

引用格式:黄志洵.论电磁学中的负波速和超前波[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2023,30(06):64-76.
文章编号:1673-4793(2023)06-0064-13

论电磁学中的负波速和超前波

黄志洵

(中国传媒大学通信与信息工程学院,北京 100024)

摘要:波动是物质运动的特殊形式,波动力学具有独特的内容、方法和意义,其概念和内涵都和经典力学有重大区别。例如,波速度(无论相速或群速)都是标量,“负波速”并不表示运动方向反了过来,而是一种从表面上看与因果性不相符的特殊现象。无论如何,最近几十年的研究已证明,负波速不仅在理论上可行,在实验中也多次证明其存在。而且,负波速是超光速的一种特殊形态。……本文指出,具有负波速的波动是超前波。它对应电磁场与电磁波基本方程的超前解;过去的做法是抛弃超前解,这是不合适的!关于超前波,虽然早就有这一概念,但从未有人明确指出这个波是真实存在的。本文认为已有的许多负群速实验正是超前波存在的证明。有人用“违反因果律”作为理由,说超前波不可能存在。但是,中国科学家已经对因果性作了更深刻、更全面的解释,这对波动力学和量子光学都是重要的贡献。众所周知,在量子力学中经典的因果律已丧失其合理性和至高无上的地位。2022年的Nobel物理学奖被授予 Alain Aspect 等3人是很不平常的,因为 Aspect 的关于 Bell 不等式的实验完成于 1982 年,今天来看它仍然是一个证明 Einstein 的 EPR 论文错了、而量子力学正确的关键性实验。2022 年对 Aspect 的授奖表明,主流物理学界已不得不承认量子纠缠确实存在,而狭义相对论中的“光速极限论”是一种错误的理论。本文深刻地阐明了负波速与超光速的关系。2013 年本文作者提出“电磁波负性运动”这一概念,指出它不仅包含三方面的内容——负波速、负折射、负 GH 位移;甚至扩展到负物理参数($\epsilon < 0$ 、 $\mu < 0$)的研究。这是过去的电磁理论中前所未有的概括和总结,对未来的科学发展有重要意义。本文指出,电磁波负性运动是自然界固有的一种反映对称性的物理现象。另外,对天线的近区场,文章作了深刻分析和阐述,指出天线近场区就有负速度和超前波现象,这应引起重视。本文创造性地把消失场理论和消失波理论引入到天线近场的分析中,这在过去无人做过。此外,论文对 Einstein 的负速度理论作了批评;对 Sommerfeld-Brillouin 的经典波速理论作批判性的继承,指出其不足之处。最后,本文对时间旅行有新的见解,指出其在经典理论中的不可实现性,以及在量子理论中的价值和意义。

关键词:负波速;超前波;超光速;近区场;因果性;时间旅行

中图分类号: O441 **文献标识码:** A

Negative velocity and advanced waves in electromagnetism

HUANG Zhixun

(School of Information and Communication Engineering, Communication University of China,
Beijing 100024, China)

Abstract: Wave is a special form of material motion, wave mechanics has unique content, methods and meanings, and its concept and connotation are significantly different from classical mechanics. For example, wave velocity (whether phase velocity or group velocity) is scalar, "negative wave velocity" does not mean that the direction of motion is reversed, but a special phenomenon that is not consistent with causality from the surface. In any case, research in recent decades has shown that negative wave

velocity is not only theoretically possible, it has also been repeatedly demonstrated experimentally. Moreover, negative wave velocity is a special form of faster-than-light speed. In this paper it is pointed out that a wave with a negative wave speed is advanced wave. It corresponds to the advanced solution of the electromagnetic field and the basic equation of electromagnetic wave. The past practice is to abandon the advanced solution, which is not appropriate! As for the advanced wave, although the concept has long existed, it has never been clearly shown that the wave is real. In this paper, many experiments with negative group velocity (NGV) have been done to prove the existence of advanced waves.

Some people use "violation of the law of causality" as a reason to say that the existence of advanced waves is impossible. However Chinese scientists have made a deeper and more comprehensive explanation of causality, which is an important contribution to both wave mechanics and quantum optics. As we all know, the classical law of causality has lost its rationality and supremacy in quantum mechanics. It is unusual for the Nobel Prize in Physics in 2022 to be awarded to Alain Aspect and two others, Because Aspect's experiment on the Bell inequality, completed in 1982, is still a key experiment that proved Einstein's EPR paper wrong and quantum mechanics correct. The 2022 award to Aspect shows that mainstream physics has been forced to accept that quantum entanglement does exist and that the "speed of light limit" theory of special relativity is a false theory. In this paper the relationship between negative wave velocity and faster-than-light speed is profoundly elucidated.

In 2013, the author of this paper put forward the concept of "negative characteristic motion of electromagnetic wave", pointing out that it contains not only three aspects—negative wave velocity, negative refraction, negative GH displacement; it even extends to the study of negative physical parameters($\epsilon < 0$, $\mu < 0$). This is an unprecedented generalization and summary in the electromagnetic theory of the past, and has important significance for future scientific development. In this paper it is pointed out that the negative characteristic motion of electromagnetic wave is an inherent physical phenomenon reflecting symmetry in nature.

In addition, the near field of antenna is deeply analyzed and expounded. It is pointed out that there are negative velocity and advanced wave phenomena in the near field of antenna, which should be paid more attention to it. In this paper, evanescent field theory and evanescent wave theory are creatively introduced into the analysis of antenna near field, which has not been done in the past. In addition, in the paper Einstein's negative velocity theory is criticized; Sommerfeld-Brillouin's classical wave velocity theory is critically inherited and its shortcomings is pointed out. Finally, in this paper a new insight into time travel is given, its unrealizability in classical theory and its value and significance in quantum theory being pointed out.

Keywords: negative wave velocity; advanced waves; faster-than-light (superluminal); field of near-region; causality; time travel

(接上期)

9 对因果性的新认识

因果性一词的英文是 causality, 因果律一词的英文是 causal law。相对论者喜欢用因果律一词, 暗示其为绝对不能违反的定律。然而物理学中并没有这样的

定律, 因果性与对称性一样只是一种信念(Conviction)。它的含意为: ①任何事物均有发生的原因(Cause); ②任何原因都会造成某种结果(Effect); ③原因必定先于结果。利用人们的日常经验的易接受性, 一些人把它引入自然科学研究之中, 并将其置于神圣的位置和高度。

与此相联系的是确定性,英文为 *definity* 或 *certainty*。这也是一种信念,认为大自然在本质上是可预测的,一切事件都由一个在先的原因所决定,并遵循一定规律。问题仅仅在于找到那个规律及掌握初始状态,则由现在可以精确地推出未来。1814年 P. Laplace 说:“世界的未来可以由其过去决定;只要掌握世界在任一给定时刻的状态(用数学表示),就能预测未来”。这是确定论因果性的典型观点。到了20世纪,持这种观点的典型人物首推 Einstein。1920年1月20日 Einstein 致信 M. Born 说:“关于因果性问题使我很伤脑筋;光的量子吸收和发射是否有朝一日可在完全因果性的意义下去理解,还是要留下统计性尾巴……要放弃完全的因果性,我将非常难受。”1924年4月29日, Einstein 在致 M. Born 的信中写道:“在有比迄今更有力的反对严格因果性证据之前,我不会放弃……我不能容忍下述想法:受光照射的一个电子会由其自由意志来选择跳开时间和方向……不错,我要给量子以明确形式的尝试一再失败了,但我不想长久放弃希望。”1924年在致 M. Born 的信中 Einstein 又说:“量子力学理论有很大贡献,但并不使我们更接近上帝的奥秘。无论如何,我相信他不是掷骰子。”……他的话传播很广,但并不正确;“上帝”(自然界)不仅掷骰子,而且常常掷在人们意想不到的地方。

1927年3月, W. Heisenberg 提出了量子力学中著名的测不准关系式,它告诉人们,微观粒子的运行总有无法消除的不确定性,亦即在微观世界中事件的发生常常是没有原因的。实际上,正是量子理论对确定论提出了最大的挑战。从1927年10月开始, Einstein 表明了对测不准关系式的否定态度,并设计一些“思维实验”以证明该关系式的原理可以被超越。这个过程至少持续了10年,其中包括著名的 EPR 论文。总之,测不准关系式直接导致了不可预测性。量子世界挣脱了因果链的严密束缚。英国物理学家 P. Davies 说:“根据量子理论,没有因的情况下也可能有果”。中国著名量子力学家张永德^[43]说,量子理论反对 Einstein 的客观实在论,因为它对事物的看法是简单、机械论的,背离态叠加原理和波粒二象性。此外,为 QM 所不容的是 Lorentz 变换不变性的理论基础——相对论性局域因果性。故也可认为量子理论与相对论的局域因果性不相容。

在 QM 提出前的科学发展其实已通过随机性、几

率性、混沌性研究,预示了确定性的终结。19世纪末 J.H. Poincaré 发现,一些微分方程(例如 Hamilton 方程类型)的可解性及解值敏感地依赖于其初始条件——后者的微小变化可以导致解值巨变或无解。这一发现使可预测性不成为规律,在哲学观上与 Laplace 相对立。因此 Poincaré 走向了非确定论,该理论认为系统的状态中任意小的不确定因素可能会逐步变大致使未来不可预测。Poincaré 的一个贡献是对三体问题进行研究,从而在天体轨道的分析中发现了新的概念——混沌(Chaos)。和以前的科学家一样,他解方程组、求定量解没有成功,但在定性研究方面开辟了新天地。他提出假想的 n 维空间——相空间概念,在相空间中每个点都代表系统的一个状态。分析结论是:渐近解有无数周期不同的序列,也有无数非周期序列——后者即混沌,它对初始条件或状态是敏感地依赖的。他喜欢说的一句话是:“预测是不可能的”。

1933年 Nobel 物理奖委员会主席就曾在致词中说:“在微观世界中必须放弃因果关系的要求,物理定律所表示的是事件出现的几率”。笔者认为这讲得再清楚不过了!在微观世界中,如把粒子到达某处当作一个事件,它就可说是无原因。

尽管量子力学显示了量子世界中微观粒子的运行,与确定论因果性相悖。但是,仍有研究人员在发表了不错的超光速论文之后,惴惴不安地问道:“因果性是不是科学家不能违反的底线?”提出这样的问题并不奇怪,因为常见的是用“违反因果性”批评超光速研究。有的相对论书籍夸大因果性的作用,但在讲“光速极限原理”时陷入逻辑矛盾,似乎从因果性出发即可判断“超光速不可能”。这样一来 SR 就不起作用了。

时序(正序 $\Delta t > 0$, 逆序 $\Delta t < 0$)有相对性——只有 $v < c$ 时序才有绝对意义, $v > c$ 时逆序可能有观测意义。另一方面,要把时序相对性与“时间倒流”相区别,而只要用光作为观测信息传递的方法来观测超光速运动,就会出现逆序,这是超光速运动条件下对因果性的新表述,而不是对因果性的破坏。总之,亚光速运动条件下没有时序的相对变化。而且 SR 把 ds^2 当作不变量,实际上只适用于亚光速系统,考虑超光速可能性时 ds^2 并非不变量。一些文献把超光速运动发生时必然存在的时序相对性说成时间倒流,造成认识上的极大混乱。把因果性和 SR 两者同时神圣化的作法,屏蔽了、阻塞了合理的讨论。

笔者认为,用光观测超光速粒子运动必定会产生表面上奇怪的现象。飞机以超声速飞行早已实现,没有人因为声音逆向而大叫“因果性被破坏”,也没有人认为其声音“传到了过去”。关键在于要认清SR理论的局域性特征——其时空以光信号为观察视界,速度极限定为光速。既用光定义时间,又以光作为观测理论的基础;这才会有超光速违反因果性的结论。

对因果性问题的讨论,其实并非必须从量子理论入手来认识问题。从经典物理出发,只要改正一些传统的老旧观点,就可以圆满地分析负速度和超前波。刘辽^[44]的论述即为一例。他承认实验对现有理论构成冲击,认为应该弄清理论的局限并考虑改进的途径。作为一位著名的研究相对论的专家,他的下述表态非常值得注意——他认为WKD实验^[20],其中有出现超光速光脉冲的可能,故对相对论构成冲击。具体讲,负速度的出现竟把一个推迟的(常规的)光脉冲变换成一个超前光脉冲,导致出射脉冲在时间上超前于入射脉冲,这看来违反了常规的时序因果性,即果(Effect)竟在时序上超前于因(Cause)。刘辽认为,不可把时序限制绝对化,而应把因果律表述为“果不可能通过任何方式影响因”。这样,既维护了规律的客观性(人们不可能改变历史),又解释了新的实验。另外,刘辽建议用“超前波”概念解释Wang的实验,与本文的观点一致。

总之,用所谓“因果律”来压制物理学中的新思想,这一作法已不能成立。必须指出,2019年已有论文提出下列观点:量子时间处于一种叠加态,过去、现在、将来融为一体,因果颠倒,区分不出因与果。这与1933年Nobel委员会主席的致词,意思是一样的。

10 对“时间旅行”的讨论

“时间旅行”也叫“时间机器”,一直是人们热衷的话题。在这方面有许多奇谈怪论。提出的问题包含“时间能否倒流”、“人能否回到过去或前往未来”等等。

在这里必须提到著名的“祖父悖论”(Grandfather Paradox)——某人回到过去,找到正在谈恋爱但尚未婚的祖父,并杀死了他;那么该人就不会出生。既然他不存在,又如何能“回到过去杀死祖父”呢?!这个悖论通常用来证明人不可能回到过去。……所谓时间旅行者(Time Traveller)如想前往未来也是有悖论

的——某人预知在未来自己会发生车祸,遂提前采取措施(如届时待在家中)以资避免,故车祸没有发生。但既然什么事都没有发生,该人又如何肯定“某日自己会出车祸”呢?!……上述这些观点实际上排除了“时间旅行”的可实现性。

那么,相对论者怎么看?有两种说法:一是“正是相对论造成了时间旅行的可能性”;另一个是“既然相对论认为不可能有超光速,那么也就不可能有时间旅行”。常见的说法是“超越了光速会导致回到过去”。人们又说“particles that travel faster than light can move backward in time”。总之,有人毫不犹豫地把超光速等同于“时光倒流”,或“对时间作反向运动”,或“人能够回到过去”。而且一般都说“这是相对论的结论”。

细察之下,我们会发现这些说法对应的是1907年Einstein^[2]论文。该文先给出一个信号速度公式,然后给出一个传递时间公式;并论证说:这些公式在一定条件下可能得出为负的结果,亦即出现负的传递时间,以及负的信号速度。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”。他又说:“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 $u > c$ 假设的不可能性看来是足够充分地证实了的”。

因此,所谓“时间倒流”或“move backward in time”,是Einstein论文中负传递时间的对应物。Einstein的结论(超光速不可能)应当导致负传递时间和负信号速度都不可能出现,既如此,人们就应当说“SR认为时间倒流和反时间运动都不可能”,亦即制造“时间机器”不可能。然而人们又喜欢说“Einstein相对论造成了时间旅行的可能性”。

关于时间旅行的文章很多,一般认为向前旅行(前往未来)还有希望,例如气象台的“天气预报”就是对未来的预测;如果人能知道数日后的天气,就像是人可以到达数日后并掌握那时的情况。回到过去则根本不可能。

问题是多个负波速(NPV及NGV)实验证明了负速度存在,这种形态的超光速存在,那么是否可以制成时间机器呢?有文献就说WKD的NGV实验^[20]可看作一种时间机器^[40]。2011年张操教授说,即使证明光速可以超越,也不可能造时间机器以及回到过去。

他的根据是,在采用推广的Galilei变换(GGT)的时间定义时,同时性是绝对的,超光速运动也不会引起时间反演。他指的是一种真实时间(True Time);在这种定义下超光速不破坏因果性,但SR定义的相对时间不再有效。……但他没有认识到的是,负波速实验的成功,似乎又为“时间机器”的说法注入了新动力。

1979年问世的“量子后选择现象”(Quantum Post-Selection Effect),是美国物理学家John Wheeler提出的,也称“延迟选择实验”(Delayed Choice Experiment),意思是说观测者的选择能影响光子的前期行为,亦即将发生的事件与已完成的事件相互作用。近年来已有欧洲人的实验证明后选择可在纳秒级别上影响光子特征,故认为后选择可改变历史(the post selection could change the entire history)。在此基础上,一些物理学家提出可以利用量子纠缠(Quantum Entangle)建立量子时间机器。持此观点的有不少人。

Wheeler的“延迟选择”思想可改造为以下实验:减弱光源辐射使其只发出一个个光子,并且是在前一个光子打在屏幕上之后再发出后一个光子。屏幕先呈现随机性图形,但在光子增多后逐渐显出干涉条纹。对此,如认为将发出的光子与已达次级屏幕的光子发生干涉,即表示尚未发生的事件与已完成的事件相互作用,违反了因果律。故可认为每个光子都和自己干涉,而这只在光子同时通过双缝才能办到。两个光子同时走两条路,在经典物理中是不可能的,说明光子具有奇异的性质。

可以看出,为了研究使用量子原理的时间旅行,应先了解“量子后选择”现象的本质。2010年Lloyd采取的方法是,使用下述量子效应——量子粒子(如光子、电子)并不由时间箭头所限定。例如量子粒子的未来可以影响过去,在J.Wheeler实验中,一个未被观察的光子同时经过双缝。之所以知道一个光子可同时通过双缝,是因为终端屏上有干涉图案出现;如光子只通过单缝,是不会有有的。

欧洲人近年来已用实验证明后选择确实在若干纳秒程度上影响光子特性,故有一种说法是“后选择可改变宇宙的历史”(the post selection process could even change the entire history of the universe);不过笔者觉得这样讲有些夸张。Lloyd-Steinberg建议的方法:他们认为,日常经验告诉我们开始的状态决定着未来。但是量子粒子无法区分时间的前向和反向。

这也意味着确定未来状态可以决定发生在它之前的事情。……在他们之前,C.Bennett和B.Schumacher曾经提出,可以利用量子纠缠(Quantum Entanglement)来建立时间机器。利用两个粒子(如光子)使它们变得非常密切相关,它们共享存在。纠缠粒子是特殊的,因为对其中一个的测量会影响到其他粒子,无论它们相距有多远。现在想象传送一个第三粒子从A到B;诀窍在于创造一对纠缠粒子,并将其中一个放在A,另一个放在B,然后在两个地方进行一系列的测量。如果能做到这一点,就可以确保第二个粒子最终的状态和“太空旅行者”是一样的。

准确地说,旅行者身体并没有移动,只是量子的信息完全描述了旅行者,从而完成这次旅行,这允许第二个粒子B具有旅行者的身份。令人好奇是这种传送发生在一瞬间。在这个过程中,量子信息从A点到B点。因此,很自然地让人想到只通过在A点的测量来完成这次旅行。但是由于隐形传输是瞬间发生的,这仅仅当作一个考虑测量点B引发行程的依据,即使它后来发生了。图6表示处于“现在”的女孩Alice要求处在“未来”的男孩Bob通过量子隐形传态送给她一个消息,图中Alice和Bob具有纠缠光子对(都叫A);以后:①Alice传送一个消息(通过测量纠缠光子而译码为光子X);②Bob测量自身的光子时得到消息;③后选择作用表示,它是在未来的Bob测量,造成Alice的光子具有该性质;④根据后选择作用,这是等效为Bob逆时间发送消息。……这是作用中的后选择,有这样一个特征,即如同量子计算,量子物理学利用所有的时间来做事。正是利用因果间的模糊关系,Steinberg和Lloyd开发了时间旅行模拟器。

把它称作时间旅行是有些夸张。也许是,相同的方式是量子的隐形传输传递的是量子的状态而不是物质材料本身。然而,Lloyd和Steinberg争辩道“后选择隐形传输的逻辑与时光旅行一致,所以我们的实验就是一个时光旅行模拟器。然而,它不能把人带回恐龙时代,它还有很多特别的事情要做。”Lloyd和Steinberg团队首先做的事情是,通过将光子送回来杀死它本身模拟祖父悖论。使用隐形传输来做这个,是一个重要的转折。传统的量子隐形传输保证给你一个打算传输的副本状态。Lloyd和Steinberg想知道这是否会为光子用量子枪杀死自己而工作。

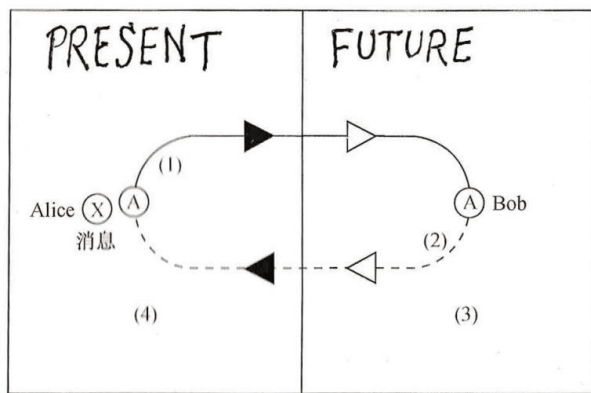


图6 显示量子后选择作用的示意图

从实际的角度看,他们的仿真要求两项额外功能:一是要有一把能够发射子弹的量子枪;二是要有一种方法使传送过程自发停止。这个团队同时还决定,不采取量子传送中常见的追踪两个光子的方式,而是追踪单个光子的两项属性。具体地说,光子的偏振方式代表光子“现有”的状态,而它的运动方向代表它“过去”的状态。在此基础上,他们会给这个光子配上一把量子枪,既可以发射子弹,也可以自发终止量子传送过程。这个设备又称为波片,能够改变光子的偏振方式。这是因为光子的偏振方式和运动方向都是被追踪的,光子也被配发了量子枪,以影响它“过去”的状态。

现在,如何确保在必要时传送过程能够自动停止呢?其实这比前一项工作还简单,因为量子传送过程本身,就有内建的终止机制。除非采用特别的方式进行测量,否则,在整个传送过程中,量子真正处在工作状态的时间只占到25%的比例。所以,在这个实验中,实际有4个可能的结果,取决于传送过程和量子枪所处的状态。

而在这个实验完成之后,会发生一些有趣的事情:在每一个单独的时间节点,如果时间旅行启动,量子枪就无法开启。而一旦时间旅行无法启动,量子枪就会工作。从祖父悖论的角度来看,只要你的枪有一定几率无法发射,并且所谓的暗杀也宣告失败的话,时间旅行就可能启动。Lloyd说:“你可以举枪瞄准,但是无法扣动扳机。”

Lloyd和Steinberg的实验激起了人们对时间旅行的兴趣,尤其是它不依赖于广义相对论的时空扭曲、闭合类时曲线那一套,也不依靠黑洞、虫洞、多世界(多元宇宙)这些东西。新的思维建立在量子后选择

的基础上,并认为时间旅行在理论上可行。

最后我们必须说,无论如何“时间倒流”没有可能性。但是我们不反对继续讨论这个问题。

11 “电磁波负性运动”是自然界的独特现象

用经典力学分析有质有形物体的运动时,速度是矢量,负速度表示反向运动,但对无质无形的波的运动而言,速度可为标量,不能说负速且仅代表流向反了过来。该怎样理解这种现象的含义?对负波速(NWV)而言,例如当脉冲通过特定媒质时具有负群速(NGV),数值为 c/n_g ($n_g < 0$),它不仅比脉冲通过真空时的速度(光速 c)快,而且快到进入媒质前就离开了媒质。由此本文提出了“电磁波负性运动”的概念,并将其与简单的“反向运动”相区别。我们必须接受D'Alembert方程的超前解,理解负速度概念。可以说,自然以她的真实和丰富给我们上了一课,今后她还将继续教导我们。

事物的二元性是世界的本质。在现代物理学中,电磁参数成为负值或电磁波作负性运动均常有发生,物理参数为正或为负的本身是自然界对称性机制之一,对其作研究是探索客观规律的一个新途径。作为波科学研究的一部分,笔者既关注负电磁参数研究的理论与实验,也讨论电磁波的负性运动。

这些规律尚未被物理学界列入“对称性和守恒量”表格,只在“手征对称性”(Chiral Symmetry)的概念中稍有联系。我们认为,物理参数的为正或负,电磁波的正性运动或负性运动,都是自然界的对称性机制之一。笔者提出的“负性运动”一词有深刻的内涵,它与简单化的“改变方向”不同。

前已述及,对电磁场超前解和电磁波超前波作研究的先驱者是J.Wheeler和R.Feynman,但笔者认为他们的工作不够好,有些观点是值得商榷的。因此,我们尝试在“电磁波负性运动”的标题下作更全面的概括和更深刻的阐述。当然,我们并不否认Feynman的贡献。

Feynman注意到,在他之前早有人用“源和吸收者之间的作用”(an interaction between a source and an absorber)来解释电磁辐射。例如H.Tetrode^[45]认为,若太阳系中的太阳是孤独的而没有别的能吸收辐射的物体,它将不再辐射。对于辐射机制而言,吸收者的存在是必不可少的要素。……Feynman的分析以下

述假设为基础:①无电荷空间中,一个被加速电荷不辐射能量;②对一个给定粒子的场作用,仅由别的粒子造成;③这些场用半个推迟解与半个超前解之和来表示。他把所研究的课题称为“作用理论的超前效应”(advanced effects of the theory of action)。在论文的唯一图示中(图题是“一个不完全吸收体系的超前效应的例子”),总图被分成8个小图,配有以下说明:“在源加速前的入射波;这些入射波被吸收;在加速时刻入射波会对源产生作用;源受到作用是由于:碰撞粒子或其他力或入射波;源辐射出波;一些辐射波被吸收;持续向外的波永远离开;向外的波除了符号的变化,看起来像是持续穿越空间的入射波”。……在这里,他所谓的入射波似乎不是外来的波,因为空间只有1个源;它像是返回到源的那个波,即产生反作用的波。

1965年Feynman曾谈到他对时间(过去和未来)的看法:“我们能记忆过去,但不能记忆未来;我们能做些什么以影响未来,但不能做点事情来影响过去。……世界的全部现象看来是朝一个方向演进。但在物理定律里,过去和未来没有任何区别。引力定律、电磁学定律的时间均可逆转。”可见,Wheeler和Feynman在1945年大胆提出一个“半是迟滞波、半是超前波的时间对称理论”,亦即在企图揭示粒子相互作用机制时,为了避免陷入过去、未来的矛盾,必须运用向内运动的波(时间上倒转运动的波),以使理论对称。

Wheeler-Feynman的吸收者理论,与笔者曾详细论述的截止波导理论^[8],有相似之处。可以证明,两个交互作用的电抗性储存场,可以产生一些有功功率,而单独一个场就不行。这种interaction表示,大自然有某种奇妙的特性,正如单独一棵树木的存在,和把它放到有许多树的林中,情况是不同的!……虽然过去的研究并未发现在简单的互感耦合交流电路中^[11],有波的负性运动(或说超前波)的存在,但在截止波导理论中笔者曾发现相位常数为负($\beta < 0$)的现象,这实际上是一种超前波。而且近期的研究表明^[12],天线近区场有类消失态(Evanescent-State Like)的情况,和由此导致的超光速群速甚至负群速(NGV),这就是电磁波“负性运动”了!以上联想给人以一种“恍然醒悟”的感觉。不过,我们不认同“用迟滞波与超前波抵消”这一作法。

近年来,所谓左手材料(Left-Handed Materials,

LHM)飞速发展^[46],有人据此说,发现了内向波(Inward Waves)。但是,波向内传播的现象并非只在LHM条件下存在。对于一个辐射源,矢量电磁场的近场、中场动力学远比简单的理解(向外传播)更为复杂。在源的附近(near field region),可能有波形主体向内行进的现象。N.Budko^[5]曾以实验观测结果展示了这种现象,他认为是负波形速度(Negative Waveform Velocity),相关波形是travel back in time。这些情况与LHM是无关系的。由此上溯到R.Feynman和J.Wheeler的1945年论文,其时连Vessalago^[47]论文都还没有写出,研制LHM更无从谈起。但超前波的思想早已提出了,这是值得深思的。

从1958年到2004年都有人简单地把“反向波”(Backward Waves)归结为“相速与群速的矢量方向相反”,但我们已指出把负速度一律当成“反方向的运动”并不恰当。负群速(NGV)具有生动的物理表现,并非一个简单的“方向判断”所能描述。比方说,把向NGV媒质入射的脉冲与从NGV媒质出来的脉冲相比较,出射脉冲时间上可超前于入射脉冲(入射者尚未到达,出射者即现身)。这种“超前现象”导致了因果性的新解释。如把输出脉冲当作“果”,输入脉冲到达当作“因”,实验证明可以发生“果先于因”。……死抱“因果律”陈旧教条不放,就不能认识新的事物和新的现象。

12 John Bell和Alain Aspect的重大贡献

从1905年到1916年,A.Einstein用11年时间完成了建立相对论的工作,被誉为“20世纪最伟大的天才”。但在2022年笔者的论文^[48]已指出,SR很难说是Einstein独立完成的创造——1900年及1904年H.Poincare^[49]的论文,1904年H.Lorentz^[50]的论文,包含了SR借以立论的思想,Einstein却未在其论文[37]中加以说明。Einstein写文章从来都不提供参考文献表,他是否在1905年之前读过那两位大科学家的文章,只有Einstein自己才知道。当然,我们判断他是读过的。虽然Einstein在成名之后多次提到过Lorentz,但Lorentz的思想和他并不一致——正因为如此近年来才有“Lorentz相对论”(Lorentz's Relativity)的说法。大家都知道Lorentz是一位谦谦君子,他不会(也不用)去和Einstein争“优先权”。至于Poincare,Einstein成名之后也从不提及,仿佛此人并不存在;但其实,

$E=mc^2$ 公式是 Poincare 在 1900 年导出的,甚至 Lorentz 变换(LT)也是由 Poincare 命名的。……在这里我们并不是说 Einstein 搞剽窃,因为他自己的推导常充满混乱不实之词^[38, 51-52],只有未下过功夫的人才会盲目赞颂 Einstein 的伟大。

量子力学(QM)的建立是在 1926 年至 1928 年的 3 年间,它真正是一件集体的制成品,参与创立的人有 E.Schrödinger、W.Heisenberg、P.Dirac、M.Born 以及 N.Bohr 等人。QM 的研究方法与相对论不同——虽然也是建立在严格数学分析的基础上,但其物理概念深刻、清晰,完全不是为了炫耀使用数学的深奥。QM 是科学美的典范!……QM 一经问世,Einstein 立即警觉起来,一再企图驳倒它,让它站不住脚。然而,随后的事态发展完全不受 Einstein 的控制,QM 高歌猛进、一往无前,吸引了无数物理学家,开辟了众多的应用领域。因此,QM 的创立对相对论构成了真正的威胁!

1935 年 Einstein^[53]发表著名的 EPR 论文,集中力量要给 QM 以致命打击。这是相对论与量子力学之间的矛盾达到白热化程度的标志。论文发表在《Physical Review》杂志上,由 Einstein、Podolsky 及 Rosen 三人署名,因此被称为 EPR 论文。1935 年 5 月 4 日,美国《纽约时报》在头版头条刊出新闻说:“Einstein attacks Quantum Theory”,可谓轰动一时。EPR 论文是反对量子力学的,SR 与 QM 这两种世界观、时空观的决战时刻已经到来。

在 EPR 论文中,有一些内容只是铺垫(例如,说物理理论不仅要正确而且要“完备”;又如,说量子力学中波函数所给出的对实在的描述不完备)。根本性的东西是在对“双体系系统”(两个子系统组成的系统)相互作用的分析里面。在这里子系统 I、II 应理解为微观体系,例如粒子。两个子系统在 $t=0$ 以前的态为已知, $t=0$ 到 $t=T$ 期间它们互相作用, $t>T$ 时不再相互作用(例如远离——向不同方向分开)。设 $\Psi(x_1, x_2)$ 为系统的量子态,它可按测量 I 的物理量(如力学量)A 的本征函数系而展开,也可按测量 I 的物理量 B 的本征函数系而展开。根据量子力学,测量时波包会坍塌,测量后 $\Psi(x_1, x_2)$ 将简缩,造成对 I 测量会影响 II 的状态。但 I、II 已分开,这种离奇的超距作用影响是不可能发生的。由于狭义相对论规定自然界的相互作用只能以低于光速而实现,空间分开的体系应是局域性的,但量子力学却给出了非局域性的情况,因

而量子力学是不自洽和不完备的。这些就是 EPR 论文中最重要的东西。

由此可见,有一根无形的丝线把狭义相对论和 EPR 联系在一起;也可以说,EPR 思维正是以狭义相对论作为基础而提出的。其次,我们说狭义相对论与量子力学的世界观有尖锐矛盾,正是表现在“局域性实在论还是非局域性”这样的问题上。EPR 论文是 Einstein 在 56 岁时,最大限度地运用其智慧给量子力学以他所希望的沉重打击。

Einstein 认为,EPR 论文可以驳倒 Heisenberg 的不确定性原理,并证明量子力学不完善。EPR 中的“两个体系”(I 和 II)的讨论中似乎表示“既测知位置又知道速度”是可以办到的,因为 I 的速度即 II 的速度。……文章发表后,N.Bohr 起而反驳。

Bohr 的意思是,EPR 论文中的设定可以被驳回——不确定性既影响 I 又影响 II,在测量 I 时 II 立即受影响从而使结果与 Newton 定律一致;这种作用会即时发生,即使 I、II 相距很远。……但是年轻些的科学家(如 Heisenberg)却不便像 Bohr 那样去和 Einstein 辩论。

俄罗斯的 V.Fok 院士说:“在量子理论发展初期曾为它作了许多工作的 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。”

Fok 认为,QM 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)是量子力学的非力相互作用(影响)的另一种形式。非力的相互作用(影响)的存在不容置疑,否定这种作用是不合适的。

那么怎么判断 EPR 论文的对或错?这在早期是一件困难的事情。一位爱尔兰物理学家 John Bell(后来一直在欧洲核子研究中心(CERN)工作),他对 EPR 论文的对或错,是没有把握的。他甚至想搞一个新理论来响应 EPR,使之更有说服力。既然 EPR 的中心内容,是对双粒子系统的分析和判断,认为量子纠缠(Quantum Entanglement)不能成立,那么就从这里开始。1965 年 J.Bell^[54-55]提出一个与量子力学相容的隐变量模型,认为“任何局域变量理论均不能重现量子力学全部统计性预言”,提出了两粒子分别沿时空不同方向做自旋投影时

一些相关函数之间应满足的不等式:

$$|P(a, b) - P(a, c)| \leq 1 + P(b, c) \quad (33)$$

他还说,只有实验证明此式不成立,才能证明QM正确而相对论(SR)错了。所以,正是J.Bell使SR与QM之间的矛盾和争论有了用实验来作判断的可能。因此,1965年的Bell论文具有里程碑式的意义。

Bell定理是说,一个隐变量理论不能重现QM的全部预言。……但情况究竟如何,必须由实验来确定。突破是由于法国物理学家Alain Aspect^[56-57]的精确实验。他领导完成的实验以高精度证明结果大大违反Bell不等式,而与量子力学的预言极为一致。Bell不等式被精确实验证明不成立,意味着EPR论文错了,而量子力学是正确的。可以说,Bell开启了量子信息学研究的大门!

Bell原来是坚定地支持Einstein、相信物理实在性和局域性的。他认为是某种隐变量造成了量子力学中神秘的超距作用。实际上可以构造一个理论上的不等式(粒子观测结果必定遵循该式),从而证实EPR论文所说的量子力学不完备性。Bell的分析建筑在D.Bohm的自旋相关方案及隐变量理论的基础上。我们现在免去数学分析,仅强调指出: Bell不等式与量子力学不一致!

Bell在1965年提出他的理论时,还是Einstein理论的拥护者。20年后(1985年)他却成了反对者。他向英国广播公司(BBC)作了明确的回答,认为优先的(特惠的)参考系存在,亦即以太存在。又说超光速有存在的可能,而相对论成了量子理论发展的障碍,而Einstein的世界观站不住脚。总之,他主张回到狭义相对论之前,即Lorentz和Poincare。

Bell是把狭义相对论和EPR联系在一起而作评论的,因为这两个理论都关系到我们究竟采取什么样的自然观和宇宙观。EPR以反对量子力学开始,以失败告终。转折点是1982年的Aspect实验;后来40年量子信息学的大发展,进一步宣告了Einstein理论的破产。

从量子纠缠态研究的进展可以看出,量子力学世界观已完全击败了狭义相对论世界观。实验成功的两光子间纠缠的距离,从最早(Aspect)的15m,逐步发展到25km,乃至10年前的144km。2017年6月15日出版的《Science》杂志报道了中国科学家团队用量子卫星做出新成果——实现了千公里级的量子纠缠(从青海省德令哈站到云南省高美古站距离为1203km)。这一成果使

世界震惊。总之,一系列实验完美地证明狭义相对论时空观存在问题,已是不争的事实。

自1965年以来,Bell不等式已经得到广泛验证,成为一种重要手段,用以识别可通过离散测量来描述的纠缠。例如测量一个量子粒子的自旋方向,然后确定这一测量结果是否与另一个粒子的自旋相关。如果一个系统违反了这个不等式,那么纠缠就存在!总之,Bell不等式是否得到遵守,成为一种标志性的查验方法。理论和实验都表明非局域性是量子力学的基本特征——实验结果违背Bell不等式就表明非局域性存在。Bell的姓名进入了科学史,他的不等式被誉为“人类历史上最伟大的科学发现之一”。

与此对立的是相对论(主要指狭义相对论SR)的经典性、宏观性和局域性。这个局域实在论的主要内容是:相信经典的物理实在,相信局域化因果率,反对几率化思维;认为光速是宇宙中的动体速度和信息传播速度的极限;不承认环境中会有纠缠态存在的可能。

2022年10月的第一个星期,传来了令人激动的消息——2022年Nobel物理学奖被授予物理学家Aspect等三人。颁奖机构说,他们因“做光子纠缠实验、确定Bell不等式不成立和开创性的量子信息科学工作”而获奖。路透社的电讯说:“三位科学家都做了量子纠缠实验。在量子纠缠实验中,两个粒子无论相距多远都相互联系在一起。这曾令Einstein感到不安,他称其为幽灵般的超距作用”。

现在,Aspect已是高龄老人。本次授奖的意义,不仅是对量子力学的支持(这点和1933年一样),而且还是对研究和发量子通信、量子计算机、量子雷达的鼓励,具有里程碑式的意义。当然这也是对长期以来否定Aspect实验的那些人的打击,他们总是不甘心于相对论的失败。Bell本来也具备了获奖资格,但他英年早逝(Bell于1990年去世),而Nobel奖只能颁发给在世的人。其实,是否获奖的本身并不重要,关键的是要把正确的时空观、世界观建立起来。

John Bell于1965年提出隐变量理论,给出不等式,本是为了支持相对论而出力;结果竟被Aspect的精确实验所否定(后来又有多个实验支持Aspect)。另外,又考虑到宇宙微波背景辐射的发现带来的影响,Bell终于在1985年宣布了与相对论告别,表现了一位科学家的正直和勇气。J.Bell是20世纪的伟大科学家之一,图7是他在作学术报告时的形象。

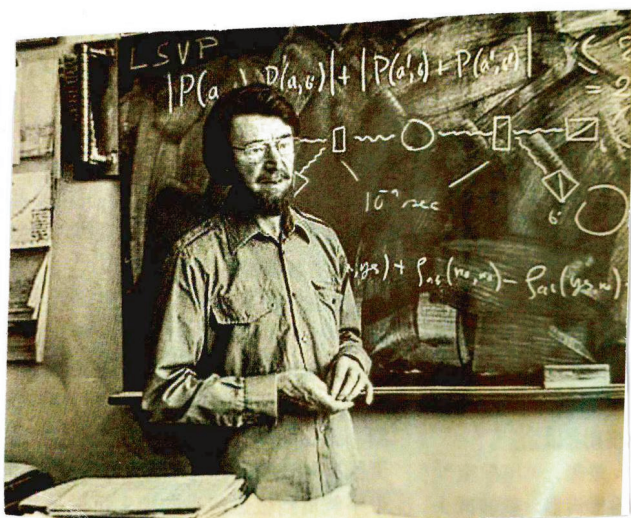


图7 科学思想卓越超群的爱尔兰物理学家John Bell正在作学术报告

(黑板上写出了他那著名的不等式)。

总之,量子纠缠这种被视为超距作用(无限大速度)的物理现象终于被量子信息学的大发展而获得了承认,Nobel委员会才认识到1982年Aspect实验的开创性意义和价值,并决心授予2022年Nobel物理学奖。所以有人说,这次颁奖是对Einstein的“光速极限说”的否定,笔者认为这个观点是正确的。

但是,量子纠缠并不是超距作用。也就是说,纠缠态的传播速度不是无限大,而是有限速度。但这个速度是超光速,2007年Salart^[58]以实验证明 $v=(10^4 \sim 10^7)c$ 。这个速度当然也很大,但决非无限大。至于负波速,在量子纠缠中还没有发现有关现象。

总之,历经40年后,Aspect荣获Nobel奖,是对Einstein的某种批评甚至否定。

13 为什么说“光速极限论是有争议的”

虽然前面的内容已对超光速可能存在作论述,这里我们再深入下去进行讨论。有人抱住“因果律”不放,说承认超光速就会出现悖论。笔者不否认超光速现象容易引起悖论,但这是在SR语境下以光联系和定义时空所造成的。过去有一首英文诗最为典型,该诗说:

“There was a young lady named Bright,
Whose speed was far faster - than - light;
She went out one day in a relative way,
And returned the previous night.”

——by Reginald Buller

尽管这首诗是一种游戏之作,它却与SR一致,即认定超光速运动不可能存在的一个重要理由是:这会造时间倒流。时序相对性与时间倒流有区别。我们都知道时间的进行是单向的、不可逆的;时间倒流不仅不可能,而且造成因果性的根本破坏。那么,超光速会不会造成时间倒流呢?时序相对性意味着,当 $v < c$ 时会有正时序,此时时序是绝对的,故可用时序的恒正条件来作因果性描述。但当 $v > c$ 时, v 和 c 同向传递时观测到的必然是逆时序,而这是用光观测信息传递时必然会出现的结果。这不构成因果性的破坏,而是在超光速条件下对因果关系的新表述。分析表明,当 $v > c$ 出现的 $(t_B - t_A) < 0$ 绝不表示大于 c 的速度不可能出现,而仅仅表示光射线追不上作超光速运动的粒子。

因此,SR实际上是利用只适用于亚光速的Lorentz变换(LT)来讨论超光速运动,必然会遇到矛盾。按照SR,超光速运动时必然发生的时序相对性被说成时间倒流,从而把时序绝对性混同为物理学中的因果性条件。Einstein也忘记了LT有适用范围。总之,驳倒“超光速会引起时间倒流”不是一件难事。

因此我们认为,在不使用复杂数学的条件下,可以轻松驳倒“时间倒流”说,这里可把观点归结如下:时序(正序 $\Delta t > 0$,逆序 $\Delta t < 0$)有相对性——只有 $v < c$,时序才有绝对意义。 $v > c$ 时的逆序可能有观测意义。另外,要把时序相对性与“时间倒流”相区别,而只要用光作为观测信息传递的方法来观测超光速运动,就会出现逆序。

那么在超光速条件下是否会有表面上看来奇怪的现象?可能会有。由于电磁场的本征速度(电磁波波速)就是光速,基于此的思维必定显得有些奇特。假设有一艘飞船以大于光速 c 的速度离开地球,从地面发出的光(或电磁波)信号都不会有回应,因为它追不上飞船。如果地面站用雷达监控,是看不见目标的。如有飞船以超光速($v > c$)向地球飞来,晚发出的信号早收到。总之,用电磁波不能观测超光速运动。既然“看不见”不能成为“不存在”的证据,Einstein所谓的“任何物体和作用均不能超越光速”,就只是一种猜测,而非科学定律。宋健说,地面站无法用电磁波向以接近或超过光速 c 的飞船发出指令,因此未来的航天技术呼唤实验物理学家寻找传播速度大于 c 的信号源。

笔者认为,当飞船以超光速飞临,地面观测者会先收到后发出的光,这确是一种反时序现象。但应认识到时序的相对性;不能以时序代替因果性。总之,飞出太

阳系也好,争取实现超光速宇宙航行也好,都还只是大胆的设计。既然Newton力学和量子力学都不为速度设置上限,只有相对论力学为速度设置上限,我们就必须检查后者的可靠性。

14 结束语

经典电磁理论中的Maxwell方程组是几个1阶双曲型偏微分方程构成的方程组。由此出发,可以导出电磁波方程组,但这是2阶椭圆型偏微分方程构成的方程组。对这两类问题的求解,前者可以用离散化方法,使初值问题成为有效的算法。后者则按边值问题求解。无论用哪套方法,都会发现有两个波解——向无限远运动的发散波和向电磁源运动的会聚波。在今天,我们称前者为迟滞波,称后者为超前波。虽然早在上世纪70年代,中国科学界就在设计天线时考虑过如何对待这两类波的问题,并决定抛弃会聚波(超前波)解,只用发散波(迟滞波)解,今天来看当时的认识和处理是不妥当的,虽然其初衷是为了避免数据出现混乱。

超前波与负速度有联系,这里的负速度主要指负波速(NWV)。讨论宏观物质的负速度较为困难,故本文不作重点。用经典力学分析有质量物体的运动时,速度是矢量,负速度一般都表示反向运动。但对无质量的波的运动而言,速度为标量,不能说负速度仅代表方向反过来。对负波速而言,例如当脉冲通过特定媒质时具有负群速(NGV),数值为 c/n_g ($n_g < 0$),它不仅比脉冲通过真空时的速度(光速 c)快,而且快到进入媒质前就离开了媒质。由此我们提出了“电磁波负性运动”的概念,这是有丰富内涵的。必须接受D'Alembert方程的超前解,才能理解波的负性运动。可以说,自然以她的真实和丰富给我们上了一课。

把向NGV媒质入射的脉冲与从NGV媒质出来的脉冲相比较,出射脉冲时间上可超前于入射脉冲(入射者尚未到达,出射者即现身)。这种“超前现象”导致了对因果性的新解释。它的重点不再是“因先于果”,而在于“果不能影响因,不能反作用于因”。这是在经典物理框架内所作的新认识。其实在量子物理学的领域,因果性本来就可以不成立。

本文指出,近场有两类基本电磁环境——束缚场与消失场;前者包含静态场(按 r^{-3} 规律衰减)和感应场(按 r^{-2} 规律衰减);后者包含消失平面波谱,当离源的距离增大时,场强指数急速地下降。束缚场在本文中称为类消

失场。近年来两者都发现了电磁波在自由空间以超光速传播的现象,实验上还观察到负波速。由最近几年的实验,对束缚场而言,结果并不支持普遍认为的以光速($v=c$)迟滞传播的观点。根据对天线近区内无迟滞现象的观测,提供了束缚电磁场的非局域性的实验证据。非局域性是一个量子力学概念,故束缚场的非局域性可在经典电磁学与量子力学之间建立紧密联系。

本文强调在近场测量中发现的新现象,给出了理论上的多个对偶关系,关于近场超光速现象的量子解释,认为应从理论上应用“消失态是虚光子”的思想。

最后必须说明,本文作者提出的“电磁波负性运动”概念,广义地看主要有3个内容:①负折射现象(NRI);②负波速现象(NWV);③负Goos-Hänchen位移现象(NGHS)。限于篇幅,本文主要论述②;关于①和③,请参阅笔者的著作《波科学与超光速物理》^[59]。另外,2022年笔者的新书《物理学之光——开放的物理思想》^[60]也可以在阅读本文时作为参考。

参考文献(References):

- [1] Born M, Wolf E. Principle of Optics[M]. 7th (expanded) Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [2] Einstein A. The relativity principle and it's conclusion[J]. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, 1907, 4: 411-462.
- [3] Sommerfeld A. Über die fortpflanzung des lichtet in dispergierenden medien[J]. Annalen der Physik, 1914, 349(10): 177-202.
- [4] Brillouin L. Wave Propagation and Group Velocity[M]. New York: Academic Press, 1960.
- [5] Wheeler J A, Feynman R P. Interaction with the absorber as the mechanism of radiation[J]. Reviews of Modern Physics, 1945, 17(2-3): 157-181.
- [6] Budko N V. Observation of locally negative velocity of the electromagnetic field in free space[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(2): 020401-020404.
- [7] 黄志洵. 电磁波负性运动与媒质负电磁参数[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2013, 20(4): 1-15.
- [8] 黄志洵. 截止波导理论导论[M]. 第二版. 北京: 中国计量出版社, 1991.
- [9] Wynne K, Carey J J, Zawadzka J, et al. Tunneling of single-cycle terahertz pulses through waveguides[J]. Optics Communications, 2000, 176(4-6): 429-435.
- [10] Wynne K, Jaroszynski D A. Superluminal terahertz pulses[J]. Optics Letters, 1999, 24(1): 25-27.
- [11] Davies P. About Time: Einstein's Unfinished Revolution[M].

- New York: Simon & Schuster, 1995.
- [12] Garrett C, McCumber D. Propagation of a Gaussian Light Pulse through an anomalous dispersion medium[J]. *Physical Review A*, 1970, 1(2):305-313.
- [13] Chu S, Wong S. Linear pulse propagation in an absorbing medium[J]. *Physical Review Letters*, 1982, 48(11):738-741.
- [14] Hache A, Poirier L. Long-range superluminal pulse propagation in a coaxial photonic crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(3):518-520.
- [15] Munday J N, Robertson W M. Negative group velocity pulse tunneling through a coaxial photonic crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(11):2127-2129.
- [16] Huang Z X, Lu G Z, Guan J. Superluminal and negative group velocity in the electromagnetic wave propagation[J]. *Engineering Science*, 2003, 1(2):35-39.
- [17] 周渭,李智奇.电领域群速超光速的特性实验[J]. *北京石油化工学院学报*, 2009, 17(3):48-53.
- [18] Yao H Y, Chang T H. Experimental and theoretical studies of a broadband superluminality in Fabry-Perot interferometer[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 122:1-13.
- [19] 黄志洵,姜荣.量子隧穿时间与脉冲传播的负时延[J]. *前沿科学*, 2014, 8(1):63-79.
- [20] Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A. Gain-assisted superluminal light propagation[J]. *Nature*, 2000, 406:277-279.
- [21] Stenner M, Gauthier D, Neifeld M. The speed of information in a 'fast-light' optical medium[J]. *Nature*, 2003, 425:695-698.
- [22] Gehring G M, Schweinsberg A, Barsi C, et al. Observation of backward pulse propagation through a medium with a negative group velocity[J]. *Science*, 2006, 312:895-897.
- [23] Zhang L, Zhan L, Qian K, et al. Superluminal propagation at negative group velocity in optical fibers based on Brillouin lasing oscillation[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(9):093903-093907.
- [24] Glaser R, Vogl U, Lett P D. Stimulated generation of superluminal light pulses via four-wave mixing[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(17):173902-173906.
- [25] Enders A, Nimtz G. On superluminal barrier traversal[J]. *Journal De Physique I*, 1992, 2(9):1693-1698.
- [26] Nimtz G, Hertmann W. Superluminal photonic tunneling and quantum electronics[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1997, 21(2):81-108.
- [27] 黄志洵.电磁源近场测量理论与技术研究进展[J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2015, 22(5):1-8.
- [28] Tzontchev R I, Chubykalo A E, Rivera-Juarez J M. Coulomb interaction does not spread instantaneously[DB/OL]. arXiv: physics/0010036[physics.class-ph], 2000.
- [29] Kholmetskii A L, Missevitch O V, Smirnov-Rueda R, et al. Experimental test on the applicability of the standard retardation condition to bound magnetic fields[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(2):023532.1-023532.11.
- [30] Kholmetskii A L, Missevitch O V, Smirnov-Rueda R. Measurement of propagation velocity of bound electromagnetic fields in near zone [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(1):013529.1-013529.12.
- [31] Missevitch O, Kholmetskii A L, Smirnov-Rueda R. Anomalous small retardation of bound (force) electromagnetic fields in antenna near zone[J]. *Europhysics Letters*, 2011, 93(6):64004.1-64004.5.
- [32] Sangro R, Finocchiaro G, Patteri P, et al. Measuring propagation speed of Coulomb fields[DB/OL]. arXiv:1211.2913v2[gr-qc], 2014.
- [33] 樊京,周治平,田子建.自由空间磁力线速度测量实验[J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2013, 20(2):64-67.
- [34] Carniglia C K, Mendal L. Quantization of evanescent electromagnetic waves[J]. *Physical Review D*, 1971, 3(2):280-296.
- [35] Ali S T. Evanescent waves in quantum electrodynamics with unquantized sources[J]. *Physical Review D*, 1973, 7(6):1668-1674.
- [36] Stahlhofen A A, Nimtz G. Evanescent modes are virtual photons[J]. *Europhysics Letters*, 2006, 76(2):189-195.
- [37] Einstein A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper[J]. *Annalen der Physik*, 1905, 322(10):891-921.
- [38] 黄志洵.爱因斯坦的狭义相对论是正确的吗?[J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2021, 28(5):71-82.
- [39] Brillouin L. Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden Medien[J]. *Annalen der Physik*, 1914, 349(10):203-240.
- [40] Huang Z X. Two kinds of vacuum in Casimir effect[J]. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2021, 40(35):61-77.
- [41] Ulbrich R G, Fehrenbach G W. Polariton wave packet propagation in the exciton resonance of a semiconductor[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 43(13):963-966.
- [42] 张元仲.反常色散介质"超光速"现象研究的新进展[J]. *物理*, 2001, 30(8):456-460.
- [43] Zhang Y D. *Progress of Quantum Mechanics*[M]. Science Press, 2009.
- [44] 刘辽.试论王立军实验的意义[J]. *现代物理知识*, 2002, 14(1):27-29.
- [45] Tetrode H. Über den Wirkungszusammenhang der Welt. Eine Erweiterung der klassischen Dynamik[J]. *Zeitschrift für Physik*, 1922, 10:317-328.
- [46] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18):4184-4187.
- [47] Veselago V G. The electrodynamics of substance with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics-Uspokhi*, 1968, 10(4):509-514.
- [48] Huang Z X. To achieve faster than light astronautic travel

- whether human beings can use wormholes or warp drive propulsion[J]. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2022, 41(16): 25~48.
- [49] Poincaré H. La théorie de Lorentz et le principe de la réaction [J]. *Archives Néerlandaises Des Sciences Exactes Et Naturelles*, Ser 2, 1900, 5: 252~278.
- [50] Lorentz H A. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light[J]. *Proc Sec Sci Koninklijke Akad van Wetenschappen (Armsterdam)*, 1904, 6: 809-831.
- [51] Ma Q P. *Inquiry Into the Self-Constancy of Relativity Logic* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific Literature Press, 2004.
- [52] Ma Q P. *The Theory of Relativity: Principles, Logic and Experimental Foundation* [M]. New York: Nova Science Publishers, 2013.
- [53] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete [J]. *Physical Review*, 1935, 47(10): 777-780.
- [54] Bell J S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox[J]. *Physics Physique Fizika*, 1964, 1(3): 195-200.
- [55] Bell J S. On the problem of hidden variables in quantum mechanics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1966, 38(3): 447-452.
- [56] Aspect A, Grangier P, Roger G. Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem[J]. *Physical Review Letters*, 1981, 47(7): 460-463.
- [57] Aspect A, Grangier P, Roger G. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities[J]. *Physical Review Letters*, 1982, 49(2): 91-94.
- [58] Salart D, Baas A, Branciard C, et al. Testing the speed of 'spooky action at a distance' [J]. *Nature*, 2008, 454: 861-864.
- [59] 黄志洵. *波科学与超光速物理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [60] 黄志洵. *物理学之光——开放的物理思想* [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2022.

编辑: 赵志军