

# 试论王立军实验的意义

刘 辽

(北京师范大学物理系 北京 100875)

2000 年王立军等人在《自然》上发表了一篇重要论文“具有增益的超光速传播”，文中认为他们已成功地实现了光脉冲的超光速传播和从铯室(Cs-cell)中的出射光脉冲在时间上超前于入射光脉冲。图 1 是实验的示意图：

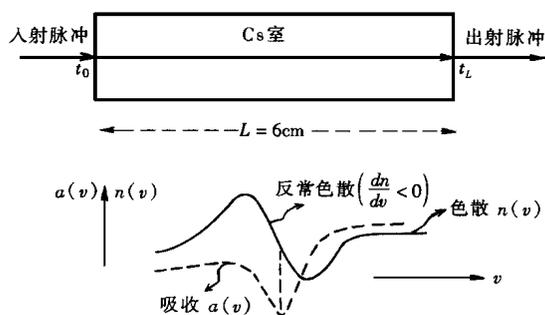


图 1 王立军实验(WKD 实验)示意图

图 1 中，入射光脉冲于实验室参照系的时刻  $t_0$  进入铯室，于实验室参照系的时刻  $t_L$  从铯室出去。在铯原子气的反常色散区群速指数

$$n_g = n(v) + v \frac{dn(v)}{dv} = -310 \pm 5 < 0 \quad (1)$$

光脉冲群速为负速度，即

$$v_g = C/n_g = -C/310 < 0. \quad (2)$$

光脉冲在铯室内的通行时间为

$$\Delta t^{(Cs)} = t_L^{Cs} - t_0 = \frac{L}{v_g} = \frac{6}{(-C/310)} = -62\text{ns} < 0 \quad (3)$$

上式表示

$$t_L^{Cs} < t_0 \quad (4)$$

即从铯室的出射光脉冲在时间上超前于入射光脉冲约 62 纳秒。光脉冲在铯室外真空中走过同一距离  $L = 6\text{cm}$  的时间为

$$\Delta t^{(v)} = t_L^{(v)} - t_0 = L/C = 0.2\text{ns} \quad (5)$$

故有  $\Delta T = \Delta t^{(Cs)} - \Delta t^{(v)} = L/v_g - L/C = (n_g - 1)L/C < 0$ ，实验中  $\Delta T = -62.2\text{ns}$ 。

这表示，光脉冲在反常色散介质中的传播速度

超过真空中的光速。总之，王立军等人认为 WKD 实验发现光脉冲在铯原子气的反常色散区中传播时，它的传播速度超过真空中的光速且出射光脉冲在时间上超前于入射光脉冲。

在假定 WKD 实验数据可信的前提下，我们尝试对这一实验的含义进行重新分析。

首先谈谈负速度的含义是什么。

由 WKD 实验知，从光源发出一个推迟光脉冲，设光脉冲方程为  $f(t - x/v_g)$ ，其中  $x$  表示距离， $v_g$  表示群速度，在进入铯室后  $v_g$  为负，可令  $v_g = -|v_g|$ ，光脉冲方程变为  $f(t + x/|v_g|)$ ，这正是超前光脉冲，一个很自然的物理解释是：由光源发出的推迟光脉冲在进入铯室后由于群速为负而变为一个超前光脉冲，这就是负速度的含义，它将随  $x$  的增大， $t$  减小，沿时轴逆行，或随  $x$  的减小， $t$  增大，沿时轴顺行。由  $\Delta t^{(Cs)} = t_0 - t_L^{(Cs)}$  及  $t_0 + x_0/|v_g| = t_L^{(Cs)} + x_L/|v_g|$ ，相对于入射光脉冲而言，马上得到出射光脉冲的时间超前量为

$$\Delta t^{(Cs)} = \frac{L}{|v_g|} = \frac{6}{(C/310)} = 62\text{ns}$$

与实测完全相符。

可见负速度的出现等效于把一个推迟光脉冲换成一个超前光脉冲，它随距离的增加而逆时传播，其结果是导致出射光脉冲在时序上超前于入射光脉冲，显然，这就对通常理解的因果律的时序的绝对性提出了挑战。

其次，我们来讨论 WKD 实验中是否出现了超光速现象问题。

由前述有关负速度的分析，可知它等效于一个沿着时轴顺时传播的超前光脉冲，由图 2 易知，不论这些超前光脉冲的速度的  $|v_g|$  是大于  $c$  (在过去光锥外) 还是小于  $c$  (在过去光锥内)，它们都会导致出射光脉冲的超前。但在 WKD 实验中由于  $|v_g| = C/310 < c$ ，光脉冲完全位于过去光锥内，显然并未

出现超光速现象。

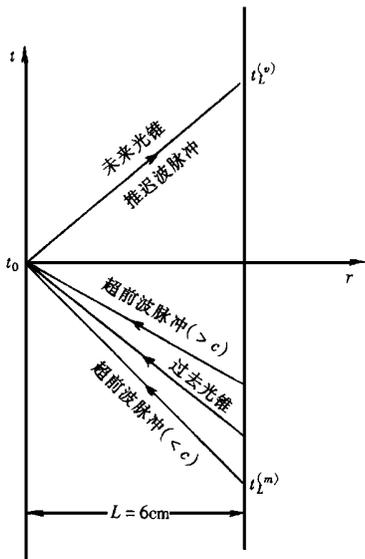


图2 脉冲(推迟,超前)传播时空图

然而如果我们注意到群速指数在反常色散区

$$n_g = n(v) + v \frac{dn(v)}{dv}, \quad \frac{dn(v)}{dv} < 0 \quad (6)$$

就得承认从理论上不能排除  $|n_g| < 1$  或  $|v_g| = c \setminus |n_g| > c$  的超光速现象。

如果上述可能性可以在实验中实现,这就对相对论中的光速极值原理提出了挑战。

总之,WKD 实验中出现的负速度迫使我们重新分析通常因果律中的时序问题,而 WKD 实验不能排除出现超光速光脉冲的可能性,又迫使我们认真对待超光速光脉冲对相对论的冲击。

先来谈谈因果律问题。

通常我们如下来定义二事件间的因果关系,即设有二个事件,其时空间隔为非类空的且一事件在时序上先于另一事件,则可定义此二事件间存在因果关系,其中时序在先者为因,在后者为果。

在定义了因果关系后,因果性原理或因果律的通常表述为:不存在任何方法来颠倒因果时序。如此表述的因果律我们称之为时序因果律,它在逻辑上是一条公理,而在物理上是一条可供实验验证的规律。

WKD 实验迫使我们重新审查和表述因果关系和因果律。

仍以 WKD 实验为例,在此实验中,测量仪器测量到了二个信号或二个事件,即

事件 A: 在  $t_0$  时刻有光脉冲或信号进入铯室。

事件 B: 在  $t_L$  时刻有光脉冲或信号从铯室出

来。

显然在上述事件 A, B 间存在下述关系,即

不存在事件 A, 一定不存在事件 B, 或存在事件 A 是存在事件 B 的必要条件。

现在我们重新定义,满足上述必要条件的二事件 A, B 间存在因果关系,其中事件 A 为因,事件 B 为果。

注意在上述有关因果关系的新定义中,我们不要求此二事件间的时空间隔为非类空的以及因在时序上一定要先于果,我们也不去深究因与果之间的信息传递是通过相位重组 (Rephasing) 或是别的什么原因。我们只须按以上所述因果关系定义就足以断定在 WKD 实验中事件 A, 即光脉冲进入铯室为因,事件 B, 即光脉冲离开铯室为果, WKD 实验发现果在时序上超前于因。

从通常的时序因果律中剔除掉时序限制后,因果律的新表述是什么?

根据 10 多年来人们对时间机器 (time machine) 的研究,可以说, WKD 实验是人们首次在实验室中实现了某种类型的时间机器。一个长期令人困惑的问题是,如果时间机器可以实现,就会出现霍金与玻尔钦斯基等人所提出的疑难,具体到 WKD 实验,这类疑难可以表述为:这将出现什么? 如果人们可以把从 Cs 室出口端出射的超前波脉冲反馈到入射波脉冲上去。

为了避免这类疑难的出现,霍金提出了有名的时序保护猜想,诺维可夫等人提出了自洽性原理,前者认为:“物理规律不允许出现闭合类时曲线”(1992 年);后者认为:“在现实宇宙中,凡局域存在的物理规律的解只能是那些整体自洽的”(1992 年)。

霍金与诺维可夫等人的工作以及我们对 WKD 实验的分析促使我们领悟到上述疑难的出现可能皆来自人们对因果律缺乏本质上新的认识。人们长期来把因果律当成时序因果律看来已与实验不符。WKD 实验迫使我们因果律中剔除掉时序限制,剔除掉时序限制后的新的因果律表述是什么呢? 我们认为:果 (effect) 不可能通过任何方式影响因 (cause)。

如果承认这个因果律是自然界中一条最根本的、绝对的普遍原理,它就最终排除了改变历史的可能。而霍金的时序保护猜想和诺维可夫等人的自洽性原理就都是新因果律的不同表述。

可见只要承认新因果律的普遍性和绝对性,任何企图把 WKD 实验输出端的超前信号反馈到输入

端的方案都是不可能实现的。

紧接着我们来谈谈超光速光脉冲对相对论的冲击。

为此我们先回顾一下在洛伦兹变换中事件对间的时序颠倒问题。

设在某个惯性系中,事件对间的时序为  $\Delta t > 0$ , 则在另一与之有相对速度  $v$  的惯性系中,上述同一事件对的时序  $\Delta t'$  的颠倒要求

$$\Delta t' = \Delta t \left( 1 - \frac{v \Delta x}{c^2 \Delta t} \right) \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 0$$

亦即

$$v \frac{\Delta x}{\Delta t} > c^2 \quad (7)$$

如果存在超光速光信号,则在任何情况下(类时,类光,类空)任二事件恒可建立信号联系而当作因果事件对看待,当  $\Delta x / \Delta t < c$  时,由时序颠倒条件要求  $v > c$ ,注意到  $v$  乃二惯性系间的相对速度,而仅当静质量不为零的物体才能充当参照物,由洛伦兹变换马上知道,上述  $\Delta x / \Delta t < c$  的类时事件对间的时序是不能颠倒的。当  $\Delta x / \Delta t > c$  时,由时序颠倒条件要求  $v < c$ ,这显然是可以满足的,因而凡  $\Delta x / \Delta t > c$  的类空事件对间的时序是可以颠倒的。上述结论与相对论的结论完全一致。

注意到目前已知实验与理论所涉及的超光速现象都是有关静质量为零的光脉冲的。因之,即使确切无疑地证实了它的存在,它对相对论的冲击,不过是要求把真空光速是一切信号速度的上限这一通常的光速极值原理修改为:

真空中的光速是一切静质量不为零的信号的上限。

附带提到超光速光信号的存在对黑洞理论的影响。

以球对称静态黑洞为例。

黑洞理论的关键是在时空内存在一个以中心奇点为对称中心的捕获区,在此区内,光锥的未来时轴方向沿矢径减小方向指向中心奇点,由于一切非类空世界线均不能在光锥外,除在少数极端条件(例在 Cs 原子气的反常色散区内的光脉冲或光子)下的极少数超光速光脉冲中的光子外,绝大多数塌缩物质仍将塌缩最终形成黑洞,惟一的修正是经典黑洞不再是完全黑的。

最后谈谈超前波问题。

已知电磁场方程满足时间反演不变性。这意味

着电磁场方程的通解应是推迟解  $f_R = f_R(r - vt)$  与超前解  $f_A = f_A(r + vt)$  的叠加,例如为  $1/2(f_R + f_A)$ , 由于自然界的某种尚未查明的对称性破缺,使得在实际上往往只有推迟解在起作用。虽然,仍有一些有名的理论物理学家认为超前解在电磁辐射理论中是不可忽略的,例如早在 1938 年狄拉克曾证明加速电荷所受辐射阻尼场可表为  $1/2(f_R - f_A)$ , 为了进一步说明后者的起源,1945 年惠勒与费恩曼在建立他们的辐射的吸引子理论中,假定辐射源周围的吸引子介质要在辐射源处产生一个超前场,他们证明所有超前场的合成效果正好等于狄拉克所得到的  $1/2(f_R - f_A)$ ,此场在辐射源处与辐射源所产生的  $1/2(f_R + f_A)$  合成正好就是观测到的推迟场。

看来,可认为 WKD 实验中所出现的负速度正好直接显示了超前场的存在。

最近作者看到了黄超光和张元仲的预印本(2001 年)以及周咸建的抽印本(2000 年)。

黄、张在预印本中,详细描述了在 WKD 实验中高斯型和正弦平方型光脉冲以及阶跃型光脉冲的传播,他们发现前者在传播过程中仍有过大的变形以致难以应用群速度概念,他们应用数值计算发现阶跃型光脉冲光速相当精确地等于真空中的光速,若我们注意到有些学者认为只有阶跃型光脉冲才能携带信息,他们的研究似乎在 WKD 实验中排除了超光速信号的存在。

周的论文从理论上论证了 WKD 实验中并未出现超光速现象,但他指出对于复色散系数在复频率平面内存在奇点(极点)的介质而言,在理论上应有可能存在超光速光脉冲。

看来当前的高精度实验正在对现有理论形成了一些冲击,有必要首先确认这些冲击的存在,然后弄清现有理论的局限性并探索改进的途径。我想这是当前理论物理的一个重要任务。