

量子远程通讯与超光速问题

艾 小 白

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘 要

论述量子远程通讯的最新成就很可能意味着自然界存在超光速的信息联系, 狭义相对论又面临新的考验; 若考虑虚数“ i ”的作用, 狭义相对论可与物质的超光速运动相容, 而且不违反因果律; 即使自然界存在超光速的物质运动也不可能动摇狭义相对论; 建议设计实验测量德布罗意波的相速度并深入研究波粒二象性。

关键词 狭义相对论 — 超光速 — 量子远程通讯 — 德布罗意波 — 波粒二象性

分类号 P142.9

1 概 况

狭义相对论 (SR) 诞生以来, 粒子物理、原子核物理、加速器物理及一些特别设计的实验都证明了它的正确性, 成绩是伟大的。不过目前 SR 又面临新的考验: (1) 2.7K 宇宙背景辐射是否意味着存在绝对坐标系? (2) 精细结构常数 ($\alpha = e_0^2/c\hbar$) 的数值不恒等于它在质心系中的取值 $1/137$, 在高动量转移下会增大到 $1/128$, 是否与 SR 曾证明的“电子电荷 e_0 是相对论不变量”的论断矛盾? (3) 量子力学的最新成就很可能意味着自然界存在超光速的信息联系, 是最严峻的考验。

前不久, 我国留美学生王力军参加的实验显示出超光速的现象^[1], 我国留奥学生潘建伟参加的工作中^[2]实现了 Bennett 等人提出的利用纠缠态远程传送一个量子态信息 (quantum teleportation) 的方案^[3,4]。量子远程通信具有: (1) 传送是瞬时的; (2) 传送是无法阻断的; (3) 无需预知传送的目的地在何处等特点^[5]。最近关于量子态的远程传送研究又取得新进展^[6~8]。1998 年 Tittel^[9]实现了 Franson 的构想^[10], 证实双光子的纠缠态关联可以维持到 10km 的距离。从量子力学新进展人们必然会提出如下问题: (1) 如乙地不测量, 甲地的量子态信息是否已传到乙地? (2) 甲地如不通过经典通道将实测结果告知乙地, 乙地是否就无法检测出已传递来的量子态信息? 目前无办法还是永远无办法? (3) 量子力学中的非定域长程关联到底是不是瞬时作用的? 量子态信息从甲地传到

乙地到底是不是瞬时的？如不是，传递的速度有多快？是否是超光速的？(4) 如果量子力学中的非定域长程关联是超光速的现象，这种超空间性质的信息联系(传送)对狭义相对论是否是一种挑战？(5) 量子力学中非定域长程关联这种超空间关联的物理本质是什么？

在 SR 诞生之前，Sommerfeld^[11] 就关注过物质超光速运动的问题。但是爱因斯坦在“论动体的电动力学”中指出：“超光速的速度……没有存在的可能”，因为因子 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ “不应当”取虚数。20 世纪六七十年代对超光速问题的研究曾经红火了一阵子^[12~23]。80 年代后，这方面的研究逐渐冷落下来。原因有两点：(1) 理论上遇到难以克服的困难，如超光速理论是否与狭义相对论相容？快子存在是否违反因果律？快子的量子场论是否对洛伦兹变换协变都是未取得共识的问题；(2) 实验上没有找到确凿的超光速快子或其他超光速现象存在的例证。90 年代后，人们对超光速问题的研究是围绕光脉冲的超光速现象展开的^[24~29]。王力军等人的实验就是文献^[24~29]中的研究的继承与发展。要注意的一点是现在讨论的问题和天体物理学中的视超光速现象不是一回事。

在 SR 中讨论闵可夫斯基时空时就讨论过超光速运动的问题。我们知道四维时空间隔 $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$ 对洛伦兹变换保持不变性。即对一个运动客体而言，不可能通过洛伦兹变换(加速或减速)将其从以下的一种空间变换到另一种空间：类空空间： $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 > 0$ ；类时空间： $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 < 0$ ；光锥： $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$ 。仅从这一特点出发，人们就可以很自然地得到如下几个推论：

(1) 对洛伦兹变换而言，一个粒子将保持其出生时的性质。例如对一产出是 $v > c$ 的快子，不可能通过洛伦兹变换(不可能通过减速运动)使其变到光速或亚光速运动。余类推。换句话说，一个单独的粒子(不涉及正反粒子湮灭和与其它种类的与物质的相互作用)的类型不可以改变；快子区、慢子区、光子区之间不可以过渡。

(2) 由于(1)，即由光子在真空中的 $v = c$ 性质不能改变得到：自然界不存在光速惯性系；由快子的 $v > c$ 性质不能改变得到：自然界不存在超光速的惯性系。因此，惯性系之间的相对运动速度不可能达到或超过光速，人们只能在亚光速惯性系中来讨论光速或超光速运动问题。

(3) 相对论力学中联系物体的能量 E 、动量 p 和静止质量 m_0 的公式为： $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$ ，对慢子， $m_0 > 0$ ；对光子， $m_0 = 0$ 。对快子，四动量是类空矢量，只能取 $m_0^2 < 0$ 即 m_0 为纯虚数，不过能量 E 、动量 p 仍具有可测量的实数值^[12,13]。

(4) 引进 $i = \sqrt{-1}$ ，用 γ 替代因子 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 而不问 γ 取实数值还是虚数值，SR 中的原有公式无任何变化；对超光速运动，速度合成定理仍然成立，如超光速速度和亚光速惯性系的速度合成后，超光速运动仍为超光速运动。

总之，引进虚数 $i = \sqrt{-1}$ ，狭义相对论可以推广来讨论物质的超光速运动，并不产生新的矛盾。在这个意义上我们可以认为爱因斯坦在他的“论动体的电动力学”一文中否认超光速运动存在的观点是一个历史性的误会。

存在超光速运动是否违反因果律？通常应用洛伦兹变换是认为：当 $(t'_2 - t'_1) < v(x'_2 - x'_1)/c^2$ ，即 $(x'_2 - x'_1)/(t'_2 - t'_1) > c^2/v$ 时会违反因果律^[30]。可见，即使根据爱因斯坦的意见，也只有 $(c^2/v, \infty)$ 范围内，才会出现因果律破坏的问题。这一点在论述因果律

关系的狭义相对论的教科书中都忽视了。以地球的轨道运动为例, 它的公转轨道速度为 $v = 30\text{km/s}$, 则 $c^2/v = 10000c$ 。如果我们在太阳上观测到小于 10000 倍光速的超光速现象, 则不会出现因果律破坏的问题。在实验室中 v 是实验者与实验仪器(研究对象)之间的相对速度, 其值更小, c^2/v 则更大。依理类推, 可知在相当宽的范围 $[c, c^2/v]$ 内, 不会出现因果律破坏的问题。“自然界存在超光速的物质运动时因果律会因之破坏”的说法实际上也只是—个历史性误会。

量子远程通信所具有的“非定域长程关联”及“超空间的性质”可能是由德布罗意波来完成的。量子力学中的波粒二象性来自法国德布罗意于 1924 年提出的德布罗意波。1927 年 Davisson 和 Germer 用电子对镍单晶体的散射实验证实了德布罗意公式所预言的波长, 1928 年 Thomson 用快电子束射过金属薄膜的实验也证实了德布罗意波的存在。以后还有 Rupp、Kikuchi 等人通过实验证实德布罗意波的存在。不过, 关于德布罗意波的实验证实其实才完成了一半, 德布罗意本人认为: (1) 波粒二象性对微观客体始终同时存在; (2) 直接与粒子相关的“相”才有意义。而玻尔等人的解释则不同。后来由于薛定格、海森堡、波恩、狄拉克等人的努力, 建立了比较完整而成功的量子力学理论体系, 人们就将德布罗意本人的意见遗忘了。1960 年德布罗意为此还写了一本书^[31], 提出了“双重解理论”。他认为“德布罗意波的相速度大于光速, 但如此波不传递信息, 则不违反因果关系”。真可惜! 德布罗意虽然天才地迈出了波粒二象性这一步, 却在德布罗意波的相速度超光速这点上不知所措了。其实在物理学中, 声波、水波、地震波、电磁波等波动现象中无一不用相速度来传递(状态)信息。德布罗意波的相速度 $u = c^2/v$ 是超光速的, 并且反比于物质粒子运动的速度 v , 应当可以用实验来检验。至此, 我们知道 SR 中可能遇到的超光速物质运动问题共有 3 类:

(1) 快子 $v > c$ (传递能量), 其德布罗意波的相速度 $u = c^2/v < c$ (传递信息);

(2) 光子(包括微波)的超光速问题(传递能量), 其德布罗意波的相速度仍为光速(传递信息);

(3) 慢子 $v < c$ (传递能量), 其德布罗意波的相速度 $u = c^2/v > c$ (传递信息)。

对快子, 人们曾用 (a) 带电快子的 Čerenkov 辐射; (b) 快子与物质的相互作用来测量。其实最简单而直接的办法就是测它的总能量 E 和动量 p , 由其相速度 $u = E/p = c^2/v$ 的大小来判别。如果其 $E/p < c$, 那就是快子存在的证据。

对光脉冲(包括微波)的超光速问题应继续研究。我建议: 特别要研究带上信息的光脉冲, 如文献 [23] 中所提到的带音乐曲调的光脉冲, 在通过具有很大负群速度折射率的反常色散区后看看能否保留原来的载波音乐曲调信息? 要进一步了解负群速度的物理意义, 要设计正、反两类例证的实验来检验王力军等人实验中所观察到的超光速现象是否确实由光脉冲中的不同频率成分在反常色散区直接相干而成的初步论断。

量子力学的最新实验中应用双光子、三光子的纠缠态来远程传输量子态(包括纠缠态)信息。如能设计实验测量“EPR 光子纠缠对”之间的非定域长程关联或超空间的信息联系的速度, 那么测得的速度很可能就是光速, 因为光子的德布罗意波的相速度就是光速。而对慢子的德布罗意波的相速度开展研究, 才可能获得超光速的结果。我的初步研究结果表明, 克莱因-高登方程是变形的德布罗意波的波动方程; 慢子的德布罗意波

的相速度之所以大于光速，是由于公式中存在光速 c 以及慢子具有静止质量所造成的。换句话说，与粒子的质量起源和真空的性质有关。德布罗意波可能在某种真空态中才能传输，它在我们的正能世界中只能表现出传输后的效果——“超空间”的非定域长程关联。测量出此种信息联系的速度有多大，看看它是不是超光速的；如果是超光速的，再测量该速度是否反比于物质粒子运动的速度……等，此类实验无论得到肯定或否定的结论都会具有极大的物理意义。

受“狭义相对论不允许存在超光速物质运动”的观点的影响，70多年来，人们一直没有正视德布罗意波的相速度问题，当然，对德布罗意波的性质还不甚明了，连选用什么探测器来接收德布罗意波都成问题，还谈什么测量？现在人们可以利用量子力学中的“EPR对”纠缠态作为工具来构思实验方案了。总而言之，德布罗意波之谜是量子力学研究中一块尚未完全开垦的处女地，人们可以大有作为。

结论：即使证实了自然界存在超光速现象，也不可能动摇SR和因果律；考虑虚数“ i ”的作用，SR并不否认超光速运动，传统的认识：“SR只能处理定域性问题”是一大误会。科学的发展是不可逆的，它不可能消灭已经科学建立的并经实践所检验的相对真理，而是要将这些相对真理包含在更广泛的概念之中、更广大的理论框架之内。

参 考 文 献

- 1 Wang L J et al. Nature, 2000, 406: 277
- 2 Bouwmeester D, Pan J W et al. Nature, 1997, 390(6660): 575
- 3 Pan J W, Bouwmeester D et al. Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 3891
- 4 Bennett C et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 70: 1895
- 5 张永德. 量子力学新进展 (第一辑), 北京: 北京大学出版社, 2000: 286
- 6 Boschi D et al. Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 1121
- 7 Bouwmeester D, Pan J W et al. Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 1345
- 8 Pan J W et al. Nature, 2000, 403: 515
- 9 Tittel W et al. Phys. Rev., 1998, A 57: 3229
- 10 Franson D. Phys. Rev. Lett., 1989, 62: 2205
- 11 Sommerfeld A K. Akad. Wet. Amsterdam, Proc., 1904, 8: 346
- 12 Bilaniuk O, Deshpande V, Sudarshan E. Am. J. Phys., 1962, 30: 718
- 13 Feinberg G. Phys. Rev., 1967, 159: 1089
- 14 Sudarshan E. Nature, 1969, 223: 386
- 15 Clay R, Crough P. Nature, 1974, 248: 28
- 16 Cohen M et al. Nature, 1977, 268: 405
- 17 蒋春暄. 物理, 1975, 4: 119
- 18 李启恩. 暨南大学学报 (自然科学版), 1980, 2: 43
- 19 葛旭初. 淮北煤师院学报 (自然科学版), 1982, 2: 27
- 20 Cao S L. Astrophys. Space Sci., 1991, 190: 303
- 21 谭署生. 标准时空论 (物理时空新探), 长沙: 湖南出版社, 1992: 2
- 22 黄政新. 爱因斯坦学术思想与EPR问题, 北京: 今日中国出版社, 1997: 97
- 23 黄志洵. 超光速研究, 北京: 科学出版社, 1999: 79
- 24 Picholle E et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 66: 1454
- 25 Fisher D, Tajima T. Phys. Rev. Lett., 1993, 71: 4338
- 26 Chiao R. Phys. Rev., 1993, A48: R34

- 27 Steinberg A, Chiao R. *Phys. Rev.*, 1994, A49: 2071
- 28 Akulshin A, Barreiro S, Lezama A. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83: 4277
- 29 Mugnai D, Ranfani A, Ruggeri R. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84: 4830
- 30 胡宁. 电动力学, 北京: 人民教育出版社, 1963: 247
- 31 de Broglie L. *Non-linear Wave Mechanics (A Causal Interpretation)*, Elsevier Publishing Co., 1960, 谢毓章译, 上海: 上海科技出版社, 1966

On the Quantum Teleportation and Superluminal Problem

Ai Xiaobai

(*Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

Abstract

It is pointed out that the new progresses in quantum teleportation might imply that there exist information carriers with superluminal velocities; Considering imaginary number “ i ” one may find that special relativity is compatible with superluminal phenomena if they really exist in nature and causality would still remain. The author suggests that it is necessary to design experiments to measure the phase velocity of de Broglie wave and to make a thorough study on the wave-particle duality.

Key words special relativity—superluminal velocity—quantum teleportation—de Broglie wave—wave-particle duality