

超光速研究的40年——回顾与展望

黄志洵

(北京广播学院, 北京 100024)

[摘要] 自美国物理学家 O. M. Bilanuik 和 E. C. Sudarshan (1962年) 以及 G. Feinberg (1967年) 的开创性工作以来, 在美国、欧洲和中国都对超光速展开了研究。根据 A. Einstein 于 1905 年发表的原始论文, 超光速没有存在的可能, 但其 1907 年的论文对“信号传播不能超光速”却不很肯定。文章把速度问题分解为若干类、项, 并提出“广义信息速度”定义以利于对众多速度概念的讨论。在反思了 40 年来 (1962—2003 年) 的超光速研究以后, 得出结论认为“超过真空中光速 c ”是一种可实现的科学陈述。

[关键词] 相对论; 量子力学; 超光速; 快子; 负速度; 信息速度

[中图分类号] O412.1; O413.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2004) 10-0006-18

1 引言

1607年, 伟大的意大利科学家 Galileo Galilei (1564—1642) 进行了人类历史上首次企图测量光的速度的实验。这次尝试虽然没有成功, 但他的“光速为有限值”的科学思想, 却在 70 年后被证明是正确的。1676年, 丹麦天文学家 Olaus Roemer (1644—1710) 报告了根据木星的卫星 (木卫一) 观测而得到的光速数据 $c = 214\,000\text{ km/s}$, 虽然它比真实值低了约 30%, 误差很大, 但却开创了光速测量的历史。1972年, 美国标准局以 K. M. Evenson 为首的小组宣布, 他们以高度复杂的技术对甲烷稳定激光完成了测频^[1], 即实现了光频测量, 由此得 $c = (299\,792\,456.2 \pm 1.1)\text{ m/s}$, 精度达 3.6×10^{-9} 。1973年, 国际计量局决定取 $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ 作为光速的规定值, 1975年第 15 届国际计量大会认可了这个值。1983年第 17 届国际计量大会规定以此值作为新的“米”定义的基础。此后国际上即不再测光速, 从而结束了持续 300 年的人类努力确定光速数据的历史。

按地球人的日常经验来看问题, 约 $3 \times 10^8\text{ m/s}$

的速度是很大的值, 即光的传播非常快。光从月球到地球仅需 1.27 s, 太阳光从出发到达地球也仅用 8.3 min。然而, 从宇宙的更大尺度来看, 光的传播似乎又是非常之慢, 例如遥远星系发出的光到达我们这里竟需要数十 (甚至上百) 亿年! 因此, 如果人们想了解, 是否有比光速快的自然现象存在? 或者是否可以用特殊方法人为地造成超光速的运动? 应该说, 有这些想法的本身并不是什么奇怪或不可思议的事。

超光速的英文表述是 faster than the speed of light, 简单些就是 faster than light, 可缩写为 FTL。在欧美文献中也常用 superluminal 代表超光速。近来, 国外又使用“快光” (fast-light) 和“慢光” (slow-light) 进行描述, 前者代表传播速度比 c 大的光和电磁波, 后者代表传播速度等于 c (或小于 c) 的光和电磁波。还有一个英文词是 tachyon, 代表超光速粒子, 国内译成“快子”还是很贴切的。此外, 还有所谓 apparent FTL (表观超光速) 和 pseudo FTL (伪超光速), 指的是那些并非物理实在 (physical reality) 的超光速设想和现象, 它们并非真正意义上的超光速, 不在我们的

讨论范围之内。

1905 年 Albert Einstein 提出狭义相对论 (special relativity, SR) 和光子学说^[2,3], 明年是 100 周年。在这一时刻到来之前, 这两年对 SR 的思考和讨论有越来越热烈的趋势。2003 年 5 月, 笔者曾发表“论狭义相对论的理论发展和实验检验”一文^[4], 其中提到“美国和德国的一些科学单位正设计各种实验以重新检验 SR 的正确性, 例如几年内将有携带精密仪器升空的计划, 以进行 Michelson-Morley 型实验和 Kennedy-Thorndike 型实验, 以便对物理规律和宇宙本质做进一步的验证和探索。”10 月, 在西北工业大学召开了“相对论与物理创新”国际会议, 中外专家学者提供了多篇与 SR 和 GR (general relativity, 广义相对论) 研究有关的论文。2003 年岁末前, 英国出版了 J. Magueijo 撰写的 *Faster than the Speed of Light* 一书^[5], 内容是关于“光速可变理论” (theory of VSL) 的, 作者是伦敦帝国理工学院的教师。今年 4 月 20 日, 美国宇航局发射了“引力探测器 B” (GP-B), 使用 4 个超高精度的回转仪, 目的是检验 Einstein 于 1916 年发表 GR 理论时的预测——时间和空间会因大质量物体的存在而扭曲; 具体检查两件事, 即短程线效应 (地球使其所处的时空的扭曲) 和惯性系拖曳效应 (地球自转对其所处时空的扭曲)^[6]。除此之外, 北京和上海的研究人员在这两年中还做了一系列实验研究, 涉及 SR 中的相对性原理 (复旦大学)^[7,8]; 极慢光速和负群速 (北京大学)^[9,10]; 超光速群速度 (北京广播学院)^[11~13]; 负导磁率和负介电常数 (中国科学院电子学研究所)^[14], 等等。为了探寻客观世界的规律, 中国科学家还在设计 (或正在进行) 一些新的科学实验。

关于超光速, 在 SR 提出的前两年 (1903), 德国物理学家 Arnold Sommerfeld (1868—1951) 曾提到, Maxwell 方程组同样适用于超光速运动的物体^[15]; 1904 年他又论述过超光速粒子 (假如存在的话) 可能具有的物理性质, 他指出, 在那样的速度区域 ($v > c$ 的区域), 粒子失去能量时将加速, 给粒子能量时它将减速; 这与经典的情况是相反的。但在 1905 年出现了 SR 理论, 并在后来几年中成为最著名的物理学说之后, Sommerfeld 修改了自己著作, 从此不再谈论超光速的可能性。因而, 超光速研究的历史不能从 1904 年算起, 虽然

Sommerfeld 确实是一位先驱者。

自 1910 年以后的半个世纪中, 基本上无人写文章讨论超光速; “Einstein 光障” (the light barrier of A. Einstein) 的存在成为共识。但在 20 世纪 60 年代, 在美国出现了第一批论述超光速可能性的文章^[16~18], 其主要观点是, SR 理论断定“粒子不可能加速到光速 c ” 仍然正确, 但问题在于加速并非获得超光速粒子的唯一手段——以光速运行的光子 (photons) 和中微子 (neutrinos) 就不是通过加速获得自己拥有的速度的, 那么为什么不可能存在这样的粒子——其固有速度就在光速以上呢? 1974 年以前, 进行了多个实验均未发现快子; 1974 年有文章宣称在广延大气簇射实验中发现了快子 (R W Clay, P C Crouch. *Nature*, 1974, 248: 28), 后来未被科学界认同。作为超光速研究的第 1 阶段 (1962—1974 年), 并没有实质性进展。

20 世纪上半叶有一项理论成果是 A. Sommerfeld 和 L. Brillouin 完成的经典电磁波波速理论^[19,20]。其中的一个观点是, 当脉冲通过反常色散媒质时会发生失真, 从而造成群速失去物理意义。然而, 后来对平滑脉冲传播的研究表明这一观点不能确证。1970 年, G. Garrett 和 D. McCumber 指出^[21], 可以在实验中保持脉冲不失真而观察到超光速群速甚至负群速; 1982 年, C. Chu 和 S. Wong 用皮秒激光脉冲做实验证实了上述论断^[22]。1982 年的另一件事是 A. Aspect 的实验 (该实验用检验 Bell 不等式的方法对 EPR 思维进行检验) 取得成功^[23], 在物理学界造成了新的骚动。一些著名科学家 (如 John Bell, David Bohm 等) 发表了较为大胆的言论^[24], 认为量子力学 (QM) 非局域性 (non-locality, 也译非定域性) 的存在已经确证无疑, Einstein 局域性实在论观点有问题, 因而对 SR 理论中的一些观点 (如“不存在以太”, “光速 c 是速度最高极限” 等) 都要重新考虑。这是在 80 年代中期, 在这个时期, 科学界开始考虑以量子效应为基础做超光速实验的可能。1985 年, 黄志洵提出了波导的量子隧道效应模型^[25], 为做微波超光速实验做了理论计算上的准备; 又于 1991 年报告了在截止波导的消失波状态中发现负群速^[26]。根据以上情况, 把 1982—1991 年当作超光速研究的第 2 阶段是合适的, 其特点是为下一阶段的研究工作做了多种准备。

1992 年起开始了超光速研究的第 3 阶段, 特

点是多国科学家在多个实验室中对超光速现象的获得及其规律进行研究,其中最著名的有 G. Nimtz 小组的实验(音乐调制在微波信号上通过截止波导而实现超光速)^[27]; R. Chiao (乔瑞雨)小组的实验(双光子赛跑,其中一路通过交叠介质层形成的位垒而实现超光速)^[28]; 王力军等用反常色散区域造成的负群速超光速实验^[29]; J. Webb 小组的实验(由观测类星体发现精细结构常数异常推断宇宙早期的光速值比现在高)^[30]; 等等。在这些实验推动下,又产生了更多的实验^[31~44]。在这一时期,出现了研究超光速问题的书^[16,45,46],而且在美国、德国、中国都召开过讨论超光速的学术会议^[45~47]。因此,如果我们说在这一阶段(1992—2003年)出现了超光速研究的热潮,并没有夸大其词。

在上述的3个超光速研究发展阶段(1962—1974年,1982—1991年,1992—2003年)中,研究人员主要是物理学家、天文学与宇宙学家、电子学家,基本上没有航天科学家介入。这是因为现有火箭和飞船的速度和光速 c 相比还是一个很小的值,航天专家还想不到“超光速”上来。况且,已有的超光速实验,尚处在原理探索性质和实验室阶段,而非应用阶段。然而,人类探索外太空的步伐正在加速,“航天科学前沿”已将超光速运动课题包含在内,近期将召开的香山科学会议即以此为主题。或许,从2004年起我们将迎来超光速研究的新时代。

2 Einstein 为什么认为有“光障”存在

在狭义相对论中,真空中光速 c 仿佛具有特殊的地位。一个陈述是“光速不变原理”,它实际上是一个公设。Einstein 对这个公设的说法是“光在空虚空间里总是以一个确定的速度 c 传播,与发射体的运动状态无关”^[2]。在1919年“什么是相对论”的文章中说:“狭义相对论所根据的第2条原理是‘真空中光速不变原理’,它断言光在真空中有确定的速度,与观测者或光源的运动状态无关。”^[48]1949年, Einstein 在为《美国人民百科全书》撰写的词条“相对论”中,则说光速 c 与光的颜色(即频率)及光源的运动状态无关^[49]。另外,正如大家所熟知, Einstein 说:“超光速的速度没有存在的可能。”^[2]因此,可以把他的意思概括成一句简单的话——光速既是不变的,也是不可

超越的。

众所周知,光在介质(媒质)中进行时,速度比真空中要慢一些,这是正常的。例如,光在水中的传播速度约为 $0.75c$,在金刚石中传播时速度约为 $0.4c$;空气也会使光变慢,大约每秒慢 10 km。但这并不是讨论光速不变原理(或近年来的光速可变理论^[5])时的意思,物理理论讨论的是光在真空中的速度是恒定还是可变。对此,本文不予讨论。现在让我们来看看, Einstein 为什么认为光速不可超越。按 SR 理论写出运动物体长度、质量、能量公式:

$$(l, m, E) = \left[l_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right] \quad (1)$$

式中 l_0, m_0 是静止时长度、质量, $\beta = v/c$, v 是物质(刚性球或电子)的运动速度。如在 $v < c$ 条件下讨论,当 v 增加, l 将减小, m 和 E 将增大;这就是 SR 中有名的推论——运动物体长度缩短,运动物质质量和能量增大。当 $v = c$, $\beta = 1$ 时,会出现以下情况:球成为扁平,电子动能(因其质量)成为无限大。因此, Einstein 断言,对于大于光速的速度 ($v > c$),讨论不再有任何意义。

1907年 Einstein 发表了“关于相对性原理及由此得出的结论”^[50],其中的“速度的加法定理”是一节不长的文字,但对超光速研究而言却非常重要,因为其内容既与信号速度有关,又与负速度有关。文章说,假定沿参照系 S 的 x 轴放一长条物体,相对于它可以用速度 v 传递某种作用(从长条物体来判断),并且不仅在 x 轴上的点 $x=0$ (点 A),而且在点 x (点 B) 上都有对 S 静止的观察者;在 A 处的人发一信号,通过长条物体传给在 B 处的人;长条物体以速度 v ($v < c$) 沿 $(-x)$ 方向运动。那么,根据 SR 速度合成公式,传递时间为负,信号速度为负; Einstein 认为,这种传递机制造成“结果比原因先到达”,因此“不可能有这样的信号传递,……其速度大于真空中光速”。

有趣的是, Einstein 虽然作出了“信号速度不能超光速”的基本判断,但又不作百分之百的肯定。那种不肯定的语气,仿佛为今天的超光速研究留下了空间。他说:“虽然这种结局单从逻辑上考虑可以接受,并不包含矛盾;但它同我们全部经验的特性是那么格格不入。所以 $v > c$ 假设的不可能性看来是足够充分地证实了的”。在这里, Einstein

表示违反因果性的事可以并不违反逻辑，只是由于它违反人类经验，所以他才说“信号速度不可能超光速”。即便如此，他仍然说该结论只是“看起来已被充分证实了”。

3 一个至今仍在研究的问题——以太

众所周知，A. A. Michelson (1852—1931) 和 E. W. Morley 合作，在 1887 年 2 月做了一个以确定以太 (ether) 影响为目的的光学实验，即科学史上享有盛名的 Michelson - Morley 实验 (M - M 实验)；实验得到的是零结果。1905 年 Einstein 说，由于“企图证实地球相对于‘光媒质’运动的实验的失败”，使他提出了 SR 的两个公设 (相对性原理和光速不变原理)，由此可得出简单而自洽的电动力学，“光以太”的引用成为多余^[2]。由于这句话，包括笔者在内的许多人以为，在 SR 问世之前，Einstein 是知道 M - M 实验并深受启发的。但是，晚年的 Einstein 对此却多次否认。

从历史文献看，Einstein 确实曾从 Michelson 的口吻以及别人的传言中，了解到 Michelson 对 SR 理论持保留态度。1952 年 10 月 24 日，Einstein 在同 R. S. Shankland 谈话时说^[51]，Michelson 并不喜欢相对论，他曾说：“我的工作会引出相对论这样一个怪物，对此有点懊悔”。Einstein 还说，他已弄不清楚第一次听说 Michelson 实验的时间，也未意识到曾受该实验影响；同年 12 月 19 日 Einstein 又重复说^[52]，M - M 实验对他的影响是间接的。我们知道，A. Michelson 是在 1931 年去世的，因此他的话只能是在 1931 年之前所讲。根据这些情况，在 SR 提出前 Einstein 是知道 M - M 实验并受其影响的 (有“论动体的电动力学”文章为证)。历史记载还表明，G. F. Fitzgerald 和 H. A. Lorentz 都曾在 SR 出现前，在以太论的基础上对 M - M 实验的零结果作出了解释，就是说，该实验并非只能用 SR 来解释。因此，M - M 实验实际上并不能作为 SR 的真正理论基础，光速不变原理只能看作一个假设，而不能说成是“已被 M - M 实验证明了的理论”^[3]。实际上，直到 1909 年，H. A. Lorentz 仍然坚持“以太存在并有实物性”^[53]。

在 SR 理论已广为人知的漫长日子里，Einstein 曾反复讲，19 世纪的物理学家以“有重物

质”为模型，想出了充满空间的媒质 (以太)，用作电磁现象和光的媒介物；但其力学性质是神秘的，并认为以太是固定在空间之中。H. A. Lorentz 则认为，首先，物理空间和以太不过是同一事物的两种名称；其次，场是空间的物理状态。而 SR 理论则认为，静止的光以太的假说站不住脚；或者说，SR 取消了以太的不动性，这样，电磁场不是媒质的状态，而是独立的实在。然而，1920 年 Einstein 又在“以太和相对论”文章中说^[54]，SR 也并不一定要求否定以太，也可以假定以太是存在的，只是必须不认为它有确定的运动状态。为什么呢？“否认以太存在最后总意味着空虚空间绝对没有任何物理性质”；但任何空间都有引力势，它对空间赋予度规性质 (用 10 个函数即引力势 $g_{\mu\nu}$ 描写空虚空间是广义相对论的内容)。换言之，引力场的存在是和空间相联系的，这与电磁场不同 (在某个空间部分没有电磁场却是可能的)。因此，Einstein 说，按照 GR，“一个没有以太的空间是不可思议的，因为在这种空间里光不能传播，而量杆和时钟也不能存在了”。因此，在 SR 发表 15 年后，Einstein 又一再重复一个名词——“广义相对论以太” (ether of General Relativity)。

经典的以太论有 3 个要点：a. 与 Galilei 变换相联系，并使以太成为电磁现象的绝对参考系；b. 把以太当作是传播光振动的假想媒质；c. 常用以太说明为什么太阳光能穿过真空而到达地球。这样的学说的失败并不令人惊奇，因为对于 a.，是与诸多实验结果不符的；对于 b.，过去给该媒质规定的许多机械性质根本测不出来；对于 c.，光子理论解决了光为何能穿越真空的问题，因为光子既是分立的能量包又是一种基本粒子，它为何不能在真空中飞速前进呢？即使按波粒二象性考虑“光波”，这种波只不过是分立光子的统计性表达，它应当和光子一样能在真空中穿行，而不必依靠“以太”。正因为这些原因，以太学说长期以来已从物理理论中消失。现在，我们又查到了 Einstein 其实并不反对以太的证据，似乎令人费解。

什么是真空？按照量子场论，真空只不过是一种基态形式的场，或者说就是量子场的基态，记为 $|0\rangle$ 。可以证明^[55]，对单模电磁场的 Hamilton 算符为：

$$\hat{H} = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

式中 n 是光子数， $\hbar = h/2\pi$ ， h 是 Planck 常数；当

空间没有光子 ($n=0$) 时能量不为零, 由此得到零点能。李政道先生多次强调, 真空是实在的东西, 是一种介质; 他甚至说, “真空很复杂, 有能量起伏, 是个凝聚态, 是有构造的”^[56]。张操认为, 与经典以太论不同的是“应把以太看成一种物理场, 也可称为物理真空^[57]”; 他又重复 Lorentz 的观点, 即空间不空, 存在一种优越参考系^[58]。1977 年发表了“新以太飘移”(微波背景辐射与地球之间有速度 390 km/s 的相对运动) 测量结果^[59]; 1980 年, P. Dirac 据此表达了对 H. A. Lorentz 的支持^[60]。因此, 如果说从 20 世纪后期开始是在“呼唤以太论的回归”, 新的以太观也与 19 世纪时不同, 它泛指引力场、微波背景辐射 (CMB)、Higgs 场这些东西, 甚至可以就指真空本身。

总之, 对 Einstein 而言, 有两个根本点: 可以在不用以太概念的条件下建立 SR 理论, 即以太概念成为多余; 用以太概念也可以, 它必须是运动的而非静止的, 因为这是狭义相对性原理的要求 (不存在绝对坐标系)。但是, 前者只是讲他“用不着以太”, 却未回答“究竟有没有以太”; 后者只是一种假设, 仍然缺乏证明。在量子场论中, 可以说“真空就是以太”, 它均匀分布于空间, 无所不在; 没有实验表示它是运动的, 那么它就是静止的。新以太论如果重新确立, “光速极限”一说也将取消, “光障”将不复存在。

笔者已在前面提到 Alain Aspect 的实验, 这是一种独特的方法。量子力学 (QM) 预言 Bell 不等式是不成立的, 由实验得到了证明。故要求放弃 2 个假设 (实在性假设和局域性假设) 之一, 因证明 Bell 不等式时用它们。局域性假设是指不存在以超光速传播的物理效应, 故非局域性表示超光速存在。对于 Aspect 实验公布以后的物理学, John Bell 在 1985 年曾说, 这是一个进退两难的处境; 最简单的办法是回到 Einstein 之前的相对论, 那时 Lorentz 和 Poincaré 认为存在以太, 实即一种特惠的参考系, 在其中事物可以比光快。J. Bell 加重语气说: “我想回到以太概念, 因为在 EPR 思维中有这种启示, 即景象背后有某种东西比光进行得更快”^[24]。

4 不超出 SR 框架的超光速研究

有的物理学家说: “狭义相对论并不排除超光速的可能。”从某种意义上讲这是正确的。例如,

在 Sommerfeld-Brillouin 经典波速理论中^[19], 曾讨论群速超光速 ($v_g > c$), 无限大群速 ($v_g = \infty$), 以及负群速 ($v_g < 0$) 这些问题。又如 Feinberg 快子理论^[17], 取运动物质 (如粒子) 静质量为虚数:

$$m_0 = j\mu \quad (\mu > 0) \quad (3)$$

则得质量、动量、能量公式为

$$(m, p, E) = \left(\frac{\mu}{\sqrt{\beta^2 - 1}}, \frac{\mu v}{\sqrt{\beta^2 - 1}}, \frac{\mu c^2}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \right) \quad (4)$$

当 $v > c$ ($\beta > 1$) 时, m, p, E 均为正值, 概念上不与传统物理学相抵触。现在, 当 v 加大时 E 减小, 当 v 减小时 E 加大——这与 A. Sommerfeld 于 1904 年对超光速粒子物理性质的推测是一致的。

因此, 如果我们承认 SR 理论正确, 又认为超光速有可能, 出路之一是假设做超光速运动的物质 (物体) 的静止质量 (m_0) 和静止长度 (l_0) 均为虚数。Feinberg 说, 这种虚质量、虚长度物质 (物体) 只不过是对具有负引力物质 (物体) 的一种描述方式, 它们在宇宙中起排斥作用而非吸引作用。在所谓“快宇宙”中, 能量为零的快子的运动速度是无限大; 当它具有能量时, 速度成为有限值, 并且给它能量越多它就越慢。当其获得无限大能量时, 快子速度慢到最小值——真空中光速 c 。上述情况正是难以检测快子的原因, 因为它实在是太快了。

在 SR 理论中, E, p, m_0 三者满足下述方程:

$$E^2 - c^2 p^2 = m_0^2 c^4 \quad (5)$$

如果 $E > 0$, 则在 $E < cp$ 时, m_0 成为虚数。将式 (3) 代入式 (5), 得

$$E^2 - c^2 p^2 = -\mu^2 c^4 \quad (\mu > 0) \quad (6)$$

此即相对论性快子方程。前已述及, 在 1962—1974 年期间, 虽然做了巨大努力以寻找快子, 但并无成绩可言。

在英文中, 中子是 neutron; 1933 年, E. Fermi 把 W. Pauli 预言过的一种不带电的质量极小的粒子命名为 neutrino, 意思是“微小的中子”, 在中国译为中微子。1956 年 F. Reines 用实验证明中微子存在。长期以来, 认为中微子 $m_0 = 0$, 故它与光子一样是以光速 (c) 运动。1980 年开始出现“中微子有非零质量”的报道。自 1986 年起, 开始出现为负值的中微子测量数据。到 2000 年, 有以下结果^[61]:

$$\begin{cases} \text{电子中微子, } m_0^2 = -2.5 \pm 3.3\text{eV}^2 \\ \mu \text{ 中微子, } m_0^2 = -0.016 \pm 0.024 \text{ MeV}^2 \end{cases} \quad (7)$$

对于中微子为负值，许多物理学家认为是实验中误差造成的（负值只表示测量结果靠近零），因而不重视。但也有一些物理学家认为，这就是“中微子以超光速运行”的证据^[62~66]。艾小白^[65]、倪光炯^[67]对“超光速中微子”做了深入的理论研究。

必须指出日本科学家在中微子研究方面的出色贡献。东京大学教授小柴昌俊领导的研究组于 20 世纪 80 年代初，在神岗町的一个地下矿井建设了中微子观测装置，1987 年观测到从一处遥远的超新星爆发时释放的中微子（捕获 12 个）。90 年代初在日本政府支持下建设更大型的超级神岗装置（Super-Kamiokande），用了 5×10^4 t 纯净水和 1.3×10^4 个光电管。1998 年宣布已捕获 256 个 μ 中微子，并确认中微子有静止质量。1999 年 6 月东京大学宇宙线研究所宣布，从距神岗约 250 km 的筑波向神岗的探测器发射中微子，在 6 月 19 日的实验中，探测到一个中微子的闪光。由于两地渡越时间为 8.3×10^{-4} s，故算出速度为 3.0120481×10^8 m/s^[68]，即 $1.0047c$ 。不过，在 2002 年授予小柴昌俊以 Nobel 物理奖时，颁奖方并未提及他“确定了中微子是超光速粒子”；比 c 大的结果由于 250 km 这个数据不精确（实际上不到 250 km）所致。故中微子究竟以什么速度运动至今仍是悬案。

另外，1996 年 Berkeley 加州大学教授乔瑞雨（R. Y. Chiao）从理论上预期，存在类快子物体

(tachyon-like objects)，像是超光速的准粒子，发生在反转原子媒质中^[69]，是另一种超光速效应。

5 几类不同的超光速问题

研究超光速问题时，须把以下几种情况区别开来。第 I 类问题是“物质能不能以超过真空中光速 c 的速度运动”？第 II 类问题是“能量能否以超过真空中光速 c 的速度传送”？第 III 类问题是“信息能不能用比 c 还快的速度传播”？然而，对这 3 类问题的确切含意需要作一些讨论。

首先，在 I 类问题中，我们要问什么是“物质”？所谓物质主要有 3 种类型：**a.** 实体物质（如一块石头或一艘飞船）；**b.** 微观粒子（如一个电子或一个光子）；**c.** 波动（如电磁波和光波）。在这 3 种形态中，**a** 和 **b** 是空间不连续的，**c** 是空间连续的。这样的讨论方法也容易与 Einstein 的理论作比较；实际上，他从未论述过“波动这种物质能否以超光速传送”的问题，而把范围限制在 **a** 和 **b**。

对于能量和信息传播的速度，同样存在许多疑问。例如，由于不存在离开物质而确立的能量，从表面上看，没有必要单独讨论能速；但在实际上，科学家们已经发表了一些专门讨论能速问题的论文，能量的不同形态（即多样性）更使对能速的研究成为必要。又如，信息的物理学属性是什么？信息不等同于信号，那么信息速度与信号速度的根本区别是什么？笔者列出一个表，以便使我们对要讨论的问题作更细致的区分（表 1）。

表 1 研究速度问题时的分类

Table 1 Split-up to the different subjects of velocity's study

类别	内容	进一步的区分	实例
I	物质运动的速度	a. 实体物质（宏观物体）速度	宇宙飞船的速度
		b. 实体物质（微观粒子）速度	静质量 $m_0 \neq 0$ 的粒子（如电子）的速度 静质量 $m_0 = 0$ 的粒子（如光子）的速度
		c. 波速（非实体物质速度）	自由空间的电磁波的波速 无线电波（含微波）的电脉冲的传输速度 光脉冲的传输速度
II	能量输送的速度	a. 电磁能速度	
		b. 引力能速度	
		c. 核弱力能速度	
		d. 核强力能速度	
III	广义的信息速度	a. 信号速度	
		b. 信息速度	
		c. 作用速度	EPR 作用（量子纠缠态作用）的速度

必须指出，在表 1 的 3 类、10 种速度中，有的尚无证明可以超光速的实验；有的却已有了，甚

至有了多个。也有的速度被认为是无限大，或者在光速 c 与无限大之间的某值。有的速度则还在研

究中和争论中。总的讲情况非常复杂。

现在我们讨论实体物质能否以超光速运动,即第 I a 和 I b 类超光速问题。1967 年的 Feinberg 快子理论要求超光速粒子具有虚数静质量,但 20 世纪末期提出的某些理论(例如曹盛林的理论^[15])却没有这样的限制。这是因为作为 Finsler 时空分析结果的因子是 $\sqrt{1-2\beta^2+\beta^4}$, 而不是过去的 $\sqrt{1-\beta^2}$; 由于

$$1-2\beta^2+\beta^4 = \begin{cases} (1-\beta^2)^2 \\ (\beta^2-1)^2 \end{cases}$$

因而当 $\beta > 1$ 时可取:

$$(l, m, E) = \left[l_0 \sqrt{\beta^2-1}, \frac{m_0}{\sqrt{\beta^2-1}}, \frac{m_0 c^2}{\sqrt{\beta^2-1}} \right] \quad (8)$$

此时 l, m, E 均为实数。故即使发现了自然界的实体物质超光速现象(或在实验室中人为地做成了实体物质超光速的实验),理论上都能解释。曹的理论不要求完全推翻 SR, 只是把 SR 定位为“在亚光速条件下正确的理论”。文献[15]又说明,迄今已由天文观测了解到数十个天体共百余超光速膨胀源。特别是,发现类星体 3c345, 自 1971 年以来的观测表明,两部分互相飞离的速度是 $8c$ ^[70]; 对类星体 3c273 的观测则证明,分离速度达 $9.6c$ ^[71]。此外,以类星体 3c273、3c120 观测数据为基础^[15], 用电子计算机作拟合曲线研究,结果支持一种类空测地线方程的“真实超光速膨胀”的模型。2002 年,曹盛林又指出过去人们常常用时序代替因果律,但时序也可能是相对的^[72], 这类问题不应成为承认超光速运动可能性的障碍。

如果类星体的超光速运动得到确认,人们自然会问“什么是类星体的本质”? 已有的定义为:“类星体是具有活动星系核的一类星系”。由于许多类星体表现出很强的 X 射线辐射,一种解释方法是极热等离子体之一所造成。可以理解,把类星体说成“一种实体物质”当不会犯大的错误,虽然人类至今对类星体的了解还并不充分。正如文献[71]所指出的,这种气势磅礴的天体为何能无视相对论的限制而以超光速飞行,目前人类的知识和研究尚无法做出解释。或许这与宇宙创生的大爆炸有关,才赋与类星体以惊人的能量。而在大爆炸的瞬间(奇点),包括相对论在内的一切现有物理定律都是不适用的。

曹盛林的理论分析是引入新的时空不变量 ds^4 以代替 SR 的 ds^2 不变量。2002 年,白同云在不改变 ds^2 为 Lorentz 不变量的前提下,导出了 Lorentz 变换的修正公式^[73], 肯定了超光速存在的合理性,并认为速度上限没有极限,其值将取决于人类的科学技术的不断提高。问题在于, A. Einstein 最早做分析时,是假定当 $t' = t = 0$ 时(原点 O' 与 O 重合)在公共原点发出的是一个光信号(光速为 c), 做 Lorentz 变换后必然得出光速 c 不可逾越的结论。如假定所发出的是一个超光速信号(速度 nc , $n > 1$), 并重新推导公式,则“光速极限性”完全可以打破。又如,杨新铁从可压缩流体力学出发研究超光速的理论基础,证明 Lorentz 变换是一种波速无穷大的波方程到波速为有限值的中间变换^[74]。他认为可压缩性和相对论是一种数学结构的不同表达,而协变不变原理只是可压缩流动的一种近似处理方式,抛开其局限性就消除了光速不可超越的限制,得到 A. Sommerfeld 预言的快子特性——粒子减小能量反而加速,吸取能量反而减速。总之,近年来多个理论工作显示,承认“物质作超光速运动的可能性”在理论上并不成问题。

6 超光速研究的量子理论基础

在早期,量子力学(QM)不曾对时间、空间问题做专门的、独特的阐述,即没有对 Newton 力学的时空观提出新的假设,新的理论。因此我们可以概括几点: a. 在 QM 中,所有力学量均成为算符,而后者是一种纯数学符号。可以说,只有给定由波函数描写的状态,力学量才有物理意义,而这种状态也就是粒子活动的环境,取决于外场;据此可求解 Schrödinger 方程,得到精确解或近似解。b. 在 QM 中(或说在 Schrödinger 方程中),时间是参数而非算符,是可以人为规定的,即运动中时间的变化, t 多大都可以。c. QM 对空间的看法与 Newton 力学没什么不同;运行中的粒子,其位置是可观测量,但其坐标和动量不能同时被精确地确定。d. 在 QM 中时间与空间是分开的,并服从 Galilei 变换。上述几个特点,明显地与相对论不同。

正如大家所知,在量子力学(QM)建立以后, A. Einstein 对它作了激烈的批评。1926 年 8 月,他在致 A. Sommerfeld 的信中说:“我满意 Schrödinger 的表述方式。……对 Heisenberg-Dirac 的理论,我虽然不得不钦佩,但却闻不到真理的气

味。”^[75]1935 年，他在 EPR 论文中断言，QM 不能对物理真实提供完备的描述^[76]。1950 年 2 月，他在同 R. S. Shankland 谈话时说：“在量子理论的问题上，我与大多数同行的意见不一致”^[77]；又说 QM “回避实在和理性”。尽管如此，由 W. Heisenberg 和 N. Bohr 发展的 QM 的正统解释（Copenhagen 学派）却坚定地认为，QM 的定律对物理真实性提供了完备的描述。此外，虽然 Einstein 的理论（SR）对超光速构成限制，但在 20 世纪的另一主流理论（QM）中却没有这种限制。因而，SR 与 QM 必然会发生冲突，它在 1935 年 EPR 论文发表时，就达到了高潮^[78,79]。

必须指出，在对待超光速的态度上，无法就 I a 类超光速问题去进行 SR 与 QM 的比较，只能就 I b 类超光速问题（以及第 III 类超光速问题）而作比较。这是因为 QM 并非主要适用于宏观物质的理论。假定载人飞船以速度 v 飞行。由于飞船和乘员都是宏观物体，其运动服从经典力学（CM），另外又与 SR 理论有关。当 $v/c \rightarrow 0$ 时，QM 还原为 CM（含时的 Schrödinger 方程将还原为 Newton 第二定律）。但是，如果我们考虑微观粒子（如原子、电子、光子）是否可能作超光速运动的问题，就只有以 QM 为基础进行研究。由于 Einstein 在否定超光速的可能性时一开始就考虑了 I a 类物质（刚性球）和 I b 类物质（电子）^[2]，故我们说，“SR 理论与 QM 理论在超光速问题上有矛盾”是正确的。如果考虑信息传播速度，那么矛盾就更加突出了。

虽然至今仍有物理学家否定 SR 与 QM 有矛盾，但在我们看来，这种矛盾是很明显的。首先，SR 和 CM 一样，认为动体在时空中运动其坐标位置和速度都是确定的，因而其动量和能量也是完全确定的。规定这种运动的是动力学方程，人们可以据此而对动体的运动状况做出预言。因此，只要 $v \ll c$ ，SR 与 CM 的确定性论据并无不同。“上帝不掷骰子”是众所周知的 Einstein 的名言，也证明他的科学、哲学思想是确定论的。然而，QM 却对确定论提出挑战。突出的一点，1927 年 3 月由 W. Heisenberg 提出不确定性原理（即测不准关系式）作为微观粒子遵循的规律：

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad (9)$$

式中 q 是粒子的位置坐标， p 是粒子动量， Δ 表示均方根误差。上式表示微观粒子的动量和位置不

能同时确定——例如当位置完全确定了（ $\Delta q = 0$ ），动量就完全不确定（ $\Delta p = \infty$ ）；反之亦然。但 QM 的这一规律在宏观世界无关紧要，这是由于 Planck 常数很小，上式在宏观物理中不具有重要性，因 q, p 的其他误差来源会掩盖上式表达的测不准性。对于微观粒子，必须抛弃“经典的轨道运动”，故经典物理中的速度定义可能失去其意义和价值。

我们首先分析在 QM 中“速度”的定义问题。1913 年 N. Bohr 曾提出氢原子的“行星模型”——单电子沿半径 a_0 的圆形轨道绕核运动；在写出运动方程时包含有电子速度（ v ）。由这个理论算出的 a_0 值（约 0.53×10^{-8} cm）大体上正确，此理论也能定量解释氢原子的光谱。但这个理论模型其实是错误的，在氢原子情况下取得成功是偶然的（Bohr 本人也清楚这一点）。

在 QM 中，波函数 $\Psi(\mathbf{r})$ 包含了描绘一个粒子所需的全部信息。粒子出现在 \mathbf{r} 处的几率密度为 $|\Psi(\mathbf{r})|^2$ ，测得动量 \mathbf{p} 的几率密度为 $|\varphi(\mathbf{p})|^2$ ， φ 是 Ψ 的 Fourier 变换。故粒子的量子态可用 $\Psi(\mathbf{r})$ 或 $\varphi(\mathbf{p})$ 描写，前者是粒子态的坐标表象，后者是粒子态的动量表象。这与经典物理中用坐标 $\mathbf{r}(t)$ 及动量 $\mathbf{p}(t)$ 表述一个经典粒子完全不同。可以证明^[80]，由自由粒子动能关系（ $E = p^2/2m$ ）及 de Broglie 关系（ $E = \omega\hbar$ ）出发，要求经典粒子参数（ E, \mathbf{p} ）作以下代换：

$$E \rightarrow j\hbar \frac{\partial}{\partial t}, \mathbf{p} \rightarrow \hat{\mathbf{p}} = -j\hbar \nabla \quad (9)$$

就可完成宏观运动向微观运动的过渡，这里 $j = \sqrt{-1}$ ， ∇ 表示算符；现在 $\hat{\mathbf{p}}$ 是一个线性算符。故速度表示也应作以下改变：

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \rightarrow \hat{\mathbf{v}} = \frac{\hat{\mathbf{p}}}{m} = -j\hbar \frac{\nabla}{m} \quad (10)$$

在不用矢量表示时，就可写出

$$\hat{p}_z = -j\hbar \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (11)$$

$$v_z = -j \frac{\hbar}{m} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (12)$$

这便是 QM 中的速度公式，它们的物理意义没法描述。

实际上，对微观粒子仍可用半经典方式表达，现举出数例：**a.** 在量子化学中，在讨论多电子原子时，把类氢波函数当作类氢轨道来讨论^[81]，而这些函数是对单电子原子推出来的，之所以能这样做，

无疑表示人们承认 Bohr 的氢原子行星模型有其正确成份；b. 在许多场合（如加速器技术中，电子管技术中）人们都在讲“电子的速度”，并未因电子是微观粒子而回避谈它的速度，如此等等。因此，在过去的超光速研究中，当涉及光子、电子这样的微观粒子时，速度概念仍在在使用。

SR 的科学、哲学思想与 EPR 论文是一致的，只是前者说信号传递的速度不可能大于真空中光速 c ，后者说局域性 (locality) 的意思是信息传播的速度是有限的。但在 QM 理论中从来不对信号传递（或信息传播）的速度作限制。众所周知，电磁波在真空中的相速为 c ，而 de Broglie 波的相速是超光速的。对后一情况，从未有人充分合理地解释为什么 de Broglie 波的相速比 c 大，也未有人说明超光速相速的意义。因此，电磁波与物质波之间存在奇怪的不对等^[82]，另外，量子纠缠态似乎揭示出一种无限大速度存在，凡此种种都是问题。

现在我们转到利用量子隧道效应或量子光学效应而实现的超光速实验方面来。笔者曾在“超光速研究的量子力学基础”一文中详述微观粒子在力场作用下射向一维矩形位（势）垒时对 Schrdingar 波方程的处理方法和结果^[83]，这里只就物理概念作补充说明。必须指出，在位（势）垒之前（即区域 I）和位（势）垒之后（即区域 III），应当认为波函数 Ψ_1 和 Ψ_3 的建立是同时的，即立刻同时建立起波场，而不是经过位（势）垒流过去的，故“隧道”之说是非严格的。而在位（势）垒内，是消失波状态，可以证明，在入射粒子能量小于位（势）垒高度即 $E < U_0$ 时，垒内的波函数 Ψ_2 为实函数；由于在 Ψ 为实函数时 $\Psi = \Psi^*$ ，代表速度的几率流密度 $J = 0$ ，在这里速度 $v = 0$ （消失波本身不是行波，而是原地振动的驻波）。从这些严格的表述可知，利用“量子隧穿”现象得到的超光速，只能是在两路比较（一路穿过真空或空气，另一路穿过位垒）中获得的“等效速度”，它既不是无限大，也不是零。正因为如此，在以 QM 为基础的超光速实验中，不宜谈论“隧穿速度”，而适宜讨论“隧穿时间”；后者的研究有丰富的内涵。可以说，量子隧穿动力学理论至今尚不完备。目前对量子隧穿时间有各种表述，并且已经知道隧穿过程极为短暂^[84]，虽然这个时间不是零。隧穿时间的测量极为困难，且与定义的不同方式有关。这方面的研究还在继续，但有一点是肯定的，即不追求“隧穿速

度”的定义，甚至是回避提出相关的定义。

表 2 列出了与 QM 有关的超光速理论或实验研究的实例，它们是对“量子力学允许超光速”这一说法的具体体现，并且涵盖了 I b, I c, III 这样几类超光速问题。

表 2 与量子力学有关的超光速理论或实验研究举例

Table 2 Examples of theoretical and experimental research on superluminal which related to quantum mechanics

分类号	主题	内容	发表时间, 文献号	对应超光速问题类别
1	QM 非局域性由实验确证, 及此后国际著名科学家据之提出一些新的物理观点	A. Aspect 小组的实验	1982, [23]	III
		J. Bell 回答 BBC 提问	1985, [24]	III
		D. Bohm 回答 BBC 提问	1985, [24]	III
		黄志洵提出波导的量子理论 (量子隧道效应模型)	1985, [25]	I c
2	把截止波导 (WBCO) 当作微波波段的位 (势) 垒, 使已调微波脉冲通过它, 获得群速超光速, 或获得负群速和负群速	黄志洵以计算证明, 在波导的截止频域相速可为超光速, 另外有出现负相速、负群速的可能	1991, [26]	I c
		G. Nimtz 小组的实验, 令两个微波脉冲赛跑, 其中一路通过位 (势) 垒, 获得群速超光速; 由于微波脉冲被音调调制, 该小组认为证明了信号可以超光速	1992, [27]	I c, III
3	用总厚度仅为 $1 \mu\text{m}$ 的交叠的不同折射率固体材料薄膜当作光频段的位 (势) 垒, 使光子速度加快	K. Wynne 小组的实验, 在太赫 (THz) 频段研究; 在单周太赫脉冲通过位 (势) 垒时, 发现相速可为超光速, 甚至出现负相速	2000, [38]	I c
		R. Chiao 小组的实验, 令两个光子赛跑, 其中一路通过位 (势) 垒, 结果获得 $1.7c$ 的速度	1993, [28]	I b
4	用基于铯原子激发和跃迁的原理进行量子光学 (QO) 实验	L. J. Wang 小组的实验, 令光脉冲穿过铯原子气室, 结果获得了负群速, 是超光速	2000, [29]	I c
		耿天明提出用量子力学理论处理和阐明 L. J. Wang 小组的实验	2004, [85]	I c

7 关于负波速

1907 年 A. Einstein 曾讨论负速度问题, 但认为这种概念违反因果性而没有意义^[50]。1914 年 A. Sommerfeld 和 L. Brillouin 在构建经典电磁波理论时发现了负波速^[19], 但也缺乏深入的分析 and 讨论。负速度 (包含负波速) 的一系列新概念、新

发现是在 Einstein 于 1955 年去世后才有事。

波速是矢量还是标量？在物理学中，速度一定是矢量，这是其原始定义决定的。传统上，相速、群速都视为矢量，这是由于它们的定义式依赖于波矢量 k ，而 k 在电磁波理论中既是最基本的概念，又是十分重要的参数。至于能速、信号速是矢量还是标量，在经典电磁理论中是含糊不清的。1914 年的 Sommerfeld-Brillouin 波速理论，实际上回避了“波速是标量还是矢量”这样的问题，只讨论几种速度的大小，从不涉及它们的方向。虽然也指出了“可能出现负群速”，但也回避讨论其意义。长期以来，科学界对于负群速、负相速缺乏关注和研究。偶有提及，也是过份简单地看问题，例如 J. R. Pierce 在著作中说^[86]：“行波管电子束中可能存在空间电荷波；如果我们与电子一起运动，就会看到一个波的相速为 $(-v_p)$ 向左奔驰；另一个波的相速为 v_p 向右奔驰。”又说：“当已调脉冲波群速 v_g 为正时，波的能量向右运动；如 v_g 为负，波的能量向左运动。”这些说法都是从“速度是矢量”的概念出发而简单地把“负速度”看成反方向的运动。在许多情况下，这种简单化的认识并不恰当。

在科学发展史上，对波速也有过另一种考虑，即波速 v 由波长 λ 和相应的时间（周期 T ）来决定：

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (13)$$

当考虑正弦波时，有了频率 (f) 的概念，故有

$$v = \lambda f \quad (13a)$$

这是矢量公式的标量形式，公式本身不表达出方向，电磁波的进行方向就是波速的方向。这时，波速的大小由波动本身的参数 (λ , f) 而决定。如果 v 为负，不能理解为“运动方向相反”，而应寻求别的解释。但这不意味着应该抛弃经典波速理论。例如，该理论曾导出

$$\left| \frac{dn}{df} \right| > \frac{|1-n|}{f} \quad (\text{群速超光速条件}) \quad (14)$$

$$\left| \frac{dn}{df} \right| > \frac{n}{f} \quad (\text{负群速条件}) \quad (15)$$

式中 n 是折射率；近年来的实验已证明^[11,12]，用上述关系式作为判据是可以的。实验还表明，用增益系统或无源系统，均能产生超光速群速和负群速（用增益系统可把失真减小到非常低的水平）。

2000 年发表的王力军实验^[29]，仍有里程碑式

的意义。我们不妨由此开始，看一下中国和外国科学家对光脉冲在色散媒质中的传播方面所做工作。有关的名词，“EIT 媒质”是电磁感应透明媒质（在其中光速会减得很慢）。“EIA 媒质”是电磁感应吸收媒质（在其中光速会大于 c 甚至成为负群速），我们的兴趣主要在后者。

用一个气室贮存原子气体并用激光技术进行制备，以获得所需要的物理状态（反常色散），这些实验近几年出现较多，是王力军类型实验。取室内为真空时光通过时间为 L/c (L 是气室长度)，为介质时光通过时间为 L/v_g ，故时差为

$$\Delta t = \frac{L}{v_g} - \frac{L}{c} \quad (16)$$

在按上式定义 Δt 时， $\Delta t > 0$ 表示室内为介质时光通过时间长（与真空相比）， $\Delta t < 0$ 表示室内为介质时光通过时间短（与真空相比）。显然，后一情况标志着通过速度快于光速。

取 $v_g = c/n_g$ ，上式成为

$$\Delta t = (n_g - 1) \frac{L}{c} \quad (17)$$

取 $L = 6 \text{ cm} = 6 \times 10^{-2} \text{ m}$ ， $c \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，上式变成

$$\Delta t = (n_g - 1) \times 2 \times 10^{-10} \text{ s} = (n_g - 1) \times 0.2 \text{ ns}$$

考虑以下几种情况：

正常色散媒质，例如取 $n_g = 1.5$ ，则得 $\Delta t = 0.1 \text{ ns}$ ；表示时差为正，而且这类实验较为难做；

群速为光速 ($v_g = c$)，这时 $\Delta t = 0$ ，即零时差；

群速超光速，且为无限大 ($v_g = \infty$)；这时 $n_g = 0$ ， $\Delta t = -0.2 \text{ ns}$ ，得到负时差；

负群速 ($v_g < 0$, $n_g < 0$)，这时 $\Delta t < 0$ ，也是负时差；具体实验例为，王力军小组 $\Delta t = -62 \text{ ns}$ (2000 年发表)^[29]，陈徐宗小组 $\Delta t = -900 \text{ ns}$ (2003 年发表)^[10]。

在实验中，负波速（或说负光速）已是实在的东西。它比“无限大波速（光速）”还大，对此，人们觉得难以理解。多年来，有以下几种尝试解释负波速；a. 文献[29]及[42]认为，光脉冲由多个频率成分迭加而成；当其尚未进入气室前端，在后端某处由于波的迭加形成另一峰值，刚好是光脉冲提前到达的位置。即复相 (rephasing) 作用，造成脉冲峰刚到前端时，后端即出来了 ($-\Delta t$)，形成负群速。b. 文献[10]认为，现在的脉冲长度（脉冲持续时间 \times 光速）是很大的；王力军实验脉宽 3

μs , 脉长 900 m; 陈徐宗实验脉宽 10 μs , 脉长 3 000 m; 这些数据与 L (6 cm) 相比非常之大。这时, 用来说明脉冲速度是否超光速有困难, 不好说。具体讲, 王力军实验脉冲超前时间 \times 光速 $=62 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^8 \text{ m} = 18.6 \text{ m}$; 陈徐宗实验脉冲超前时间 \times 光速 $=900 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^8 \text{ m} = 270 \text{ m}$; 这些是脉冲超前的空间距离。长度为 3 000 m 的脉冲穿过气室时, 前沿被放大, 超前行进 270 m; 这个脉冲的波峰超前 900 ns; 这种负群速现象是波前放大的现象。c. 文献[87]认为, 电磁场方程的通解是两个解(推迟解和超前解)的叠加, 过去常略去一个(超前解); 但它可能是不可忽略的, 王力军实验中出现的负速度正好显示了“超前场”的存在。此外, 文献[87]还认为这是人们在实验室中实现了某种“时间机器”(time machine)。

8 关于信息速度

笔者将信号速度、信息速度、作用速度这3个从表面上看相同的概念区分开(表1), 并赋予其一个总名称——广义信息速度(general Information velocity, GIV)。一个信号并不一定带有信息, 这在人们的日常生活中是常见的情况。究竟如何定义“信息”, 至今仍有争论。1948年 C. E. Shannon 用熵(entropy)表达事物所含的信息量, 他认为人们不可能用少于熵的 bit 数来确切地表达该事物。

我们当然关注信息的传输速度。“物质、能量能否超光速运动”, 与“信息能否超光速传输”, 这两个问题肯定有联系, 但又不能等同。从20世纪初的 Einstein 到21世纪初的我们, 都有把两个方面加以区分的考虑。回顾1905—1907年间 A. Einstein 的态度, 对物质和能量的运动(输送)不能超光速, 他说得很肯定; 而对相互作用(信号)传递的速度不能超光速, 他明显表现出犹疑。或许, Einstein 早就认识到要把两者区别开来。信息与物质确实不能等同。物质有质量, 信息则没有; 物质有质量守恒及能量守恒定律, 信息却不守恒。所以, 没有必要把信息传输速度与物质运动、能量传输的速度绑在一起讨论。

英国人 J. Brown 既是科学家, 又是科学记者和编辑。他在1985年为英国广播公司(BBC)搞了一个专题广播节目, 由他和当时在剑桥大学任教的 Paul Davies 教授联合主持, 对8位著名科学家

进行了采访、讨论和录音。节目播出后获得了公众的肯定, 引起了极大的兴趣^[24]。这里只介绍两位科学家的谈话。首先是在欧洲核子研究中心(CERN)工作的 John Bell, 他先说明 Bell 不等式是分析 EPR 推论的产物, 该推论说在 EPR 文章条件下不应存在超距作用; 但那些条件导致 QM 预示的非常奇特的相关性。由于 QM 是一个极有成就的科学分支(很难相信它可能是错的), 故 Aspect 实验的结果是在预料之中的。“QM 从未错过, 现在知道了即使在非常苛刻的条件下它也不会错”, “肯定地讲, 该实验证明了 Einstein 的世界观站不住脚”。这时提问者说, Bell 不等式以客观实在性和局域性(不可分性)为前提, 后者表示没有超光速传递的信号。在 Aspect 实验成功后, 必须抛弃二者之一, 该怎么办呢? 这时 Bell 说, 这是一种进退两难的处境, 最简单的办法是回到 Einstein 之前, 即 Lorentz 和 Poincare, 他们认为存在的以太是一种特惠的参照系(preferred frame)。可以想象这种参照系存在, 在其中事物比光快。有许多问题, 通过设想存在以太可容易地解决。Einstein 除掉以太只是使理论更优雅、简练。

在发表了这些惊世骇俗的观点后, Bell 重复说: “我想回到以太概念, 因为 EPR 中有这种启示, 即景象背后有某种东西比光快; 但这种以太在观察水平上显示不出来。” Bell 认为, 给量子理论造成重重困难的正是 Einstein 的相对论。

然后是英国著名物理学家 David Bohm, 他曾在1951年以现代形式对 EPR 思维作了表述。在提问时, 主持人把“局域性”(locality)直接定义为“宇宙的不同区域不能互相传递超光速信号的观念”; 而 Bohm 则说, (由于 Aspect 实验)他完全准备好了“放弃局域性”, 但并未放弃相对论, 而是把它看成更广泛的某种学说的近似, 正如 Newton 力学是相对论力学的一种近似。Bohm 明确表示, 他“接受超光速信号的概念”。Bohm 认为, 只要做现有类型的实验, 相对论就仍有效, 但在更深层次可能发现有某种超光速的东西。对于 Einstein, Bohm 认为有些事情是按他预料那样发生的, 但是“Einstein 不可能在每件事上都正确”。另外, Bohm 主张用“相关”一词描写那种联系, 用“信号”一词就不合适, 因为这个词包含了信息传递的含意。

2003年, M. D. Stenner 等发表“快光媒质中的信息速度”一文^[43], 报道了用钾原子气体在

光频研究的情况。实验观察到光脉冲的负群速传播 ($v_g = -c/19.6$)；此外，通过编码搭载信息并作测量，得到的结果为：“光脉冲的群速是超光速，信息速度却是亚光速”。笔者认为，这类研究仅仅是开始。同年，V. Jamieson 在一篇评论文章中指出，由于我们至今并不完全了解信息的基础，因此信息速度超光速的可能性仍然存在^[88]。

关于作用速度；所谓“作用” (action) 必须具有力效应和能量传递，这与“相关” (correlation) 一词不同，后者可以是即时的，典型地体现在量子纠缠态中。显然，EPR 思维和量子信息学 (quantum information theory)，根本点在于实验已证明一种超距的、即时的联系 (相关性) 存在，但这种物理过程尚未发现有力作用、粒子传递、能量传递。这里实际上是有一种无限大速度作为量子态的作用速度在发生联系，研究的前景甚至涉及“人类的超距感知现象与双胞胎之谜的破解^[79]”，是非常奇妙的。

1955 年，前苏联的 V. A. Fok 院士说：“在量子理论发展初期曾为它做了许多工作的 Einstein，对近代的量子力学却采取了否定态度，这是特别令人惊异的。EPR 思维中的两个子系统之间没有直接的力的相互作用，一个也能影响另一个，Einstein 认为不可理解，从而认为量子力学不完备。”^[89]Fok 认为，量子力学中 Pauli 原理的相互作用 (影响) 是一个非力的例子。具有共同波函数的两个粒子 (EPR 系统) 之间的相互作用 (影响) 是 QM 的非力相互作用 (影响) 的另一种形式。非力的相互作用 (影响) 的存在不容置疑，否定这种作用是错误的 (Fok 院士所说的相互作用 (影响)，现在通常称之为“量子相关”)。

9 关于引力速度

引力传播速度问题是自然科学中的一个基本问题。假想太阳突然爆炸、消失，即对地球的引力突然变为零，那么地球的运动会发生巨变。问题是，地球是立刻发生变化，还是 8.3 min 后发生变化？I. Newton 认为是前者，即引力传播是实时的 (或说引力传播速度是无限大)；而 A. Einstein 认为是后者，因为他认为引力是以光速 c 传播。近年来还有第三种意见，认为引力传播速度是比光速大很多倍的一个有限值。可以说，这仍然是一个尚未解决的科学疑谜。

I. Newton 的伟大著作《自然哲学之数学原理》共有 3 个版本，第一版发表于 1687 年^[90]，第三版发表于 1726 年，全部用拉丁文写成。第一个英文译本是根据第三版译出的，出版于 1729 年。在这部书里，Newton 注意到光速有限 (O. Roemer 实验) 的事实；此外，他提出了万有引力的理论。Newton 指出：“我们以引力作用解释了天体及海洋的现象，它取决于物质的量，向所有方向传递到极远距离，按距离平方反比关系减弱；这规律甚至远及于最远的彗星远日点。”但 Newton 说，他对于找出引力性质的原因无能为力，并且他也不构造假说。显然，Newton 认为引力作用是实时发生的，后人便称之为“超距作用”。在后来发现了电磁场之后，人们建立了“电磁作用时间有限”的概念，这种场作用称为“近距作用”。

1916 年，A. Einstein 发表了关于广义相对论 (GR) 的第一篇完整的论文^[91]，它的目标是克服狭义相对论 (SR) 的弱点——没有考虑引力场的影响。文章指出，GR 的建立导致一种新的引力理论的出现，也导致必须修改“真空中光速不变原理”，这是因为在 GR 中“光线的路程一般必定是曲线”。1917 年 Einstein 建立了引力场方程；1918 年又发表论文“论引力波”，说“引力场是以光速传播。”^[92]

20 世纪 50 年代，前苏联科学院院士 V. Fok 的专著讨论空间、时间和引力的理论^[93]。该书认为，以 Lorentz 变换为基础的 Galilei 空间理论被称为相对论是合适的；然而，不可能把万有引力安置在均匀的 Galilei 空间的框架内，需要一种把引力包含在内的时空理论；Einstein 称自己的理论为“广义相对论”则不合适，这是因为在引力理论中假定了空间非均匀性，而相对性与均匀性相联系。此外，Fok 从 Maxwell 方程组出发推导了电磁波波前传播的方程，并讨论了信号速度的问题。Fok 指出，信号的发送不一定仅靠电磁波，还可借助于别的波 (例如与快子对应的物质波)，因而仅用光这种信号作为计算概念的基础是缺乏普遍性的，亦不能反映空时 (space-time) 的性质。如果自然界并不存在“统一的极限速度”，例如光速与引力速度竟然不同，那么至少对其中之一，相对性原理不能成立。此外，Fok 还认为“优越坐标系是存在的”。

Einstein 提出“引力场以光速 c 传播”，这个观点长期以来缺乏实验上的证明。多年研究引力问

题的 T. van Flinders 在 20 世纪末发表文章说^[94,95]，他认为引力是自然的一种传播力作用，如对木星轨道运动做分析，就得到引力速度 $v \geq 2 \times 10^{10} c$ 。2002 年他再次发表文章，给出了引力速度比光速 c 大得多的实验证据。

然而，2003 年 1 月 8 日法新社从美国华盛顿发出电讯说，Einstein 的理论（引力传播速度等于光速）已被两位科学家（S. Kopeikin 和 E. Fomalont），用实验证实。实验方法是对木星经过时发自一个类星体的光做测量；由于光受木星引力影响而偏转，造成它们到地球的时间稍有延迟。实验是设想以木星位置对星光的延迟作为测量引力速度的依据。他们使用了 10 架 25 m 射电望远镜（分布在加勒比地区到夏威夷）和 1 架 100 m 射电望远镜（在德国）进行测量，结果是引力速度相当于光速，误差在 20% 以内。实验者指出，他们的工作对“膜宇宙”理论是个打击，该理论认为引力能以超光速穿过额外的维度，而光只穿过普通宇宙，即主膜。以上情况被说成是于 2002 年 9 月 8 日使用美国的长基线阵列射电望远镜所取得的重要成果。但在两周内，在美国物理界、天文界即引发了严重的争议^[96]。Nature 和 Science 杂志都报道说，科学家们认为实验的解释有致命的缺陷。纽约大学的 P. van Nieuwenhuizen 一生致力于引力研究，他说“这完全没有意义”。圣路易华盛顿大学的 C. Will 持类似看法。另一物理学家 K. Nordtvedt 说：“实验很精采，但与引力速度无关”。还有人认为 Kopeikin 等观测的是引力场中的射电波速度，而不是引力的速度。

因此，引力传播速度问题至今未获解决，Einstein 的理论尚未被证明。“GR 与超光速不相容”的论点也就不能成立。

10 对相对论的再思考

20 世纪有两大主流理论——相对论（SR，GR）和量子力学（QM）。有的物理学家说 SR “是逻辑自洽的理论，不存在任何矛盾”^[97]；但也另有一些研究人员说 SR “逻辑上有大量不自洽的问题”^[98,99]。总之，学术界存在尖锐的分歧。近年来，许多科学家都在考虑如何看待 SR 的真理性的问题。例如张操认为，把该理论称为“动体的电动力学”是很恰当的，把它说成是“一切自然现象的普遍规律”则不妥，是过了头，例证之一是设置光

障极限，之二是否认了以太场存在的可能。英国科学刊物 New Scientist 则说：“相对论在某种程度上讲是一种古典理论”。1994 年 K. S. Thorne 指出，当 Einstein 于 1921 年冬获 Nobel 物理奖时，瑞典皇家科学院秘书在电话中特别说明，相对论不在奖励范围内^[100]。1971 年 W. Rosser 在其著作中指出：“我们并不宣称 SR 是绝对正确的，因为一切理论都可以被新理论所取代，只要新理论与实验结果符合得更好”；“我们并没有声称过 SR 是绝对正确的，在将来任何时候，它很可能又被某个与实验符合得更好的新理论代替。”^[101]一位相对论专家反复强调上述观点，十分耐人寻味。

关于 SR 的两个公设，朱永强针对“相对性原理”做了实验^[7,8]，得出了与 SR 理论不一致的结果；所用实验方法为：a. 带电体运动产生磁场的跟踪观察；b. 粉碎电磁波不遵守相对性原理的表现。其次，还有人正准备对“光速不变原理”做新的实验检验，也有人建议了检验单向光速是否可变的实验方案。关于 SR 的几个推论，季灏提出“使狭义相对论为难的 3 个（思维）实验”^[96]，（包括“运动的时钟变慢还是变快”、“大桥断还是不断”等），都联系到“运动的尺变短”推论；但对于动体的长度是否与速度有关，目前尚缺乏实验检验。这里还关联到光速是否与运动速度有关？也应用实验（以测单向光速为基础）进行检验，但做起来很困难。

从 SR 的情况来看，基本的 2 个假设（相对性原理、光速不变原理），至今仍遭质疑。一些推论（如“运动的尺变短”、“光子无静质量”、“光速不可逾越”）没有获得验证，令人存疑是可以理解的。虽然有的推论（如“运动的钟变慢”、“动体的质量随运动速度增加而增大”）是有实验验证的，但仍给人下述印象，即 SR 理论需要改进，不一定要搞这么多人为限制。例如可以假定“存在一个极限速度”，不提光速，同样可导出与 Lorentz 变换（LT）类似的式子；在这个新理论中，不再有对光子静质量为零的规定，超光速也是允许的。这时，只要认定该极限速度不变就可以了，不必一定是“光速不变”。其实，中国数学家秦元勋早在 1975 年就提出，可以设定一个不变速度 w ，用来代替 Lorentz 变换中的光速 c ^[102]。2002 年，耿天明也提出了类似的意见^[103]。

关于广义相对论（GR），实验检验也在进行中。前已提及，NASA 于 2004 年 4 月 20 日发射了

引力探测器 GP-B, 耗资 7.5 亿美元, 目的在于检验 GR 理论中的时空弯曲效应^[104]。联系这件事, 广州日报报道说, 章均豪的研究表明, Einstein 的 GR 理论公式在推导上有错误, 而且与实验不符^[105]; 时空不是弯曲的而是平直的^[106]。人们期待着 GP-B 在两年后公布检验结果时有一个明确的结果。时空是平直还是弯曲, 与超光速问题有密切的关系。多年来有一个虫洞理论 (theory of worm hole)。虫洞的可能性建基于宇宙并非平直, 而是弯曲 (根据 GR) 甚至有褶皱的, 这样地球才可能与 (举例来说) 织女星相邻, 可以经由短短的虫洞相联结。故 GR 的时空理论 (宇宙会因引力而弯曲, 产生引力的质量越大则弯曲越厉害) 为虫洞的利用以及超光速可能性创造了前提。为了使时空弯曲剧烈化, 要求质量和密度极大的天体, 而这样的天体是不缺少的。虫洞也被称作虫孔, 普通情况下只以微量子形式存在, 物理学法则不允许大型虫洞的形成。有人称它为“强引力场宇宙结构产生的裂缝”, 其大小仅为原子尺寸的 10^{-9} 。美国物理学家 K. Thorne 通过 Einstein 场方程的计算发现, 用某种物质 (他称为奇异物) 可以贯穿虫洞并依靠引力撑开洞壁, 而张开虫洞的条件是奇异物的平均能量密度为负值^[107]。Thorne 的学生 M. Morris 进一步指出, 如能让一个虫洞持续打开, 或许它会允许星际间的超光速旅行。1995 年, 一位英国科学家在星际推进协会 (IPS) 报告说, 未来的太空旅行者可以从某点进入虫洞, 再从成百上千光年的另一点出来, 这种旅行是超光速的; 依靠负能量, 可以打开及扩大虫洞, 并稳定其结构。2000 年, 俄国学者 I. Kasnikov 说: 大虫洞可以创造, 只要搞出那种奇异物质, 宇宙大爆炸后即有虫洞存在。

以上讨论是在 GR 理论的基础上进行的。因此, GR 是允许超光速的。但众所周知, GR 是 SR 的发展和延伸。如果说, “GR 允许超光速”, 似乎说不通; 但这种相容性确实存在。例如曹盛林指出: “超光速运动的存在, 在广义相对论中并不会遇到任何矛盾。Einstein 只是人为地把光速不可逾越的结论下意识地用以限制 GR 的一切结果, 即从场方程的所有可能解中人为地抛弃了可能有意义的类空测地线部分。更为有趣的是, 如果将 GR 中最著名的 Schwarz 解的类空测地线与几个具有长期观测的超光速膨胀天体的数据作拟合, 则可发现二者

的符合一致是令人吃惊的。它意味着在是否可能存在超光速运动的问题上, GR 借助天体的超光速膨胀现象向 SR 提出了挑战。”^[15]

如果 SR 在相对论内部与 GR 有矛盾, 在外部与 QM 有深层的矛盾, 那么 SR 的状况就不好了。难怪至今对 SR 还有那么多的争议, 遭受了那么多人的反对。至少, 它还需要改进和发展。在论及 SR 与 QM 的矛盾时, 必须看到目前的状况——尚无任何一个重要实验否定 QM, 而确有一些实验似与 SR 不一致。

11 尚待研究的若干问题

本文从多方面分析讨论了超光速问题, 得到的结论是: 真空中光速 c 是一个障壁 (light barrier), 而不是一个极限 (limit of speed)。自 1962 年以来的 42 年中, 关于超光速问题的研究可以说是精采纷呈, 其中也包括中国科学家所做的大量工作。展望未来, 我们认为还有诸多问题需要从理论和实验上做深入的探讨。

例如, 许多超光速实验业已证明, 群速超光速 (乃至负群速) 是在实验室中常常可以观察到的现象。但是, 我们对此还缺乏深刻的认识。2001 年, G. D' Agunno 等人用经典电磁理论和量子隧穿理论相结合, 分析了一种周期结构, 得到如下公式^[108]:

$$\bar{v}_e = |T|^2 v_g \quad (18)$$

式中 \bar{v}_e 是平均能速, T 是系统的传输系数; 我们可由此式导出能速超光速 ($\bar{v}_e > c$) 的条件为:

$$v_g > \frac{c}{|T|^2} \quad (19)$$

即在 $|T|$ 很小时, 群速要比光速大很多 ($v_g \gg c$), 能速才可能比光速大。这就给我提供了一个新的研究方向。

另外, 现有的超光速实验或是用无源系统, 或是用增益系统。前者常常可看成是滤波器 (带通、带阻、高通类型)^[27,36,44]; 而群速超光速总是在衰减大的阻带, 在这里电磁波得到加速。这是为什么呢? 可以说, 迄今为止无论用色散理论、消失波理论、量子理论 (QM 隧道效应等), 似乎都还未能从本质上说明“为什么变成超光速”的问题, 物理解释还停留在表面上。

其他的问题还有: 负能量概念; 负相速与负折射率、负导磁率、负介电常数; GR 和 QM 中的速

度的含义；超距作用；量子位（势）理论；新的以太观；光子静质量与 Proca 方程组；中微子的运行速度；引力速度；物质波粒子通过量子位（势）垒；波和粒子通过等离子体时的速度；把光频测量中的高新技术用于超光速实验；等等。显然，只有通过多学科的既分工又合作的联合研究，才能取得更多的新成果。

鉴于超光速研究目前还处于原理研究和实验室研究阶段，讨论它与宇航科学及航天技术的关系是困难的。但这并不是说，讨论这一问题没有意义。相对于光速 c 的数据 (299 792 458 m/s)，目前航天器能达到的速度 (10 000 m/s 以下) 是很慢的，但“用超光速航行”、“寻找虫洞”这类话题，在西方科学界已经很不新鲜。俄罗斯科学家也在谈论“热核冲力发动机”，认为可以达到 10^4 km/s 的速度。虽然制造“极高速星际飞船”可能是 22 世纪才能进行的工作，具有永不休止的探索精神的人类终将解决这一难题。

12 结语

在年龄到达 50 岁以后，A. Einstein 有许多谦虚甚至自责的言论。例如在 1931 年 (52 岁) 时他说，他已认识到“存在某些我们无法洞察的事物”，认识到“我们只了解最深奥理论和最美丽结构的皮毛”。在 1949 年 (70 岁) 时说，“我感到在我的工作中没有任何一个概念会很牢靠地站得住脚，我也不能肯定我所走的道路一般是正确的”^[109]。在 1951 年 (72 岁) 时说，“整整 50 年的自觉思考没有使我更接近于解答‘光量子是什么这个问题’”^[110]。这些话表明 Einstein 在晚年时面对复杂的自然和宇宙所持的一种谦虚的态度。确实，要完全对自然做出解释，远远超出了一个人可能有的能力，即使这个人充满智慧的 Albert Einstein。

根据美国在西非的核反应堆的实验，最近 New Scientist 报道说，物理常数中神圣不可动摇的光速在 20 亿年前比较大，而且并非在宇宙的遥远角落，而是在地球这里就是如此^[111]。科学的发展表明，美国 3 个科学院关于“爱因斯坦的论断不一定是最终真理”^[112]的说法是有道理的。

明年 (2005 年) 是 Einstein 的 3 篇著名论文发表 100 周年，也是 Einstein 去世 50 周年。我们认为，作为后人应当继承他的不懈科学探索的事业，应当改进和发展他的思想，这才是纪念他的最好方

式。人作为个体其寿命极为有限，但人类不断进取的精神永存。

致谢：首都师范大学耿天明教授曾与作者讨论本文的初稿并提出宝贵意见，谨致谢忱。

参考文献

- [1] Evenson K M, Wells J S, et al. Accurate frequency of molecular transitions used in laser stabilization: the 3.39 μm transition in CH_4 and the 9.33 and 10.18 μm transition in CO_2 [J]. Appl Phys Lett, 1973, 22: 192~198
- [2] Einstein A. 论动体的电动力学[A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集[M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 83~115
- [3] Einstein A. 关于光的产生和转化的一个启发性观点[A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集[M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 37~53
- [4] 黄志洵. 论狭义相对论的理论发展和实验检验[J]. 中国工程科学, 2003, 5(5): 7~18
- [5] Magueijo J. Faster than the speed of light [M]. Cambridge: Persus Publishing, 2003
- [6] 美国将用实验验证广义相对论[N]. 参考消息, 2004-04-07
- [7] 朱永强. 电磁感应的异常现象[J]. 物理实验, 2001, 21(11): 48
- [8] 朱永强等. 粉碎电磁波的性质和应用[J]. 物理学报, 2001, 50(5): 832~836
- [9] 郭瑞民, 肖峰, 陈帅, 等. 电磁感应透明(EIT)的实验和理论研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10(4): 59~63
- [10] 陈徐宗, 肖峰, 李路明, 等. 光脉冲在电磁感应介质中的超慢群速和负群速传播实验研究[J]. 北京广播学院学报(自然科学), 增刊, 2004, 11: 19~26
- [11] Huang Zixun, Lu Guizhen, Guan Jian. Superluminal and negative group velocity in the electromagnetic wave propagation[J]. Engineering Sciences, 2003, 1(2): 35~39
- [12] 黄志洵, 逯贵祯, 关健. 电磁波传播中的群速和负群速[J]. 北京广播学院学报(自然科学版). 增刊, 2004, 11: 10~18
- [13] Lu Guizhen, Huang Zixun, Guan Jian. Study on the superluminal group velocity in a coaxial photonic crystal [J]. Engineering Sciences, 2004, 2(2): 67~69
- [14] 隋强, 李廉林, 李芳. 负介电常数和负磁导率微波媒质的实验[J]. 中国科学. G, 2003, 33(5): 416~427
- [15] 曹盛林. 芬斯勒时空中的相对论和宇宙论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2001

- [16] Bilanuik O M P, Deshpande V K, Sudarshan E C G. Meta relativity[J]. *Am J Phys*, 1962, 30: 718~722
- [17] Feinberg G. Possibility of faster than light particles[J]. *Phys Rev*, 1967, 159(5): 1089~1105
- [18] Bilanuik O M, Sudarshan E C G. Particles beyond the light barrier[J]. *Phys Today*, 1969: 43~51
- [19] Brillouin L. Wave propagation and group velocity[M]. New York: Academic Press, 1960
- [20] 黄志洵. 电磁波经典波速理论及存在问题[J]. *北京广播学院学报(自然科学)*, 2004, 11(2): 1~11
- [21] Garrett C G B, McCumber D E. Propagation of a Gaussian light pulse through an anomalous dispersion medium[J]. *Phys Rev*, 1970, A1(2): 305~313
- [22] Chu C, Wong S. Linear pulse propagation in an absorbing medium[J]. *Phys Rev Lett*, 1982, 48(11): 738~741
- [23] Aspect A, Grangier P, Roger G. Experiment realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedanken experiment, a new violation of Bell's inequalities [J]. *Phys Rev Lett*, 1982, 49: 91~96
- [24] Brown J, Davies P C W. 原子中的幽灵 [M]. 易心洁译, 长沙: 湖南科学技术出版社, 1992
- [25] 黄志洵. 波导截止现象的量子类比 [J]. *量子科学学刊*, 1985, 7 (3): 232~237
- [26] 黄志洵. 截止波导理论导论 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1991
- [27] Enders A, Nimtz G. On Superluminal barrier traversal [J]. *J Phys, I France*, 1992, (2): 1693~1698
- [28] Steinberg A M, Kuwiat P G, Chiao R Y. Measurement of the single photon tunneling time [J]. *Phys Rev Lett*, 1993, 71 (5): 708~711
- [29] Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A. Gain-assisted superluminal light propagation [J]. *Nature*, 2000, 406: 277~279
- [30] Webb J, et al. Further evidence for cosmological evolution of the fine structure constant [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 87 (9): 091301, 1~4
- [31] Ranfagni A, Fabeni P, Pazzi G P, et al. Anomalous pulse delay in microwave propagation: a plausible connection to the tunneling time [J]. *Phys Rev E*, 1993, 48 (2): 1453~1460
- [32] Spielmann Ch, et al. Tunneling of optical pulses through photonic band gaps [J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 73 (17): 2308~2311
- [33] Ranfagni A, Mugnai D. Anomalous pulse delay in microwave propagation: A case of superluminal behavior [J]. *Phys Rev E*, 1996, 54 (5): 5692~5696
- [34] Nimtz G, Heitmann W. Superluminal photonic tunneling and quantum electronics [J]. *Prog Quant Electr*, 1997, 21 (2): 81~108
- [35] Mugnai D, Ranfagni A. Delay time measurements in a diffraction experiment: A case of optical tunneling [J]. *Phys Rev E*, 1997, 55 (3): 3593~3597
- [36] Mitchel M W, Chiao R Y. Causality and negative group delays in a simple bandpass amplifier [J]. *Am J Phys*, 1998, 66: 14~19
- [37] Mugnai D, Ranfagni A, Ruggeri R. Observation of superluminal behaviors in wave propagation [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84 (21): 4830~4833
- [38] Wynne K, et al. Tunneling of single cycle terahertz pulses through waveguides [J]. *Opt Commun*, 2000, 176: 429~435
- [39] Vetter R M, Haibel A, Nimtz G. Negative phase time for scattering at quantum wells: A microwave analogy experiment [J]. *Phys Rev E*, 2001, 63: 046701~046703
- [40] Hachè A, Poirier L. Long range superluminal pulse propagation in a coaxial photonic crystal [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80 (3): 518~520
- [41] Munday J N, Robertson W M. Negative group velocity pulse tunneling through a coaxial photonic crystal [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 81 (11): 2127~2129
- [42] Akulshin A M, Cimmino A, Opat G I. Negative group velocity of a light pulse in cesium vapor [J]. *Quant Electr*, 2002, 32: 567~569
- [43] Stenner M D, Gauthier D J, Neifeld M A. The speed of information in a fast - light optical medium [J]. *Nature*, 2003, 425: 695~698
- [44] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W. Superluminal and slow light propagation in a room temperature solid [J]. *Science*, 2003, 301: 200~202
- [45] 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
- [46] 黄志洵. 超光速研究新进展 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [47] Proc of the workshop on superluminal velocities: Tunneling time, barrier penetration, non-trivial vacua, Philosophy of Physics [J]. Köln, Germany *Ann der Phys*, 1998, 7 (7, 8): 591~782
- [48] Einstein A. 什么是相对论 [A]. 方在庆, 韩文博, 何维国译. 爱因斯坦晚年文集 [M]. 海口: 海南出版社, 2000. 53~58
- [49] Einstein A. 相对论 [A]. 方在庆, 韩文博, 何维国译. 爱因斯坦晚年文集 [M]. 海口: 海南出版社, 2000. 41~47

- [50] Einstein A. 关于相对性原理和由此得出的结论 [A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集·第2卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 150~209
- [51] Einstein A. 关于迈克耳孙及其他问题的谈话 [A]. 许良英, 范岱年编译. 爱因斯坦文集·第1卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1976. 561~565
- [52] Einstein A. 关于迈克耳孙实验对探索相对论的影响问题 [A]. 许良英, 范岱年编译. 爱因斯坦文集·第1卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1976. 566~567
- [53] Silberstein L. The theory of relativity [M]. London: Macmillan, 1914
- [54] Einstein A. 以太和相对论 [A]. 许良英, 范岱年编译. 爱因斯坦文集·第1卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1976. 120~129
- [55] 黄志洵. 四维电磁位与电磁场的量子化 [J]. 北京广播学院学报 (自然科学版), 2001, 8 (2): 1~8
- [56] 李政道. 李政道文录 [M]. 杭州: 浙江文艺出版社, 1999
- [57] 张 操. 修正的相对论和引力理论 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000
- [58] 张 操. 超光速运动和狭义相对论的局限性 [J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10 (4): 1~5
- [59] Smoot G F, et al. Detection of anisotropy in cosmic black-body radiation [J]. Phys Rev Lett, 1977, 39: 889~891
- [60] Dirac P. Symmetries in science [M]. New York: Princeton Press, 1980, 1~11
- [61] Particle data group. Review of particle physics [J]. Euro Phys J, 2000, c15: 350
- [62] Chodos A, et al. The neutrino as tachyon [J]. Phys Lett, 1985, B150: 431~433
- [63] Chang T. Does a free tachyon exist [A]. Proc of A. Eddington Centenary Symp [C]. 1986, 3: 431~433
- [64] Ni Guangjiong. Let the new experiments tell the quantum theory [J]. 光子学报, 2000, 29 (3): 282~288
- [65] Ai Xiaobai. Unified understanding of neutrino oscillation and negative mass-square of neutrino [J]. Nucl Sci and Tech, 2001, (4): 276~283
- [66] Ni Guangjiong, Chang T. Two parameters describing a superluminal neutrino [J]. Shanxi Normal Univ, 2002, 30 (3): 32~39
- [67] 倪光炯, 陈苏卿. 高等量子力学 (第二版) [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2004
- [68] 黄志洵. 中微子研究新进展 [J]. 中国工程科学, 2002, 4 (10): 90~93
- [69] Manahan J. Ask the expert-what is known about tachyons [J]. Scientific American, 2003, (11): 1~2
- [70] Kellerman K I. 更清楚地观察宇宙 [J]. 科学年鉴 (1978). 北京: 科学出版社, 1979
- [71] 陈 冰. 以超光速掠过群星 [J]. 知识就是力量, 2003, (12): 20~21
- [72] 曹盛林. 狭义相对论与超光速运动 [J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10 (4): 33~41
- [73] 白同云. 洛仑兹变换与超光速变换 [J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10 (4): 42~45
- [74] 杨新铁. 超光速现象理论基础探讨 [J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10 (4): 27~32
- [75] Einstein A. 对统一场论以及对薛定谔和海森伯——狄拉克工作的评价 [A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集·第1卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 218
- [76] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete [J]. Phys Rev, 1935, 47: 777~780
- [77] Einstein A. 关于迈克尔孙实验相对论起源等问题的谈话 [A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集·第1卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 489~494
- [78] 黄志洵. 从 EPR 思维、Bell 不等式到量子信息学 [J]. 北京广播学院学报 (自然科学版), 2001, 8 (4): 1~11
- [79] 黄志洵. EPR 思维研究中的若干问题 [J]. 北京广播学院学报 (自然科学版). 增刊, 2004, 11: 27~38
- [80] 曾谨言. 量子力学导论 (第2版) [M]. 北京: 北京大学出版社, 1998
- [81] Levine I N. 量子化学 [M]. 宁世光, 余敬曾, 刘尚长译. 北京: 人民教育出版社, 1981
- [82] 黄志洵. 波粒二象性理论的若干问题 [J]. 中国工程科学, 2002, 4 (1): 54~63
- [83] 黄志洵. 超光速研究的量子力学基础 [J]. 中国工程科学, 2004, 6 (4): 15~25
- [84] 顾本源. 量子力学中电子隧穿势垒的时间 [J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10 (4): 64~68
- [85] 耿天明. 量子纠缠的理论与实践 [J]. 北京广播学院学报 (自然科学版). 增刊, 2004, 11: 40~50
- [86] Pierce J R. 漫谈波 [M]. 黄高年, 李 焯译. 北京: 国防工业出版社, 1983
- [87] 刘 辽. 试论王力军实验的意义 [J]. 现代物理知识, 2002, 14 (1): 27~29
- [88] Jamieson V . Speed freaks [J]. New Scientist, 2003, 44 (10): 42~45
- [89] Fok V A . 关于爱因斯坦的“自述” [A]. 赵中立, 许良英编. 纪念爱因斯坦文集 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1979
- [90] Newton I. 自然哲学之数学原理 [M]. 王克迪译. 西安: 陕西人民出版社, 2001

- [91] Einstein A. 广义相对论的基础 [A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集·第1卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 278~334
- [92] Einstein A. 论引力波 [A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集·第1卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 367~383
- [93] Fok V. 空间、时间和引力的理论 [M]. 周培源, 朱家珍, 蔡树棠等译. 北京: 科学出版社, 1965
- [94] Flandern T. The speed of gravity: what the experiments say [J]. *Meta Research Bulletin*, 1997, 6 (4): 1~10
- [95] Flandern T. The speed of gravity: what the experiments say [J]. *Phys Lett*, 1998, A250: 1~11
- [96] 王丹红. 引力实验引发争议 [N]. *科学时报*, 2003-01-24
- [97] 翟向华, 李新洲. 引力: 1687—2001 [J]. *科学*, 2002, 54 (2): 8~12
- [98] 杨本洛. 自然哲学基础分析——相对论的哲学和数学反思 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2001
- [99] 季灏. 挑战宇宙论和相对论 [M]. 香港: 华夏文化出版公司, 2002
- [100] Thorne K S. 黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵 [M]. 李泳译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1994
- [101] Rosser W G V. 相对论导论 [M]. 岳曾元, 关德相译. 北京: 科学出版社, 1980
- [102] 秦元勋. 等速条件下的空时对称理论 [J]. *物理*, 1975, 4 (1): 57~62
- [103] 耿天明. 超光速运动的可能性 [J]. *首都师范大学学报 (自然科学版)*, 2002, 5 (1): 33~38
- [104] 毛磊. 美发射卫星用于验证广义相对论 [N]. *科学时报*, 2004-4-22
- [105] 王冲寒, 钟立. 汕头大学老教授发明“中国公式”叫板爱因斯坦 [N]. *广州日报*, 2004-6-22
- [106] Zhang J H, Chen X. Is space-time curved? [A]. 相对论和物理创新国际会议论文集 [C]. 2003. 26~38
- [107] Thorne K S. *Black holes and time warps* [M]. New York: Norton & Co, 1994
- [108] D'Aguanno G, Centini M, Scalora M, et. al. Group velocity, energy velocity, and superluminal propagation in finite photonic band-gap structures [J]. *Phys Rev E*, 2001, 63: 036610, 1~5
- [109] Einstein A. 70岁生日时的心情 [A]. 许良英, 范岱年编译. 爱因斯坦文集·第1卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1976. 485
- [110] Einstein A. 50年思考还不能回答光量子是什么 [A]. 范岱年, 赵中立, 许良英编译. 爱因斯坦文集·第2卷 [M]. 北京: 商务印书馆, 1979. 485~486
- [111] Reich E S. If the speed of light can change [J]. *New Scientist*, 2004, (3 July): 6~7
- [112] 关于超光速与宇航科学前沿问题座谈会 [J]. *中国工程科学*, 2004, 6 (3): 封3

Forty Years of the Faster-than-Light Research—Review and Prospects

Huang Zhixun

(Beijing Broadcasting Institute, Beijing 100024, China)

[Abstract] Work on faster-than-light (superluminal) research has been going on in USA, Europe and PRC since the early work of O. M. Bilanuik and E. C. Sudarshan in 1962 and that of a good working with G. Feinberg at Columbia University in 1967.

According to the original article of A. Einstein in 1905, velocities greater than that of light have no possibility of existence. However, an interesting phenomenon related to the Einstein's article in 1907 have been found, in which the possibility of sending signals in superluminal communication was not completely negated. In this paper, the author tries to bring about split-up to the different subjects of velocity's study, and then, suggests the definition of General Information Velocity (GIV) to make better discussion of those velocity concepts. After rethinking superluminal research in 1962—2003, the author obtains the conclusion that the "faster than the speed of light in vacuum" is a realizable scientific statement.

[Key words] relativity; quantum mechanics; superluminal (faster-than-light); tachyons; negative velocity; information velocity