

负一的平方根、复相位与薛定谔

杨振宁 (纽约州立大学石溪分校理论物理研究所)

一、引言

狄拉克在1970年4月的一次演讲中谈到早期的量子力学(Dirac, 1972), 在所涉及的几个论题中他讨论了不对易代数, 并对此补充道:

“问题在于, 不对易性是否真是量子力学新观念的主体? 我过去一直认为答案是肯定的, 但最近我开始怀疑这一点。我想, 从物理观点来说, 可能不对易性并非唯一重要的观念, 或许还有某些更深一层的观念。对于量子力学带给我们的那些通常的概念, 或许还需作某些更深入的改变。”

狄拉克进一步讨论了这个问题, 并得出结论:

“所以, 如果有人问, 量子力学的主要特征是什么? 现在我倾向于说, 量子力学的主要特征并不是不对易代数, 而是几率振幅的存在, 后者是全部原子过程的基础。几率振幅是和实验相联系的, 但这只是部分的联系。几率振幅的模的平方是我们能够观测的某种量, 即实验者所测量到的几率。但除此以外还有相位, 它是模为1的数, 它的变化不影响模的平方。这个相位是极其重要的, 因为它是所有干涉现象的根源, 而它的物理意义是隐含难解的。所以可以说, 海森堡和薛定谔的真正天才在于, 他们发现了包含相位这个物理量的几率振幅的存在。相位这个物理量巧妙地隐藏在大自然之中, 正由于它隐藏得如此巧妙, 人们才没能更早建立量子力学。”

人们可以同意也可以不同意狄拉克的见解。是引入包含相位的振幅更重要, 还是引入不对易代数更重要? 但毫无疑问, 在物理学家对大自然的描述中, 这两者都具有深远意义的革命性进展。

经典物理学, 即1925年以前的物理学, 仅仅用到实数, 在力学、热力学、电动力学等全部经典物理学中都是如此。在许多地方的确也用到复数。例如在求解线性交变电流问题时就用到复数。但是在求出解以

后, 总是取其实部或虚部, 以得到真实的物理答案。所以在这种情况下使用复数仅仅是作为一种辅助的计算工具, 也就是说, 物理学在概念上只使用实数。

但是, 随着矩阵力学和波动力学的发展, 情况有了引人注目的变化, 复数成了物理学非常基本的概念元素; 矩阵力学和波动力学的基本方程是

$$pq - qp = -i\hbar, \quad (1)$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi, \quad (2)$$

两者都明显含有虚单位 $i = \sqrt{-1}$ 。要强调指出的是, 如果试图去掉 i 而只用方程(1)和(2)的实部或虚部, 那末这些方程的真实意义也就完全丧失了。

二、矩阵力学和波动力学中的复数

下面简单谈谈在矩阵力学和波动力学中引入复数的历史过程。

首先谈谈矩阵力学。在海森堡所写的开创性论文(Heisenberg, 1925)中, 他把一个动力学量的傅立叶变换(它取决于一种态和一种傅立叶多重性)和它在“量子理论”中对应的量(它取决于两个态)进行了比较, 在这个过程中, 海森堡很自然地概念上讨论了复数傅立叶振幅。在紧接着发表的一篇两人合写的论文(Born and Jordon, 1925)中, 历史上第一次明显地出现了方程(1), 这也是虚数 i 第一次以基本的方式被引入物理学。稍后, 在狄拉克发表的第一篇关于量子力学的论文(Dirac, 1925)中, 也出现了方程(1), 同时还有

$$\dot{q} = [q, H] = (qH - Hq)/(i\hbar), \quad (3)$$

这个方程也显含 i 。这些进展表明, 复数在矩阵力学中起着基本的作用。尽管这是物理学中的一个重要新进展, 但当时却似乎没有得到应有的评价。这也许是由于矩阵力学是如此新颖, 而傅立叶分析又是如此合理, 以致引入复数的全部含义反而被当时发生的重大

变革掩盖了。

现在转而讨论波动力学。波动力学是由薛定谔的六篇有历史意义的系列论文(Schrödinger, 1926a~f)确立的^①, 这六篇论文都写于1926年的头六个月。在前五篇论文中, 薛定谔把他的波函数分解成位置坐标 x 的实稳态函数和时间的正弦函数的乘积(Schrödinger, 1926c)^②。

薛定谔当时这样做是不足为奇的, 因为他把电子的驻波描述想象成类似于电磁波或水波的驻波, 这些波确有相位, 但它们是由实的时空函数描述的, 例如, 在薛定谔的论文(1926c)中, 对波函数

$$\psi_n = e^{-x^2/2} H_n(x) e^{2\pi i v_n t} \quad (4)$$

有一个脚注, 他写道: “ i 是 $\sqrt{-1}$, 等式右端按惯例取实部”(着重点是我加的)。这表明了他对此事的一般态度, 即它们是和通常的线性电路理论一样的, ψ 可以是复数, 但最后总是取实部。

当然, 在薛定谔探寻矩阵力学和波动力学之间的关系时, 他不可避免要碰到 $i = \sqrt{-1}$, 例如他的论文(1926c)中的方程(20)就是如此。他是否为此曾受到困扰, 我们可能永远无法知道, 但是, 当他进而讨论二次项, 例如讨论 $\psi(\partial\psi/\partial t)$ [在其论文(1926c)中简短地讨论过] 或 $\psi\psi$ 时(他在1926年6月6日以前的某个时候作的, 参见下文), 他必定遇到了这些麻烦。

1926年5月27日, 73岁高龄的洛伦兹给薛定谔写了一封长信, 感谢薛定谔送给他三篇文章的清样。洛伦兹在信中还提出了许多有关波动力学的原则问题和具体问题。其中有两点与我们现在所讨论的问题有关: (a)如何说明两个粒子或更多粒子的 ψ 函数; (b)洛伦兹认为“真实的‘运动方程’……完全(不应该)含能量 E , 而应代之以含有时间的导数。”同年6月6日, 薛定谔回了一封同样长的信, 其中包括八条意见, 头两条就是回答洛伦兹提出的上述两个问题。

关于(a), 薛定谔说他已放弃了他先前手稿(Schrödinger, 1926f)中 $\psi(\partial\psi/\partial t)$ 的表示式, 现正专注于研究实空间中的电荷密度 $\psi\psi$ 。他接着写道: “令人不满意和的确很快遭到非议的事情是使用了复数。从根本上说, ψ 无疑是一个实函数。”随后他指出从 ψ 的实部 ψ_r 构成复函数 ψ 的方法。显然薛定谔本人对这个方法也不很满意。

关于(b), 薛定谔写了如下方程:

$$\hbar - \nabla^2 \psi = E^2 \psi, \quad (5)$$

然后利用 $H\psi = E\psi$ 消去 E , 得到

$$-\hbar^2 \psi = H^2 \psi. \quad (6)$$

他补充说: “这可能正是一个普遍的波动方程, 它不再包含积分常数 E , 而包含时间导数。”薛定谔继续思考

这个问题, 五天以后, 在6月11日写给普朗克的信中, 他说: “顺便说一句, 近几天, 另一件事使我如释重负, 它虽曾使我十分不安, ……但它终以其自身的从未有过的简单和完美而得到解答。”这个解答是什么呢? 它就是上述方程(6)。

为什么薛定谔不简单地写出正确的时间相关方程(2), 而宁可用较复杂的方程(6)呢? 他当然知道这个较简单的方程, 但却选择了较复杂的二阶方程^③, 这是为什么? 我认为答案如下:

薛定谔不想使他的波动方程包含 i , 就利用 $i^2 = -1$ 来消去它, 从而导出四阶方程(6)。他力图避免 i 是很自然的, 因为在他的论文(1926a)中, 他建立波动力学是借助于写出实的哈密顿-雅可比方程

$$H(q, \partial S/\partial q) = E$$

以及

$$S = K \log \psi.$$

他的符合这个要求的 ψ 是实的和与时间无关的。稍后, 在论文(1926a, §3)中, 他写道: “当然, 它有力地表明, 我们应该试图把函数 ψ 和原子中的某种振动过程联系起来……”, 但这可不是一个简单的过程, 因为薛定谔必须设法解决一个棘手的问题, 即这种振动的频率是什么。薛定谔后来对这个问题的想法的演变是一个饶有趣味的课题, 但不是我们在这里所要讨论的内容。我们现在关心的是这个事实, 薛定谔构思出用实的时空函数来描述振动, 从而建立了他的波动力学的概念。后来当他对 ψ 作叠加时, 仍然是指把实的 ψ 加起来, 其中每一个 ψ 都随时间作正弦变化。

现在回到薛定谔6月11日给普朗克的信, 他在信中进一步指出, 在方程(6)中, “可以令势能是时间的显函数”。这已被证明是错误的, 薛定谔在那以后的10天里, 领悟到了这一点。他当时就写了论文(1926f), 于6月23日寄到出版社。正是在这篇文章中, 他第一次提出这样的概念: ψ 是时空的复函数, 并满足复时变方程(2)。薛定谔把(2)式称为真正的^④波动方程, 以区别 $H\psi = E\psi$, 他把后者称为振动方程或振幅方程。

① 佩斯(1986)引用魏尔的话说: “薛定谔正当其迟来的爱情迸发时做了他的伟大的工作。”

② 见该文方程(35)后括号内的评注。

③ 在薛定谔于1926年6月11日以前所写的五篇论文(Schrödinger, 1926a~e)中, 方程(2)从未出现过, 但发现了诸如(4)式的方程, 这意味着薛定谔知道 $i\hbar\psi_a = H\psi_a$ 。在6月6日给洛伦兹的信中, 他对 ψ 的实部 ψ_r 作了混乱的讨论, 这清楚地表明, 薛定谔那时正在为消去(或定义)虚部而努力。

④ 薛定谔在德文稿中用的词是 *eigentlich*, 我把它译为 *true*, 也有人把它译为 *real*, 在这里的上下文中, *real* 很容易造成混乱。

我应该强调一下，上面追溯了薛定谔早期的一些论文，我并未由此推断说，薛定谔在其论文(1926f)中关于 ψ 应是复数的发现，是源于1926年5月27日洛伦兹给他的信。情况可能如此，但事情也可能是这样的。在薛定谔写了那篇与时间无关的微扰论的论文(1926d)后，他着手研究与时间有关的微扰论，于是，他必须研究波函数 ψ 随时间的变化。而可能是正在进行这项研究的时候，他收到了洛伦兹的信。可以断定的是，薛定谔是在6月11日到6月23日之间，最后确定 ψ 是复函数的。

薛定谔的论文(1926f)寄出几天以后，玻恩寄出了关于波函数统计诠释的两篇历史性文章(Born, 1926a, b)中的第一篇。值得注意的是，这两篇文章中的第一篇，玻恩对入射波用了实波函数

$$\sin \frac{2\pi}{\lambda} z$$

来表示，而对散射波用了另一个实波函数

$$\sin k_{\alpha m}(\alpha x + \beta y + \gamma z + \delta)$$

来表示。因为每一个波函数都是实函数，所以玻恩在其著名的脚注(加在第一篇论文的校样)中，不用“绝对值平方”，而仅用“平方”。佩斯对此曾说(Pais, 1986)，“跃迁几率的正确概念，这个重大的新事物，是以脚注的方式进入物理学的。”玻恩只是在第二篇论文中才对入射波和出射波使用了复数。

三、魏尔规范理论中的复数

上面我们考查了1925~1926年间，在基础物理学中引入复数的历史。事实上，在这以前几年，薛定谔(1922)已经发表了一篇很有意义的论文，题目是《关于单电子量子轨道的一个不寻常的性质》。在这篇文章中他已指出，在魏尔1918年的规范理论中可能已引入了一个虚因子

$$\gamma = -i\hbar. \quad (7)$$

他从魏尔的“世界几何”(即1918年魏尔的电磁规范理论)入手，把魏尔的思想概括到一个指数因子

$$\exp\left[-\frac{e}{\gamma} \int (V dt - \mathbf{A} \cdot d\mathbf{x})\right] \quad (8)$$

里，并且注意到，对于一个氢原子， $A=0$ ，指数中的表示式等于

$$-\gamma^{-1} e \bar{V} \tau,$$

其中 τ 是周期。对于一个量子数为 n 的玻尔轨道，它等于 $-\gamma^{-1} n \hbar$ ，即 $\gamma^{-1} \hbar$ 的整数倍。薛定谔把这个结果称为不寻常的，并且说他难以相信，这中间会不含有更深刻的物理意义。

在这篇论文的末尾，薛定谔指出了两种可能的 γ 取值：一种是实数， $\gamma = e^2/c$ ；另一种是 $\gamma = -i\hbar$ ，即上

面的(7)式。他指出，对于后一种取值，因子(8)成为1。

在薛定谔创立波动力学的几篇重要论文中，他没有引证1922年的这篇论文，但拉曼(Raman)和福尔曼(Forman, 1969)在研究这段历史时认为，关于“为什么是薛定谔发展了德布罗意的思想？”他这篇1922年的论文实际上是起了重要的作用的。他们的论点后来由汉尔(Hanle, 1977, 1979)和韦塞尔斯(Wessels, 1977)证实。他发现薛定谔1925年11月3日给爱因斯坦的信中有下面一段话：

“在我看来，德布罗意对量子规则的解释似乎和我在论文(Zs. f. Phys. 12, 13, 1922)中的想法有某种联系。我在那篇文章中已表明，在每一个准周期中，魏尔规范因子 $\exp\left[-\int \phi dx\right]$ 有奇异的性质。就我所见，在数学处理上两者是相同的，只不过(他的)比我的更正规，但却不够完美，实际上也没有作一般的证明。自然，德布罗意在他的普遍理论框架中所作的研究，比我对一个具体课题所作的阐述有意义得多，何况当初我对自己所做的工作的意义还是不太清楚的。”

13天以后，即1925年11月16日，薛定谔写信给兰德(Lande)说(Raman, Forman, 1969)：“近来我深深地被德布罗意的天才的论文所吸引，它格外令人振奋，然而某些部分却难以接受。我自己尝试画出电子在椭圆轨道上的相位波的图像，结果却是徒劳的。‘射线’几乎总是与等能量的开普勒椭圆相邻接，得到的并不是期望的‘散焦线’或类似于波前的线。同时，波长应该等于在一个塞曼(Zeeman)或斯塔克(Stark)周期中电子轨道对应的波长。”薛定谔显然在这以前已着

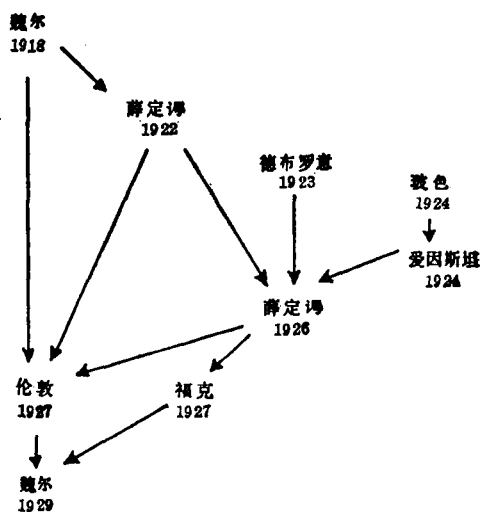


图1 与复相位和规范场有关的概念流程图
薛定谔1922年论文的重要性是由拉曼和福尔曼(1969)以及汉尔(1977, 1979)发现的。

手作关于波动力学的第一篇重要论文,并于1926年1月27日寄出(Schrödinger, 1926a).

薛定谔1922年的论文对于建立波动力学起了根本的作用,拉曼、福尔曼、汉尔的这个论点显然是正确的,我们用图1中的箭头来说明这一事实.

那末为什么薛定谔在1926年没有引证他自己1922年的论文呢?原因可能是这样的,1922年的论文讨论了前述因子(8),由(7)式可改写为

$$\exp\left[ei\int A_\mu dx^\mu/\hbar\right], \quad (9)$$

而1926年的几篇论文是和德布罗意的思想有关的,为了比较,可以把德布罗意的思想表示成一个因子

$$\exp\left[i\int p\cdot dx/\hbar\right] \quad (10)$$

的形式,两者相似而不相同.薛定谔认识到,适合于建立波动力学的因子是(10)式而不是(9)式.

当时薛定谔正忙于发展波动力学.他的1922年论文受到了伦敦(London)的重视,伦敦给薛定谔写了一封很有趣的信,此信已由拉曼和福尔曼翻印(1969),我们把该信的译文附录于后.据拉曼和福尔曼的意见,该信写于1926年10月10日左右.

伦敦在题为《魏尔理论的量子力学意义》的论文(London, 1927a; 参见London, 1927b)中,进一步发展了这种思想.在稍早些时候,福克发表了一篇讨论波动方程不变性的论文(Fock, 1927),这两人的文章多少都有些含混不清之处^⑤,这在波动力学发展的初期是很自然的,但两者又都包含有正确的思想.用现今的术语表示,就是用作用到波函数 ψ 上的算符

$$(\partial_\mu - ieA_\mu)$$

来把电磁理论引入波动力学.这是规范原理的核心(见图1).后来在一篇重要的论文中(Weyl, 1929; 也可参见Yang, 1986),才把电磁理论作为一种规范理论进行了完整的讨论.

四、现代的成果

物理学家把具有相位的复振幅引入到对大自然的表述中去,其重要性到本世纪70年代才充分显示出来.在70年代,在以下两方面有了进展:(1)发现所有的相互作用都是某种形式的规范场,(2)发现规范场与纤维丛的数学概念有关(Wu and Yang, 1975),每一根纤维是一个复相位或更广义的相位.这些发展,形成了当代物理学的一个基本原则:全部基本力都是相位场(Yang, 1983).所以,薛定谔在1922年几乎是偶然地把虚单位 i 引入到(7)式中去这件事,现在已经开出了深邃的观念之花,这些观念奠定了我们理解物理世界的基础.

在1975年吴大峻和我作了一个术语对照表(见表1),它把物理学家对规范场的术语和数学家对纤维丛的术语对应起来(Wu and Yang, 1975).

这个对照表中有一行带有问号的空位,这是因为当时数学家还没有研究与物理学家的“源”相对应的概念,所谓“源”,就是密度-电流四维矢量,在麦克斯韦电磁理论中,这是一个既自然又基本的概念.在数学家的语言中,这个概念现在已经被写为

$$*\partial * f = J, \quad (11)$$

无源情况将满足

$$*\partial * f = 0. \quad (12)$$

数学家现在已研究了(12)式,其结果已有助于求解拓扑学和微分几何学中的一些长期悬而未决的难题.这个当代的例子说明物理学对于数学的进展,提供了多么强大的动力(Freed and Uhlenbeck, 1984; Lawson, 1985),这种例子在前几个世纪很多,而现在则少了.

表1 规范场论和纤维丛理论中的术语的对比

规范场术语	丛的术语
规范(或球面规范)	主坐标丛
规范型	主纤维丛
规范势 bk_μ	一个主纤维丛上的联络
S_{ba}	转移函数
相因子 ϕ_{QP}	平移
场强 $f^k_{\mu\nu}$	曲率
源 ∂J^μ_K	?
电磁学	$U_1(1)$ 丛上的联络
同位旋规范场	SU_c 丛上的联络
狄拉克磁单极量子化	$U_1(1)$ 丛按第一陈类分类
无磁单极电磁学	平凡的 $U_1(1)$ 丛上的联络
带磁单极电磁学	非凡的 $U_1(1)$ 丛上的联络

五、附录: 伦敦给薛定谔的一封信^⑥

亲爱的教授:

今天我要和你认真谈一谈.有一位薛定谔先生你认识吗?他在1922年描述了“电子轨道的奇异性”(*Zeits. fur Phys.*, 12),你和此人熟悉吗?什么!你说你很了解他!而且当他进行该项研究时你甚至在场,

^⑤ 我曾说过[*Ann. N. Y. Sci.* 294, 86(1977)],伦敦的论文指出在福克的著作和魏尔的论文之间有相似性,这是错误的.我曾误解了脚注[on p. 111 of W. Pauli, *Handbuch der Physik* Vol. 24, Part I (1933)]的意思.

^⑥ 即电源,是广义化的电荷和电流概念.

^⑦ 拉曼和福尔曼在他们的文章中重印了这封信,这篇文章发表在《物理科学的历史研究》上(Vol. 1, pp.291~314).根据他们的意见,这封信写于1926年10月10日左右.

你还是他的合作者？这真是前所未闻的事。看来四年前你就已经知道，在连续的四维时空里，不能用量尺和时钟来定义爱因斯坦-黎曼度规关系，而原子过程又必须在连续四维时空中来研究，于是人们不得不搞清楚由魏尔的距离转移理论所阐明的普遍的度规原理是否可用。而四年来你清楚地知道这些原理是极为有用的，正当应用魏尔的距离转移理论而常常出现困难[爱因斯坦的异议(Yang, 1986)，魏尔的修正和他的很不高明的辩解(Weyl, 1968)]时，你却已经证明，就分立的物理轨道而言，标度单位(用 $\gamma=2\pi i/\hbar$)对于各具体的闭合路径是可以重复的，其实，你在那时就注意到，对于第 n 个轨道，标度单位精确地放大和缩小 n 倍，就象描述电荷所在处的驻波一样。于是你已经阐明，魏尔的理论是十分合理的。这就是说，当把它和量子理论结合起来时，将导致唯一的测定。实际上，如果整个原子世界是一种连续时空，找不出任何固定的点，人们还有什么事情可做呢。你知道这一点，但你却闭口不谈，只字未提。这种事情是前所未有的。你在论文(p. 14)中说得很谦恭，在讨论这个事实所可能具有的意义时，你未多加议论。(赶快忏悔吧！)在这篇论文中，你不仅已经消除了魏尔理论中绝望的混乱，而且远在德布罗意之前，你这篇论文就已具有类似于量子假设的特征。不仅如此，你甚至想到是否应该取 $\gamma=\hbar/2\pi i$ 或 e^2/c (p. 23)！现在你该立即象牧师那样忏悔了吧，你曾把你手中的真理秘而不宣。把你所知道的一切向同行们都讲出来吧！1922年你所作的探讨是旧量子力学的一个定理，最重要的事情尚有待完成，可以有把握地预期，一旦把你的理论和波动力学完美地结合起来(我还没有做到这一点)，就将显示出它的全部意义。我想你既已如此使学术界困惑，现在来彻底澄清一切，是你的责任。

该停笔了，非常感谢你为我那封无聊的信^⑧花费了那么多时间，我已暂时中断了对此事的研究，我认为由于有了完美的魏尔空间理论，从整体来看应该说卡鲁札-克莱因(Kaluza-Klein)空间理论将遇到挫折。我愿意密切注视这一点。我有一些不同的线索，它们表明，把魏尔和卡鲁札的空间理论统一起来是不困难的(把标度单位作为第五维对每一世界点作图，就立即可看到许多美妙的东西！)我急切地期待着阅读你的原稿^⑨(这里至今还没有)，特别是经菲斯(Fues)提示之后更是如此，即使只有一天的时间给我看，我也将非常非常高兴能够读到它。

顺便说一句，洛克菲勒基金会已经同意，电报昨天收到。我现在肯定可以同你合作，为此，我感到非常高兴。

祝你旅途愉快，我期待着你的回答。

衷心的致意

你忠实的
伦敦

- Born, M. (1926a) *Z. f. Phys.* 37, 863 (6月25日收到)
Born, M. (1926b) *Z. f. Phys.* 38, 803 (7月21日收到)
Born, M. and Jordan, P. (1925) *Z. f. Phys.* 34, 858 (9月27日收到)
Dirac, P. A. M. (1925) *Proc. Roy. Soc. A* 109, 642 (11月7日收到)
Dirac, P. A. M. (1972) *Fields & Quanta*, 3, 139
Freed, D. and Uhlenbeck, K. (1964) *Instantons and Four-manifolds*. Springer
Fock, V. (1927) *Z. f. Phys.* 39, 226
Hanle, P. (1977) *Isis* 68, 505
Hanle, P. (1979) *Am. J. Phys.* 47, 644
Heisenberg, W. (1925) *Z. f. Phys.* 33, 879 (7月29日收到)
Lawson, Jr, H. B. (1985) *The Theory of Gauge Fields in Four Dimensions*. American Mathematics Society 58, Providence, RI
London, F. (1927a) *Z. f. Phys.* 42, 375
London, F. (1927b) *Naturwiss.* 15, 187
Pais, A. (1986) *Inward Bound*, p. 257. Oxford University Press
Raman, V. V. and Forman, P. (1969) *Hist. Studies Phys. Sci.* 1, 291
Schrödinger, E. (1922) *Z. f. Phys.* 12, 13
Schrödinger, E. (1926a) *Ann. d. Phys.* 79, 361 (1月27日收到)
Schrödinger, E. (1926b) *Ann. d. Phys.* 79, 489 (2月23日收到)
Schrödinger, E. (1926c) *Ann. d. Phys.* 79, 734 (3月18日收到)
Schrödinger, E. (1926d) *Ann. d. Phys.* 80, 437 (5月10日收到)
Schrödinger, E. (1926e) *Die Naturw.* 28, 664
Schrödinger, E. (1926f) *Ann. d. Phys.* 81, 109 (6月23日收到)
Wessels, L. (1977) *Studies Hist. & Phil. Sci.* 10, 311
Weyl, H. (1929) *Z. f. Phys.* 56, 330
Weyl, H. (1968) in (Chandrasekharan, K. ed.) *Gesammelte Abhandlungen*, vol. 11, p. 261, Springer
Wu, T. T. and Yang, C. N. (1975) *Phys. Rev. D* 12, 3845
Yang, C. N. (1983) *Selected Papers 1945~1980 with Commentary*, p. 564, Freeman
Yang, C. N. (1987) (Chandrasekharan, K. ed.). Springer (印刷中)

(唐贤民译自 *Schrödinger Centenary Celebration of a Polymath*, C. W. Kilimister ed., Cambridge Univ Press (1987) 53~64 宁平治校)

⑧ 拉曼和福尔曼认为，这是指1926年12月1日的信，薛定谔于1926年12月7日作复。

⑨ 拉曼和福尔曼认为，这指的是有关相对论波动方程的手稿，在薛定谔1926年12月7日的信中曾提到它。

催化下发生振荡(催化振荡反应),也可在不加 $\text{Fe}(\text{ph})_3^{2+}$ 的情况下发生振荡(非催化振荡反应)^[1],图2a表示上述体系的非催化振荡反应,溶液颜色在棕红色和黄色之间作交替变化,非催化振荡结束后加入与图1所示体系中相同量的 $\text{Fe}(\text{ph})_3^{2+}$,这时可产生催化振荡反应,如图(2)b,溶液颜色在鲜红色和蓝色之间交替变化。

根据图1和图2振荡体系的颜色变化及振荡波形的比较,可以认为在 $\text{GA}-\text{BrO}_3^- - \text{Fe}(\text{ph})_3^{2+} - \text{H}_2\text{SO}_4$ 体系的连续振荡反应中,先产生非催化振荡反应(区域I),经过过渡态II后,产生催化振荡反应(区域III)。

(上接第8页)

$\times 10\mu\text{m}$,是由 $1.5\mu\text{m}$ 厚的 GaAs 层制成,前后各加介质镜。这样的开关阵列可以用作逻辑“与”门、“非”或“门”或存储器。

有一种全光数字计算机,利用前面说过的 QWEST 制成光逻辑门代替电子逻辑门,又利用集成光路工艺制成平面波导,代替电子集成片上的导线,这就使光子数字计算机与电子数字计算机具有相同结构。但是,集成片上电子导线可以直角转弯,而在波长 $0.8\mu\text{m}$ 的光波导必须圆滑转角,以免光泄漏损失。为了克服这一困难,有人设想激光器改用 CO_2 式,波长 $10\mu\text{m}$,再采用高折射率 Ge 的棱镜,就可能制成直角转弯。但在这样的 $10\mu\text{m}$ 波长, GaAs 中波长约为 $3\mu\text{m}$,光波导的宽度必须小于 $2\sim 2.5\mu\text{m}$ 。更进一步设想将是二维阵列开关,使光并行传送,更好地发挥光子比较电子所独具的优点。

五、结 语

人们正面临信息时代的到来,数字通信的信息容

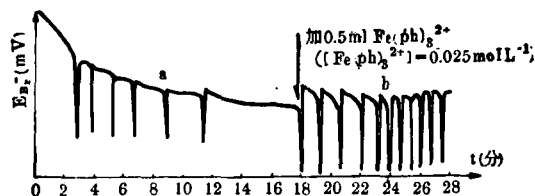


图2 $\text{GA}-\text{BrO}_3^- - \text{H}_2\text{SO}_4$ 体系振荡反应

a. 无 $\text{Fe}(\text{ph})_3^{2+}$ 存在的非催化振荡反应,

b. 在 $\text{Fe}(\text{ph})_3^{2+}$ 存在下的催化振荡反应,

其他反应条件同图1。

[1] Heilweil E. J., Henchman M. J. et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **101** (1979) 3698

[2] Körös E., Orban M., *J. Phys. Chem.*, **82** (1978) 1672

(1986年12月25日收到)

量急剧上升,数字计算机的运行速率不断加快。电子技术的超大规模集成电路(VLSI)确实发挥了巨大作用,但自从崭新的超纯玻璃和Ⅲ-V半导体两种光子材料脱颖而出和急剧进展,光纤通信成功地代替传统的电缆导线,打开了新兴光子技术的大门。人们不仅集中力量于光电子集成(OEIC)的研制,还致力于分子束外延(MBE)制造多量子井(MQW),以及非线性光子材料,期望光子晶体管、光计算机、光子交换机和光信号处理的研究工作取得突破性进展,直至成为现实。

在目前看来,科学技术的进程是电子学进化至微电子学,又进化至光电子学和光子学。虽迄今尚无把握说何日才能实现光子的C-C(通信和计算机),然而这是当代科学工作者关注的研究方向,是不容置疑的。可以乐观地相信,在未来的年代里,光电子学和光子学(或数字光学)一定有辉煌的成果不断涌现,为信息时代的来临增添光彩。

本文承中国科学院技术科学部孟昭英教授和王大珩主任审阅和指教,谨志谢忱。

编 后

光纤通信的研究成功,是光子技术发展的一个开端,同时也标志着电子技术向光子技术的进化。我国著名学者、学部委员、上海交通大学教授张煦的《电子技术向光子技术的进化》一文,详尽地阐述了当今科技发展的一个新动向,具有重要的指导意义。

人体的经络、穴位、气功师发放的外气等究竟是什么物质?人类还有哪些潜在的能力未被发掘?这些问题正困惑着人体科学研究工作者。《人体电磁场

测试》一文向读者介绍了对人体电磁场所进行的各种测试以及研究的初步结果。

《负一的平方根、复相位与薛定谔》是杨振宁教授于1987年在英国帝国大学召开的薛定谔诞生100周年纪念会上所作的讲演,文章叙述了薛定谔把复数引入波动力学的历史,特别是他的1922年论文的重要性,并讨论了魏尔规范理论中的复数以及物理学家利用具有相位的复振幅去表述自然所取得的新成果。值得有兴趣的读者研读。