
About in the potential barrier Superluminal speed phenomenon research

Songshan Gao

Hebei iron and Steel Group, Handan Iron and Steel Company, Handan, HeBei

Email: gaosongshan567@sina.com

Abstract

Since 1990s, physicists in various countries have experimented with the superluminal velocity of photons, optical pulses and microwave pulses using quantum tunneling effect. For superluminal phenomena in barriers, In this paper, a new photon equation is obtained from the relativistic energy and momentum relation of the Tachyon when the tachyon's velocity is infinite. It is concluded that the so-called photon is only the representation when the speed of the Tachyon is infinite, and the relationship between the photon and the Tachyon is established. It is Think that the photon will be transformed into the Tachyon when it gains energy, and the Tachyon will be transformed into the photon when it loses energy. The rationality of the existence of tachyons is explained theoretically, and the superluminal experiment of quantum tunneling effect is reasonably explained. The superluminal velocity relation of photons which can be tested by experiments is given when they cross the barrier. The rationality of the velocity relation is fully explained by the results of the existing experimental data substitution.

Keywords

Photon, Tachyon, barrier, superluminal experiment

关于势垒中超光速现象的研究

高松山

河北钢铁集团邯钢分公司, 河北 邯郸

Email: gaosongshan567@sina.com

收稿日期: 2019年1月15日; 发布日期: 2019年1月18日

摘要

20世纪90年代以来各国物理学家利用量子隧道效应进行了光子、光脉冲及微波脉冲的超光速实验。面对势垒中的超光速现象，该文由快子的相对论能量、动量关系式，当快子的速度为无穷大时得到了新的光子方程，从而认为所谓的光子只是快子速度为无限大时的表象，并建立了光子与快子的关系式，认为光子获得能量后将转变为快子，而快子失去能量后转变为了光子。并从理论上解释了快子存在的合理性，合理解释了量子隧道效应的超光速实验，并给出了可被实验检验的光子穿越势垒时呈现超光速的速度关系式，根据现有的实验数据代入的结果充分说明了穿越速度关系式的合理性。

关键词

光子，快子，势垒，超光速实验

1. 引言

20世纪90年代以来各国物理学家利用量子隧道效应进行了光子、光脉冲及微波脉冲的超光速实验。做实验的物理学家用特殊的介质、截止波导充当势垒，实验发现光子、光脉冲及微波脉冲穿过势垒时将呈现超光速[1]，面对这一新的物理现象，笔者认为在势垒内发现的超光速就是所谓的快子，那么为什么光子、光脉冲及微波脉冲穿过势垒时在势垒内将呈现超光速呢，光子与快子之间存在什么关系呢？下面我们从理论上分析一下。

2. 快子概念的由来与克莱因-高登方程

快子概念是由美国物理学家比兰纽克、苏达山和范伯格于20世纪60年代共同提出的，由相对论方程 $E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ ，如果存在快子，那么为保证能量 E 是可测量的量即 E 为实数，在 $v > c$ 时，取其静止质量 m_0 为虚数 $m_0 = i\mu$ ，其中： i 为纯虚数， μ 是静质量的实数值。[2] 实数值 μ 在 $E = \mu c^2 / \sqrt{(v/c)^2 - 1}$ 中只充当一个实数而已，并没有实际的物理含义（这只是当初的观点，至于 μ 有没有物理含义请见以下笔者的分析）。

也就是说具有虚数静质量的物质一经产生便以大于光速的速度运动。由相对论的能量动量关系式于是有 $p^2 c^2 - E^2 = \mu^2 c^4$ ，这是在类空区域中的双曲线，快子的能量和动量必须满足这一关系。

通常情况下，人们按照克莱因-高登方程 $(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\mu^2 c^2}{\hbar^2})\psi = 0$ 来描述快子的，[2]

并且认为快子的自旋为零。

相对论量子力学中自由粒子只是一个理想化的概念，但形如克莱因-高登方程这样的波方程

仍然具有形式上的波包解： $\psi(r, t) = \psi_0 \exp(-\frac{i}{\hbar})(\omega t - kr)$,

于是快子波的相速度 $v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{E}{p} = \frac{c^2}{v}$ ，因为 $v > c$ ，所以 $v_p < c$ 。

群速度为： $v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{dE}{dp} = \frac{pc^2}{E} = v$ ，它对应快子的速度 $v > c$ ，群速度 v_g 也即是快子波包

或者快子波脉冲的速度，式中 $E = mc^2 = \sqrt{p^2 c^2 - \mu^2 c^2}$ 。

3.光子与快子的关系

由相对论的能量-动量关系式 $E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$ ，当 $m_0 = 0$ 时，有 $E^2 = p^2 c^2$ ，将能量算符 $E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ ，动量算符 $p \rightarrow -i\hbar \nabla$ 代入到方程 $E^2 = p^2 c^2$ 中，即可得到光子的波动方程 $\nabla^2 \psi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi$ ，其中的 ψ 可以是麦克斯韦方程组中的两个波函数，电场强度 \mathbf{E} 或磁场强度 \mathbf{H} 。[3]

我们知道相对论的质速关系式 $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 中的 $m_0 \neq 0$ 这是前提条件，显然由质速关系得到的能量-动量方程 $E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$ ，当 $m_0 = 0$ 得到 $E^2 = p^2 c^2$ 的光子方程，这明显违背前提条件 $m_0 \neq 0$ 。而当 $v = c$ 时，有 $m = \infty$ ，可见在 $m_0 \neq 0$ 的前提条件下相对论的质速关系不能描述光子。如此，在亚光速区和光速区从理论上讲要得到光子方程是不合理的。

如果我们将相对论的质速关系式推广到超光速区，相应的快子的能量动量为： $E^2 = -\mu^2 c^4 + p^2 c^2$ ，

其中， $E = mc^2 = \mu c^2 / \sqrt{(v/c)^2 - 1}$ ， $p = \mu v / \sqrt{(v/c)^2 - 1}$ ，

当 $v = \infty$ 时，快子的能量 $E = 0$ ，但是动量 $p \neq 0$ ，则快子的能量、动量关系式变为

$0 = -\mu^2 c^4 + p^2 c^2$ ，也就是 $\mu^2 c^4 - p^2 c^2 = 0$ ，令 $E_\mu = \mu c^2$ ，于是 $E_\mu^2 - p^2 c^2 = 0$ 。

将此方程中的能量、动量作如下变换 $E_\mu \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ ， $p \rightarrow -i\hbar \nabla$ ，代入到方程 $E_\mu^2 - p^2 c^2 = 0$ 中

即可得到一波动方程 $\nabla^2 \psi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$ ，而此方程也正是光子的波动方程，所以方程 $0 = -\mu^2 c^4 + p^2 c^2$

既是光子方程，其中 μc^2 为光子的能量，这就是实数值 μ 的物理含义。

这样看来，光子的运动并不能用相对论的质速关系式中的速度 v 来分析。

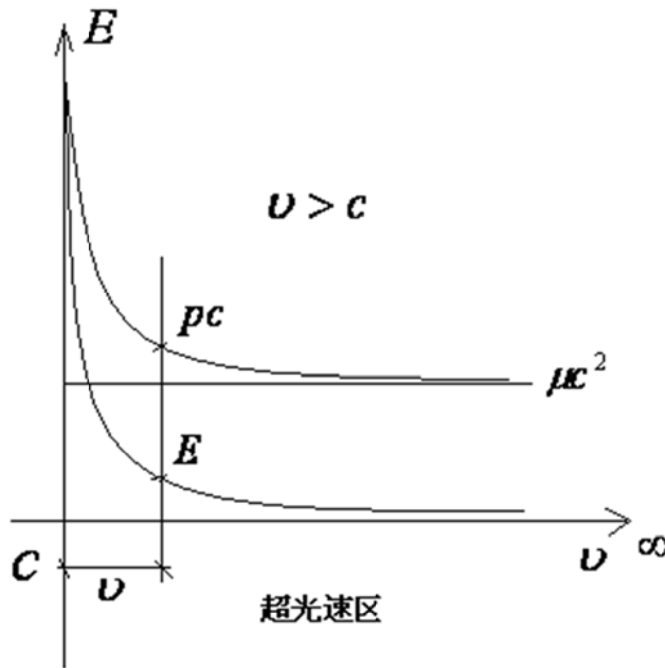
由上述分析，在快子的速度 $v = \infty$ 时，快子将转变为能量是 μc^2 的光子，且光子的速度对应快子的无限大速度。

$$\text{由快子的能量、动量关系式 } p^2 c^2 = \mu^2 c^4 + E^2, \text{ 有 } p^2 c^2 = \frac{\mu^2 v^2 c^2}{\frac{v^2}{c^2} - 1} = \frac{\mu^2 v^2 c^4}{v^2 - c^2},$$

约去 v^2 （这里 v^2 为标量），那么我们可以得到 $p^2 c^2$ 与 $\mu^2 c^4$ 的关系，也就是：

$$p^2 c^2 = \frac{\mu^2 v^2 c^4}{v^2 - c^2} = \frac{\mu^2 c^4}{1 - \frac{c^2}{v^2}}, \text{ 于是 } pc = \frac{|\mu c^2|}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{v^2}}}, \text{ 其中动量的大小值为 } p = \frac{|\mu c|}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{v^2}}}.$$

对于光子而言取 μc^2 为正值，那么有 $pc = \frac{\mu c^2}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{v^2}}}$ ，如下图所示：



如上图， $pc > E$ ，这是快子能量的特点， pc 曲线的实质就是描述快子动量 p 变化的曲线。

要注意的是 pc 具有能量量纲但不是能量，而它却是快子能量的一部分。

由 pc 曲线，我们似乎可以建立光子 μc^2 与快子 pc 之间的动能关系，也就是由 $F = \frac{dp}{dt}$ 也可得到 $Fcdt = d(pc)$ ，但是，由于 $Fcdt = d(pc)$ 中的 pc 不是能量，不满足动能的定义 $dE_k = Fvdt = vdp = dE$ ，其中 $\frac{dE}{dp} = \frac{pc^2}{E} = v$ ，所以 pc 与 μc^2 之间不存在动能的关系，据此排除了光子 μc^2 在力场中获得动能的可能。

pc 与 μc^2 之间虽然不存在动能的关系，但它们之间存在着能量差。 $pc = \frac{\mu c^2}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{v^2}}}$ 的展开式为

$$pc = \mu c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{c^2}{v^2} + \frac{3}{8} \frac{c^4}{v^4} + \frac{5}{16} \frac{c^6}{v^6} + \dots \right),$$

$$\text{令 } \mu c^2 \left(\frac{1}{2} \frac{c^2}{v^2} + \frac{3}{8} \frac{c^4}{v^4} + \frac{5}{16} \frac{c^6}{v^6} + \dots \right) = \Delta E, \text{ 则有 } pc = \mu c^2 + \Delta E = hv + \Delta E, \text{ 其中 } \mu c^2 = hv,$$

这就是频率为 ν 的光子能量与快子动量的关系式，此关系式说明光子得到能量 ΔE 后可转变为快子，由此 $pc - \Delta E = hv$ 说明快子失去能量 ΔE 后可转变为频率为 ν 的光子。

4. 快子存在的合理性

根据洛仑兹时空变换，如果存在快子，则总存在这样的一些惯性系，使 $(t'_B - t'_A)$ 和 $(t_B - t_A)$ 的符号相反，这就意味着将出现时间倒流，因果颠倒的情形。

然而，相对论的时间概念是以有限的恒速光来定义的，这样对于超光速肯定会带来所谓的违背因果律问题。爱因斯坦本人也不得不承认“相对论常遭到指责，说它未加论证就把光的传播放在中心理论的地位，以光的传播规律作为时间概念的基础”。[4]

如果认为快子存在，并以快子的无限大速度传播规律作为时间概念基础的话，由此建立的时空坐标变换中，时间就不会有相对性必是绝对的，快子就不会违背因果律了。

理论上我们总是尽可能使得两地的钟校对为同一时刻即 $t = t'$ ，这就要求我们以无限大速度传播的信号来传递信息，由（三）快子与光子的关系： $E^2 = -\mu^2 c^4 + p^2 c^2$ ，当快子的速度 $v \rightarrow \infty$ 时，有 $0 = -\mu^2 c^4 + p^2 c^2$ 即为光子方程，所以以无限大速度传播的信号为基础建立起的时空坐标变换与洛仑兹变换在形式上是一样的，在这个变换中时间是绝对的，但不具有测量意义，这是因为快子的这个方程 $0 = -\mu^2 c^4 + p^2 c^2$ 说明已没有了信号（能量 $E = 0$ ）的传播。有测量意义的仍是时间的相对性，因为快子的这个方程 $0 = -\mu^2 c^4 + p^2 c^2$ 也既是光子方程。所以快子的存在是不违背因果律的但不具有测量意义， $(t'_B - t'_A)$ 和 $(t_B - t_A)$ 的符号相反只是光学幻像只具有测量意义。

由快子的特点无限大的传递速度不需要无限大的能量，可得出时间的绝对性但不具有测量意义，时间的相对性才具有测量意义。

另外，我们可看到用快子的无限大速度也可取代光速不变假设，这样就可避免由光速不变假设带来的各种谬误问题。

我们还注意到，快子的这个方程 $0 = -\mu^2 c^4 + p^2 c^2$ 说明已没有了信号（能量 $E = 0$ ）的传播，但快子的动量为一定值 μc 说明还传递着动量，这就表明宇宙间相距很远的两点仍可依据快子而相互联系，这就是所谓的超距作用或即时效应。

5. 势垒中超光速现象的理论分析

1992年至2002年间有关“比真空中光速更快”的实验有了重大突破，做实验的是美国、加拿大、德国、意大利等国的科学家，一类实验是使光或微波穿越某种位（势）垒或特殊制备的媒质，发现其穿越速度比穿越等长的自由空间（真空）更快[1]。

由本文三光子能量与快子动量的关系式 $\mu c^2 + \Delta E = pc$ ，其中 μc^2 为光子的能量， p 为快子的动量， pc 具有能量量纲。将该方程与量子隧道效应的借用能量关系式 $E_0 + \Delta E \geq H$ 联系起来[5]，就可对光子穿越势垒时呈现的超光速现象进行分析，式中 E_0 为粒子能量， ΔE 为虚光子能量， H 为势垒能量。按照量子力学粒子可通过所谓的隧道效应穿过势垒从A方进入B方，尽管粒子的能量小于势垒高（即 $E_0 < H$ ），借用能量的观点认为是粒子向真空借来一个虚光子的能量 ΔE 使 $E_0 + \Delta E \geq H$ ，于是翻越了势垒，同时它将释放一个虚光子的能量给真空，自己完成了从A到B的穿越，这里势垒的宽度为 $|AB|$ 。

如果我们令 $E_0 = \mu c^2$ ，于是有 $E_0 + \Delta E = pc$ ，且 $pc \geq H$ ，那么光子穿越势垒的情形是这样的：光子 E_0 向真空借来一个虚光子的能量 ΔE 使 $E_0 + \Delta E \geq H$ ，于是翻越了势垒，同时它转变为了快子并以超光速 v 完成了从A到B的穿越，穿越势垒后，它将释放一个虚光子的

能量 ΔE 给真空，这时快子又转变为了光子，这就是势垒内可以发现超光速运动的原因。

由 $pc \geq H$ ，我们取 $pc = H$ ，那么由 $pc = \frac{\mu c^2}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{v^2}}}$ ，得到： $v = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{E_0^2}{H^2}}}$ 这就

是光子穿越势垒时呈现超光速的速度关系式。

其中， v 是快子的速度即穿越速度， c 为光速， E_0 为入射光子的能量， H 为势垒的能量高度，且 $H > E_0$ ，它是否能够被实验证实呢？这还有待于具体的实验数据，由此式说明穿越速度是与入射光子的能量、势垒的能量相关的。在势垒中快子与光子的能量关系为 $E = \frac{\mu c^2}{\sqrt{\frac{v^2}{c^2} - 1}}$ 。在 $v > \sqrt{2}c$ 的情况下，

势垒中快子能量小于光子能量即 $E < \mu c^2$ 。

下面以“光子赛跑实验和微波脉冲超光速实验”[1]所提供的数据来检验一下穿越速度关系式的合理性：

(1) 光子赛跑实验：美国伯克利加州大学赵雷蒙把一个光子经非线性晶体产生两个同时出发的光子，让其中一个在真空中前进，而在另一个光子前进的光路上放置了厚度为 $1.1 \mu\text{m}$ 的用来充当位（势）垒的滤光器，实验中保持两个光子的光程一样长，结果得出光子穿过位垒时的速度是光速的1.7倍。

当然，有的人用光子的波包变形来解释这个超光速实验，似乎很合理、巧妙[6]，但是笔者认为这一观点是将势垒看做障碍物了，而不管势垒所具有的能量高度的大小，而笔者的观点是将入射光子的能量与势垒的能量都包括在内的，揭示了穿越速度与二者之间的关系。

美国的赵雷蒙所做的光子赛跑实验所选的频段为光频其波长范围（ $7600\text{\AA} - 4000\text{\AA}$ ），由

$E_0 = h \frac{c}{\lambda}$ ， E_0 范围 $1.641\text{eV} - 3.112\text{ eV}$ 。由穿越速度关系式 $v = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{E_0^2}{H^2}}}$ ，当 $v = 1.7c$ 时，得

出 $H = 1.237 E_0$ ，因此得到势垒能量 H 的范围是 $2.03\text{eV} - 3.85\text{eV}$ ，而按照非线性晶体产生的两束光来

看，另一束是原光波长的一半，由此也可确定势垒能量 H 的范围是 $4.06\text{eV}—7.7\text{eV}$ ，且都属于绝缘体的禁带宽度 ($1.5\text{eV}—10\text{eV}$) [7]，而滤光器也属于绝缘体晶体，但到底是那一个光子经过了势垒，却不得而知。

(2) 微波脉冲超光速实验:1992年, A. Enders 和 G. nimitz 用 WR140 型矩形波导做隧穿实验, 微波脉冲中心载频 $f = 8.7\text{GHz}$, 而波导截止频率 $f_c = 9.49\text{GHz}$, 截止波导长度 $L=0.1\text{m}$, 它与光速的比值 (L/c) 为 333ps , 而微波脉冲通过截止波导的时间为 130ps , 隧穿时间小于 333ps , 因此认为测量证明了超光速存在。

下面分析一下: 由[1]文章, 同一脉冲通过同样自由空间 (真空) 时的时间为 $t=L/c=333\text{ps}$, 微波脉冲通过截止波导的时间为 $t'=L/v=130\text{ps}$, 所以有 $t/t'=v/c=2.56$, 于是可得 $v=2.56c$ 。

而由穿越速度关系式: $v = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{E_0^2}{H^2}}}$, 其中, v 是快子的速度即穿越速度, c 为光速, E_0 为入射光

子的能量, H 为势垒的能量高度, 且 $H > E_0$, 将 $f = 8.7\text{GHz}$, $f_c = 9.49\text{GHz}$ 代入, 也就是 $E_0 = hf$, $H = hf_c$, 其中 h 为普朗克恒量, 即 $\frac{E_0}{H} = \frac{f}{f_c} = \frac{8.7}{9.49} = 0.91675$, 于是得到 $v=2.5c$ 。理论值 $v=2.5$

c 与实验测定值 $v=2.56c$ 相差 0.06 。

试想, 光子向真空借来一个虚光子能量, 使得其翻越势垒, 如果其速度不变还是 C 的话, 就不会有大于光速的数据。

由 $pc = \mu c^2 + \Delta E$, 如果 ΔE 为虚光子能量, 那么在某种情况下快子与光子易相互转化, 但其转化过程不需什么时间是一个虚过程, 例如上述实验。

如果 ΔE 为实光子能量, 那么由于一光子不易获得另一个光子的能量, 所以两光子相遇不可能转变为快子。但是反过来, 由于快子与介子自旋为 0 , 那么其性质也是一样的, 即快子也是不稳定的易衰变, 所以快子将会很快转变为两个相互分离的不同频率的光子即 $pc \rightarrow hv_1 + hv_2$, 其中 $\mu c^2 = hv_1$,

$\Delta E = hv_2$, 矢量式为 $\vec{p} = \frac{hv_1}{c} \vec{n}_1 + \frac{hv_2}{c} \vec{n}_2$, 由于这一原因, 在自由空间找到快子是困难的。

参见[8], 自旋为 0 不带电荷的 π^0 介子转化为两个自旋为 1 的 γ 光子即 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ 。

综上所述, 笔者认为解决超光速电磁波实验问题的正确途径是相对论在超光速区的进

一步发展, 那种对任何超光速实验都采取回避视而不见的态度是令人遗憾的, 而借此实验来

否定相对论也是不可取的。

参考文献

- [1] 黄志洵. 超光速问题与电磁波异常传播, 中国工程科学 2000 年 10 月第二卷第 10 期
- [2] 耿天明. 超光速运动的可能性, 首都师范大学学报(自然科学版) 第 23 卷 第 1 期, 2002 年 3 月
- [3] 曾谨言. 量子力学, 卷 II, [M].3 版, 北京: 科学出版社, 2000 : 581
- [4] 爱因斯坦相对论的意义, 李灏译 科学出版社, 1961.11.P18
- [5] 李元杰. 《寻找上帝的科学》, 湖北人民出版社, 2000.6
- [6] 沈施. 超光速探索中的困惑-相对论有关问题再议, 自然杂志 26 卷 2 期科学论坛
- [7] 《普通物理学》第三册, 程守珠、江之永主编, 人民教育出版社 1980.6 (348 页)
- [8] 《普通物理学》第三册, 程守珠、江之永主编, 人民教育出版社, 1980.6 (390-391 页, 基本粒子表)