

21世纪电子学的若干前沿课题

黄志洵

(北京广播学院, 北京 100024)

[摘要] 文章讨论了进入21世纪时物理学和电子学的现状和若干前沿课题, 涉及真空能、电子负质量、量子势、虚粒子、超弦理论、快子, 以及EPR思维实验、量子纠缠与量子远距传物、量子信息学、量子计算机等方面的最新研究进展与成果。

[关键词] 真空能; 负质量; 量子势; 虚粒子; 快子; 量子纠缠; 量子信息学; 量子计算

1 引言

1897年, 英国物理学家 J. J. Thomson 报告了“关于带阴电的微粒”的实验发现及荷质比 (e/m) 的测量结果, 他因为发现电子而获得了1906年 Nobel 物理奖。同年, M. G. Marconi 在伦敦开设了第一家无线电报公司, 并于1901年实现了越过大西洋的无线电通信。1940年, J. T. Randall 和 A. H. Boot 发明了多腔磁控管, 从而使微波雷达成为可能。1946年, 第一台电子计算机 ENIAC 问世。1960年, T. H. Maiman 报告了他研制的第一台光量子振荡器 (即激光器) …… 20世纪, 在无线电电子学领域极其迅速地发展且越来越贴近基础科学的形势下, 美国著名电子学家、教育家 F. E. Terman 曾说过一句后来传诵很广的话: “Wireless Engineers are go back to Science”! 笔者认为, 这话用在处于新世纪开始时的电子学发展预测上面也是很贴切的, 即回到基础科学之一的物理学上来思考。本文是以上述思想作为出发点, 讨论21世纪电子学的若干前沿课题。

2 负能量、负质量及虚粒子

1928年, P. Dirac 针对自由电子的运动提出

一个方程, 其意义不亚于 I. Newton 针对宏观物体而提出的力学 (运动) 方程。设单个电子静质量 m_0 。带电荷 ($-e$), Dirac 方程^[1]为:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \Psi}{\partial t} (\alpha \cdot \nabla) \Psi + j \frac{m_0 c}{\hbar} \beta \Psi = 0 \quad (1)$$

Ψ 为竖行矢量矩阵 (α, β 为算符), $\hbar = h/2\pi$ (h 是 Planck 常数); 上式为矩阵形式的偏微分方程, 令

$$H = c(\alpha \cdot p) + \beta m_0 c^2 \quad (2)$$

则式 (1) 简写为

$$\frac{\hbar}{j} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H \Psi \quad (3)$$

波函数即 $\Psi(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{r}(x, y, z)$ 是位置矢量; 故 (3) 式可分写为4个分量方程。如设 Ψ_μ 为平面波 ($\mu=1, 2, 3, 4$);

$$\Psi_\mu = A_\mu \exp[j(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)/\hbar] \quad (4)$$

则可得由4个方程组成的联立代数方程组; 由此寻找 A_μ 非零解的条件, 得到:

$$E = \pm c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2} = \begin{cases} E_+ \\ E_- \end{cases} \quad (5)$$

式中 E 为能量, p 为动量; 上式看来并非新结果, 相对论也给出这样的动量—能量关系。在经典物理

中,认为负能量(E_-)无意义,舍去即可。但在 Dirac 理论中,在有电磁场时, E_+ 和 E_- 的态无法分开;因为在 E_+ 的态有可能跃进到 E_- 的态,故不能简单地舍去 E_- 。由于负能态存在,Dirac 的理论产生了奇特而惊人的结果。根据 Dirac 方程,带负能量的电子存在并充满宇宙中;故真空可看作负能级被一切电子占据的态。亦即带负能量的电子海洋构成了真空,而其中的“空穴”是具有正能量的正电子。1932年,C. D. Anderson 用云室发现了正电子。后来,正电子应用到各方面,例如医学上的正电子断层扫描技术(PET)目前正在发展。

根据 1928 年 G. Breit 对 Dirac 理论的阐述,负能态的平均速度与动量的方向相反,即速度与动量分离(对粒子施力于某向,加速度在反方向)。按照经典物理观,可认为处在负能态的电子具有负质量。

关于 Casimir 效应。1948 年,H. Casimir 提出探测“真空的能量”的方法。假定有两块金属板靠得很近,通道内外的光子数将不同(因通道内某些波长的光无法通过),从而产生微小的作用力,趋势是使平板更靠近。如平板是在真空中,则该微弱的力是真空能量的体现或证明……,对这位学者的意见,很长时间内无人重视;直到 1998 年,美国 Los Alamos 实验室完成了一项实验,才造成轰动性效应。实验的方法是,把两根包金的石英棒用细金属丝悬吊起来进行测试。实验证明 Casimir 力存在,与理论误差 $<5\%$,并测出真空能量为 $10\sim 15$ J。这能量虽小,却意义重大;“真空中充满忽隐忽现的粒子,并散发能量”——这是量子物理学家才有的论点。

认为“真空”不是真空,而是“基态”的观点,是典型的量子场论观点,明显与 A. Einstein 的狭义相对论不同。后者认为“真空”就是真空,而不是别的什么。对广义相对论,量子场论也不适用。Einstein 场方程至今无法“量子化”,连“重整化”都不行。

负质量与负能量的概念,在新世纪显示出重要性。这里先要谈谈虚粒子,例如虚光子、虚电子均为虚粒子(virtual particles),物理概念是什么呢?虚粒子是携带能量为零、自旋为零的粒子,可以认为它具有正、负能量,二者之和为零。在真空中包含有虚粒子。因此,如果让两块金属板相互靠近,就会从空间排除掉一些正质量的虚粒子,从而有了

多余的负能量(使两块板靠得更近)——此即前述 Casimir 效应,表示负能量和负质量是可以在实验中产生的。美国 Los Alamos 实验室已制成过负质量(negative mass),但极其微少,只有最精密灵敏的仪器才能检测到。

“寻找真空中的物质”,这话乍听起来很荒唐。但这却是 21 世纪科学界的前沿课题,并且只有建成了新的大型质子对撞机之后,才可能进行实验研究。早在 1967 年,S. Weinberg 等三人提出电磁作用和弱力作用的统一理论,即已假定真空中有一种称为 Higgs 场的特殊特质。该理论认为粒子原来都没有质量,只是由于 Higgs 场与各种粒子相互作用才形成它们的质量。可见,这个理论不仅涉及真空的本质,而且涉及一切物质的质量起源。虽然 Weinberg 等人于 1979 年获诺贝尔物理奖,迄今仍未通过实验找到 Higgs 场——这就是留给 21 世纪的任务之一。

3 超弦理论^[2]

1982 年,美国 Physics Letters 公布电子电荷值 $e=1.602\ 189\ 2C$ (C 是库仑),电子静质量 $m_e=9.109\ 534\times 10^{-28}$ g(g 是克)。在圆球状电荷的假定下,根据电荷运动产生的磁场(磁场能量可表为动能)就可求出圆球半径为 1.9×10^{-13} cm,作相对论修正后认为电子半径为 10^{-13} cm。但这种处理有明显的不合理之处,例如人们会问把电子当作球体有什么根据?!……在超弦理论中,与电子相应的弦只有 10^{-23} cm 大小。在弦理论中,电子不再是点粒子而是振动着的微小的弦。作为一种较新的物质结构原理,弦理论不再取点状粒子作为认识世界的基础,而是用一根小弦,它有确定的尺寸。过去把电子当作点状物时,对其电场、引力场的计算都出现无限大能量,这是令科学家不能满意的事。实际上所有基本粒子都存在这种现象,而弦理论使这个问题得到了解决。

用弦理论计算引力的量子修正时能得到有意义的结果。这是令人激动的发展,发现时间约在 1982 年;它随即被认为是一种揭示,即引力理论与量子力学可能协调起来。我们知道,自从 Newton 时代以来人们关注引力很久了,但 20 世纪的重要理论——量子场论并不把引力包括在内。这不仅仅是遗憾,更多地表现为物理学家的焦虑。我们把历史上的最重要物理理论的发展绘如图 1。

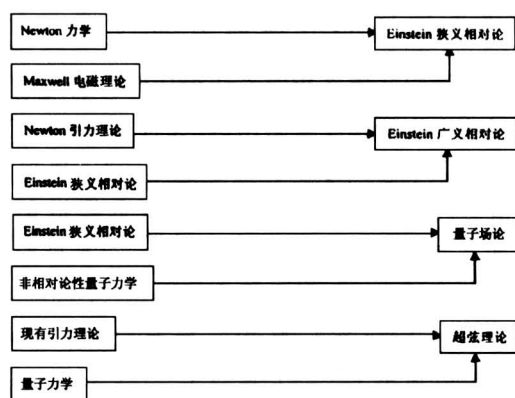


图 1 基础物理原理的发展

Fig.1 Developments of the basic physical principles

实际上，在 20 世纪的大部分时间里，人们认为粒子是物质结构的基础。诸如电子 (electron)、引力子 (gravitons)、夸克 (quark) 等等，它们都是点状物，没有内部结构。然而，根据量子力学中的测不准原理，尺度越小能量不确定性越大；对旧有引力理论而言，根本无法考虑 Planck 尺度 (10^{-33}cm) 上的事，因能量起伏大到不可思议的地步。可见，点状粒子概念的问题一直是深藏着的。

简言之，迄今已观测到的粒子对应弦振动的最低频率模式，只有在最低能量的近似下，弦被看作是点粒子。粒子概念与弦概念的关系，有点象 Newton 力学与相对论力学之间的关系。现时，人们在设计一座桥时仍然用 Newton 力学；同样道理，如果我们不需要作精确、深刻的描述时，粒子概念仍可应用——现有教科书并非均需立即修改。

任何新理论、新概念都会有难以理解的地方，超弦理论也是如此。我们习惯了 4 维时空；超出于此即为额外维数。最早的超弦理论有 26 维 (25 维空间、1 维时间)，改进后的理论有 10 维 (9 维空间、1 维时间)。超弦理论把额外维数当作或许是卷缩的在一般状况下表现不出来的东西。从数学上看，额外维数是奇怪的拓扑性质。从物理上看，这可追溯到过去的“多维空间”的想法。

总之，超弦理论认为物质结构基础是一些非常小的线或环 (开弦与闭弦)，其运动方式是自身作振动并在空中移动。这一理论的数学基础是 Riemann 面和 Le 代数。对于电子学家关心的电磁场，

过去的观点是场与光子相关联；这观点仍对，但现在认为光子也是超弦的某种振动的结果……，虽然并非所有科学家都支持超弦理论，但它获得大部分物理学家的支持；他们之中甚至有人认为，这是迄今唯一的一种能把引力、电磁力、核强力、弱力统一在一起的理论，即实现了 Einstein 生前搞“统一场论”的愿望。

4 关于 EPR 思维和量子纠缠

EPR 思维实验是 A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen 在一篇论文中提出的，该文题为“量子力学对物理实在的描述完备吗？”，发表在 Physical Review 上 (1935 年 5 月 15 日)。对该文的了解关系到对当今一系列前沿科学问题的理解。EPR 论文说的是，假定粒子分裂为两个等质量的部分 (①和②) 并向反向飞开，二者具有等值反向的动量且离原位的距离时刻相等，显然，对其中之一的动量和位置作测量，将“立即”知道另一处的动量和位置；如二者相距非常远 (例如即使以光速 c 行进的光也要走数年)，上述结果也对。但这是不合理的，因为光到达前这一半不可能知道对另一半进行了测量，而相对论规定光速 c 不可超越……，因而，EPR 论文认为量子力学 (测不准原理是它的一部分) 不完备，即认为量子力学体系有问题，除非人们竟会认定所谓“超距作用”也可接受……。

但是，对 EPR 思维应当表述得更严格些。设有一个自旋为零的微观粒子处在某个适当位置 M ，由于衰变分开为两个自旋 $1/2$ 的粒子，即①和②；假定它们立即向反方向飞开，并在距离相同而方向相反的位置 (A 和 B) 被检测。根据量子力学，在 A (或 B) 测量① (或②) 的自旋，测值为 $\pm 1/2$ 的几率各为 0.5 ；但如①的自旋测得为 $1/2$ ，则②必处于自旋 $-1/2$ 的本征态上。尽管①与②相距可以非常远，对①的测量却能确定②的状态，或者说①、②互相关联。这就是量子力学的非局域性。

不过，后者的描绘并非 EPR 实验本身，而是 1951 年由 D. Bohm 提出的，故“自旋 $1/2$ 粒子之间的相关”并不等于 EPR 实验，亦不见得是 Einstein 的本意。其次，de Broglie 在 1964 年文章里谈及上述情况时指出了“自旋 $1/2$ 粒子的特殊性”，这也值得注意。最后，国内外某些物理学家认为，量子力学的非局域性来自 Newton 力学和线性概念，毛病很多。故目前仍遵循 Einstein 实在论局域

性思想的学者亦不乏其人。

EPR论文中有两个判据(实在性判据、完备性判据)和一个假设(局域性假设),构成了严密的逻辑体系,对哥本哈根学派是沉重的打击,N. Bohr一直在考虑如何反驳。物理学家J. S. Bell于1964年、1966年各发表了一篇文章,把D. Bohm的双粒子自旋相关方案具体化,导出了Bell不等式,从而使用实验检验EPR佯谬成为可能^[3]。1986年以前,公布了15例这类实验,只有2例与量子力学不符。科学界认为量子力学经受了一次重大考验,Einstein的不可分性在量子力学领域不成立。到1987年左右,Bell明确表态说:“量子力学即使在一些苛刻条件下也不会错……,Aspect等人的实验表明Einstein的世界观站不住脚。”又说:“我想回到以太概念,因为在这些EPR实验中有一种启示,即背景中有某些东西比光跑得更快。”可见,Bell晚年似乎站到了正统量子力学派的一边,但“回到以太”却表示他的思想混乱。

EPR思维揭示了一种奇怪的量子相关。简单说,当两个旋转粒子相互作用后分开很远,其自旋相等而相反,故可从一个推断另一个。根据量子力学,两者的自旋都不确定,直到测出为止。测量确定了一个粒子的自旋方向,量子相关使另一粒子立即接受确定的自旋。这一结果即使二者相距若干光年也对。这种远距离作用暗示,粒子间有一种超光速作用存在。这是Einstein所不能接受的——正是这类事使他苦恼并与量子力学保持距离……。当然,也有兴高采烈的人,例如,在A. Aspect等人的实验(它们是对Bell理论的检验)公布后,诺贝尔物理奖得主B. Josephson说,也许宇宙的某一部分“知道”另一部分,即一种有条件的远距接触。1997年瑞士日内瓦大学的科学家发现,在两条分开的光纤上,成对产生的光子即使相距10 km(Aspect实验距离仅15 m),测量一个也会影响另一个。但在这样的距离上它们绝不可能联系,故它们一定是交缠的。Einstein早就预言会发生这种情况,并称之为远距离上的怪异行为。这是令人惊异的量子关系。关于“量子交缠”(quantum entangled)和“量子远距传物”(quantum teleportation),后面讨论“量子信息学”时还要提到它们。1998年美国加州理工学院(CIT)完成的实验,也是两个相距甚远的微观粒子竟如孪生,其特性相互影响(“如果你胳肢其中一个,另一个就笑”)。

5 超光速问题和微波异常传播

如所周知,狭义相对论认为任何物质均不可能以比光速更快的速度运动,这里的“物质”一词既包括微观粒子(如原子、电子、光子),也包括能量和信息。在物理世界中不可能有本体超光速现象,这一点,在新世纪开始的今天亦未被推翻。既然如此,为什么还要研究这个超光速(Faster Than Light, FTL)问题?首先,自从1904年,A. Sommerfeld讨论了“超光速粒子”(快子, tachyon)的性质以来,这个问题已研究了几乎一个世纪;到20世纪90年代,讨论FTL的国际会议已开过2次(1995年在美国犹他州Snowbird市;1998年在德国Köln市),我们不能视而不见。其次,超光速研究不仅与相对论、量子力学、电子学和信息理论密切相关,而且还将促进半导体科学、量子光学、微波工程技术、量子信息学等学科的进步和发展。最后,早在1991年Giakos和Ishii就提出了利用微波异常传播进行高速通信(rapid communication)的建议^[4],至少可以促进科学界的思考。

表1是1991~1997年间欧美科学家声称“发现了超光速”的实验情况。归纳起来,主要实验方法有两类:一种是双光子(或双微波速)“赛跑”,测量两路的到达的时间差,或用高分辨率示波器对抵达时间作比较;另一种是在开放空间(自由空间)发射与接收微波脉冲,接收端用高分辨率示波器测量时延。两类方法所依据的原理并无根本性差异,截止波导内是消失波,开放空间的天线之间在一定条件下也是特殊的衰减波。

由表1可见,鉴于一般认为相速不具有实质上的意义,20世纪90年代最早的超光速实验是由德国科隆大学的A. Enders和G. Nimtz进行的。文献[5]说,在微波进行了电磁波通过10 cm长截止波导的穿越时间测量,该时间约130 ps,小于 l/c 之值(l 是位垒厚度,10 cm)333 ps,故通过波导的速度是超光速的。后来G. Nimtz和W. Heitmann[9]指出,由于上述实验是使用低频脉冲调幅的微波脉冲,测出的是群速超光速, $v_g = 4.7c$ 。

然而,早在1985年笔者即曾发表论文“波导截止现象的量子类比”^[11],提出用量子隧道效应描

表 1 超光速实验的若干实例

Table 1 Examples of FTL experiments

发表时间	论文作者	频段	实验方法	测量结果
1991	Giakos 和 Ishii ^[4]	微波	角锥喇叭与开放空间; 波导系统	均为相速超光速 ($v_p > c$)
1992	Enders 和 Nimtz ^[5]	微波	截止波导作位垒的隧穿实验	群速超光速, $v_g = 4.7 c$
1993	Ranfagni 等 ^[6]	微波	角锥喇叭与开放空间	接收天线相对于发送天线平移或倾斜, 且天线间距不过大时, 发现超光速
1993	Steinberg, Kwait, Chiao ^[7]	光频	双光子赛跑, 其中一个穿过位垒	通过位垒的隧穿速度 $v = (1.7 \pm 0.2) c$
1996	Ranfagni 和 Mugnai ^[8]	微波	角锥喇叭与开放空间	接收天线相对于发送天线平移 16 cm, 波传播速度 $v = 1.25 c$, 修正到空气中为 $2 c$
1997	Aichmann 和 Nimtz ^[9]	微波	双束微波赛跑, 其中一束穿过位垒 (截止波导)	通过位垒的隧穿速度 $v = 4.34 c$
1997	Mugnai 等 ^[10]	微波	光栅绕射波实验	发现绕射波超光速现象

写波导的观点和理论, 指出一维量子隧道效应等效于截止波导中的消失波传播, 比 1992 年的实验报告和理论分析早 7 年^[5,12]。1991 年笔者指出, 群速定义只适用于波导中的非衰减波或无色散波, 截止波导是否适合采用群速概念尚成问题^[13]; 对于有吸收情况及色散情况似可用“平均能速”概念以代替群速。1998 年笔者对量子隧道效应和几率消失波作了数学分析, 给出了较完整的波导的量子隧道理论^[14]。1999 年笔者较全面地总结和论述了超光速研究的意义、现状和相关的量子学科, 讨论了电磁理论研究的新方向及电磁场的量子化及有关科学问题^[15]。

对于在一定条件下即会出现的超光速行为, 国内外科学家纷纷发表看法。1993 年 A. Ranfagni 等回顾了经典电报员方程, 又使用虚时间概念解释对光速 c 的超越^[6]; 1998 年吴忠超也用虚时间解释 90 年代众多的 FTL 实验^[16]。1998 年 G. Nimtz 指出, 由于位垒能量比入射粒子总能量大 ($U > E$), 描写粒子隧穿的一维 Schrödinger 方程表现出一项负能量^[17]; 而在数学等效下, 波导中的消失波亦呈现出负能量本征值。2000 年 1 月 4 日, Nimtz 博士在致笔者的信上说, 他认为消失模是由虚光子 (virtual photons) 而表现的, 对它们并不能作直接测量……。此外, 对微波反常传播 (偏离自由空间正常传播规律的现象) 也使电子学家们深为关注。

6 量子势与量子场

为了不使量子势 (quantum potential) 与量子位或量子比特 (quantum bit) 混淆, 我们把前者译

作量子势, 简写为 qupot, 将量子位或量子比特简写为 qubit。

量子势的主要提出者是 de Broglie (1927 年)。1952 年 Bohm 提出量子理论的隐变量诠释, 亦即量子势理论; 当他把打印稿分送一些著名物理学家时, 才知道 de Broglie 很早就提出了这一思想。导出的量子势表达式为

$$Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} \quad (6)$$

R 是量子波函数的幅, 而量子几率 R 与波函数的相位无关。对于 Q 的物理意义, Bohm 说不太清楚, “为了理解什么是量子势, 必须了解所有的势能究竟是什么?!” 1995 年起, 沈惠川对量子势作了研究并指出^[18], 量子势可以把理论区分为两大领域: 非局域量子理论必有量子势, 局域性量子理论必无量子势。实际上, 所有线性的量子力学基本方程, 所有非相对论的量子力学基本方程都是局域的; 所有非线性 de Broglie 导向波理论的基本方程都是非局域的 (包括非线性 Schrodinger 方程, 非线性 Klein-Gordon 方程, 非线性 Dirac 方程)。重要之点在于, 当把波解代入非线性方程时一般都出现量子势项, 由于该项存在才得到形状、参数确定的单孤子解; 但是, 所有导向波理论中的量子力学方程都不能描述单个粒子 (所谓孤子解实际包含大量粒子), 这是由于单个粒子的 Hamilton-Jacobi 方程的存在使 $\epsilon = 0$ 。

迄今已知的自然力为核强力、电磁力、核弱力、引力, 根本没有“量子力” (quantum force) 的说法。既如此, 量子场 (quantum field) 又是什么? 通常的理解是, 经典场论经改造后形成了量子场论, 用来描写微观粒子的电磁现象, 而量子场即

由一个个基本粒子组成。另一种观点是把量子势看成引力势，相应的量子场即引力场。最后一种看法把量子场当作还待研究的未知领域，或许正是它造成相隔非常远的粒子之间有奇怪的联系。

7 量子信息学

广义的量子信息学包含几个不相同但互有联系的领域。首先是建立在量子点和量子线基础上的量子芯片技术。量子点 (quantum dot) 是由直径小于 20 nm 的一堆物质组成的，尺寸相当于几十个硅原子排成串的长度。量子点的行为特征象分子，相互间用量子导线 (直径几纳米) 连接。1994 年，日本东京大学即已制成直径约 7 nm 的量子点。制作量子芯片和量子计算机时，至少要有 10 个量子点。与此相联系的，是神奇的利用量子效应工作的单电子器件，日本电信电话公司 (NTT) 1994 年即宣布已制成这种器件。它是由一个量子点和两个隧穿结构成的，意义是可以超越芯片技术达到 0.1 μm 级时大规模集成的极限，使器件仅受制于 Heisenberg 测不准关系式。在这方面，我国科学家也已取得进展^[19]。

1970 年，Wiesner 提出了“量子密码通信原理”；1996 年，P. Townsend 指出，量子密码系统的工作原理是利用光子作编码处理，关键处是极化光子的随机分类，即使信息在公用光纤网上传输也无法破译和窃听。假如窃听者试图通过测量光子的极化方向以破译密码，但根据量子物理学原理，这种测量会使光子改变极向，使信息错乱，从而使窃听者的企图暴露。只是由于噪声的限制，传输距离限制在 100 km。

所谓“量子远距离传物” (quantum teleportation) 是指量子态的远距传送，理论预言是 1993 年由 C. H. Bennett 等人提出的。随后出现了各种理论方案，但重要的是实验证明。最早的实验是由 D. Bouwmeester 和 Pan J W (潘建伟) 等做成功的^[20]；一个人射到 BBO 晶体的 pump 光子以一定几率衰变为两个次级光子，形成相关的光子对；pump 脉冲经反射后产生另一光子对；实验即观察两个光子对之间的关系，即初始光子 (携带极化信息) 是否能使另一光子获得自己的信息，而这两个光子可相距很远。实验获得了国际科学界的高度评价。

从发展趋势看，量子纠缠、量子远距离传物的研究已导致全新的量子通信技术浮出水面，例如，

1998 年秋季公布的美国 CIT 科学家的量子通信新方法实验成果如图 2 所示，利用激光发出一种特殊的成对光束，并分给发送方和接收方。发送方在已搭载有信息的输入光上迭加成对光束中的一束，再设法消掉其中搭载的信息，发出不含信息的光。用魔方作比喻，输入光的信息散布在各面，发送方消去信息相当于转动魔方打乱次序。接收方收到后，转动魔方即可复原信息。因此，传输时没有信息内容，即使被人截走也无意义。这一工作被权威刊物 Science 评为 1998 年 10 大科学成果之一。

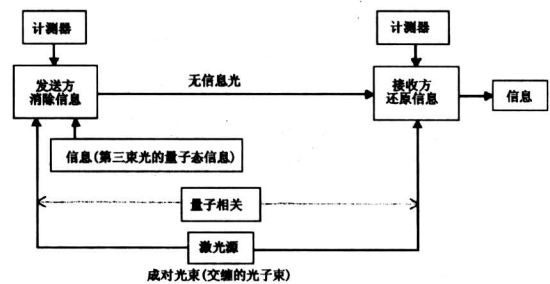


图 2 量子通信新方法

Fig.2 New method on quantum communication

8 量子计算机

量子计算机是当今最前沿的研究课题之一。然而，什么是量子计算机，至今没有明确的定义。一种理解是“用量子芯片做成的能完成传统计算机工作任务的机器”；另一种说法是“利用一些亚原子粒子 (例如电子) 处于量子状态时的特异性质而实现电子计算机功能的机器”；更为通俗的则为“量子计算机是以量子物理学为基础的、具有强大计算功能的计算机”。

一些物理学家至今认为，量子计算机是搞不成的。他们说，量子计算机无非是利用量子力学中两个相反的状态来代替 0 和 1；但量子力学中存在所谓“Schrödinger 猫态”，即活猫态与死猫态的线性迭加，故决定了方案无法实现。另外，EPR 思维指出了两个光子之间的相关性，而非分离态中两个量子位也相关，那么输入到门的量子位的迭加造成输出态的交缠。这就带来了高复杂性，量子门数量很多更使复杂程度难以想象。

总之，qubit (量子位) 不仅有通常的二进制状态，而且有它们的任意迭加态。而半导体中电子的量子态极多，迭加也是上千种状态的杂乱混合。

qudot (量子点) 技术没有这个困难, 因其极小空间使连续的电子态分为分立能级, 从而可从中挑出两种代表 (0, 1), 但在小于 1ns 时失去量子相干性仍是问题。1999 年 4 月 28 日出版的 Nature 报道说, 日本科学家 Y. Nakanmura 等发明了一种“超导量子点”技术; 由于超导体中 Cooper 对全集中在单一量子态中, 如用极小的铝材料制作 qudot, 使 Cooper 对通过隧道效应在量子点与另一较大的铝储层之间运动, 这时可把量子点中无 Cooper 对时为 0, 有 Cooper 对时为 1。这一技术可以开发中等复杂的量子计算机, 被认为是近年来最重要的进展, 但需要低至 0.03K 的超低温。可以认为, 实用的量子计算机将在 5~10 年内问世。

参考文献

- [1] 吴大猷. 量子力学 (乙部) [M]. 北京: 科学出版社, 1983, 21~23
- [2] Davies P C, Brown J R. Superstrings: A theory of everything [M]. England: Cambridge Univ. Press, 1988.
- [3] 沈惠川. 贝尔定理和贝尔不等式 [J], 自然杂志, 1997, 19 (4): 240~244
- [4] Giakos G C, Ishii T K. Anomalous microwave propagation in open space [J]. Microwave and Opt. Tech. Lett., 1991, 4 (2): 79~81
- [5] Enders A, Nimtz G. On superluminal barrier traversal [J]. J. Phys. France, 1992, (2): 1693~1698
- [6] Ranfagni A. Anomalous pulse delay in microwave propagation: A plausible connection to the tunneling time [J]. Phys. Rev., 1993, 48 (2): 1453~1460
- [7] Steinberg A M, Kwiat P G, Chiao R Y. Measurement of the single-photon tunneling time [J]. Phys. Rev. Lett., 1993, 71 (5): 708~711
- [8] Ranfagni A, Mugnai D. Anomalous pulse delay in microwave propagation: A case of superluminal behavior [J]. Phys. Rev. E, 1996, 54 (5): 5692~5695
- [9] Nimtz G, Heitmann W. Superluminal photonic tunneling and quantum electronics [J]. Prog. Quant. Electr., 1997, 21 (2): 81~108
- [10] Mugnai D. Delay time measurements in a diffraction experiment: A case of optical tunneling [J]. Phys. Rev. E, 1997, 55 (3): 3593~3597
- [11] 黄志洵. 波导截止现象的量子类比 [J], 电子科学学刊, 1985, 7 (3): 232~237
- [12] Martin T, Landauer R. Time delay of evanescent electromagnetic waves and the analogy to particle tunneling [J]. Phys. Rev. A, 1992, 45 (4): 2611~2617
- [13] 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, 362~363
- [14] 黄志洵. 波导量子隧道效应与超光速微波的研究 [J], 微波学报, 1998, 14 (3): 250~263
- [15] 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
- [16] 吴忠超. 以全反射来验证虚时间的存在 [J]. 中国科技大学学报, 1998, 28 (5): 501~504
- [17] Nimtz G. Superluminal signal velocity [J]. Ann. Phys. (Leipzig), 1998, 7 (7~8): 618~624
- [18] 沈惠川. 量子力学的随机诠释的数学结构和物理学特征 [J]. 自然杂志, 1995, 17 (3): 152~156
- [19] 王太宏. 集成单电子晶体管的研究动态 [J]. 物理, 2000, 29 (1): 58~59
- [20] 潘建伟. Zelinger A. 量子态远程传送的实验实现 [J]. 物理, 1999, 28 (10): 609~613

New Scientific Problems of electronics in the 21st Century

Huang Zhixun

(Beijing Broadcasting Institute, Beijing 100024, China)

[Abstract] This article treats about the status on the new scientific problems of physics and electronics in the 21st century, involving vacuum energy, negative mass of electron, quantum potential, virtual particles, superstring theory and tachyons; as well as the EPR thinking experiment, quantum entanglement, quantum teleportation, quantum information theory and quantum computers.

[Key words] vacuum energy; negative mass; quantum potential; virtual particles; tachyons; quantum entanglement; quantum information theory; quantum computer