3): 6~11
- [13] 沈惠川. 贝尔定理和贝尔不等式[J]. 自然杂志, 1996, 18(4): 240~244
- [14] 黄志洵. 超光速研究——相对论、量子力学、电子学与信息理论的交汇点[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [15] Hawking S. A brief history of time[M]. London: Bantam Books, 1988
- [16] 阎沐霖, 高道能. 介子电磁质量研究新进展[J]. 物理, 1999, 28(7): 385~387
- [17] Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A. Gain-assisted superluminal Light propagation[J]. Nature, 2000, 406: 277~279
- [18] 黄志洵. 超光速问题与电磁波异常传播[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 80~92
- [19] 黄志洵. 截止波导理论导论(第二版)[M]. 北京: 中国计量出版社, 1991
- [20] Martin Th., Landauer R. Time delay of evanescent electromagnetic waves and the analogy to particle tunneling[J]. Physical Review A, 1992, 45(4): 2611~2617
- [21] 周公度, 段连运. 结构化学基础(第二版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 1997
- [22] Giakos G C, Iashii T K. Energy propagation with phase velocity in a waveguide[J]. Microwave and Opt. Tech. Lett., 1991, 4(3): 128~131
- [23] Kaku M. Introduction to superstring and M-theory[M]. New York: Springer, 1999
- [24] 薛晓舟. M 理论及其本体诠释[J]. 武钢大学学报, 2000, (3): 1~5

## The Achievements and Paradoxes of the Wave - particle Duality Theory

Huang Zhixun

(Beijing Broadcasting Institute, Beijing 100024, China)

**[Abstract]** This paper is devoted to a survey of wave - particle duality theory of the optical waves and matter waves. The historical notes and the exploration of some paradoxes of this subject are discussed. First, it must be mentioned that the rest mass and the inner construction of photon still be a key problem of science. The paper calls scientists' attention to that, the wave - particle duality theory established depend on the wavelength being small enough, but the demarcation line is not clear. And so, whether the optical waves and EM waves corresponds to matter, or the character of matter, is discussed. Then, a question for the FTL phase velocity of matter waves is proposed. The analysis shows that how to establish the EM - pulse's particle image is still to be solved in the future research. Moreover, We connect in the mind, when the EM pulse propagate with a speed higher than the speed of light, will the Special Relativity be disrupted? Finally, the paper presents a discussion on the particle-like of evanescent waves and the virtual photons.

**[Key words]** photon; optical waves; matter waves; wave - particle duality; soliton; EM pulse; faster than light; evanescent waves; virtual photon