

物理学咬文嚼字之五十一

速度

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

速度是出神的形式.

——Milan Kundera in *La Lenteur*¹⁾.

c interrelates space and time.

——wiki

摘要 速度是切空间里的实在. 速度对应的词有 speed, velocity, celeritas 等. 光速作为时空连接的参数, 它在 Maxwell 方程中的出现意味着它不是一般意义上的速度. 光速 c 是个整数, 或者就是 1. 利用 $\Delta x/\Delta t$ 测定中微子的超光速反映的是一种物理学理解上的不足.

在其物理学讲义一个名段中, 费曼讲了一个女司机和警官的故事²⁾. 警官拦下了一位超速的妇女, “抱歉, 女士, 我得给你开票了: 你刚才超过一小时 60 迈了.” “你啥意思?”——那位妇女说——“我根本就没开到一个小时!”

对这个问题该怎么回答? 你可能会说: “你如果一直这么开一小时, 你会驶出 60 多英里去.” 那位妇女可能会说: “我干吗开那么远? 我就到前面 500 米不到的超市去!”

那位妇女的反驳还真不乏值得肯定的地方, 因为我们谈论速度的时候有点循环论证的意思. 我们说, 如果这样连续行驶一小时, 我们将驶过 60 英里. 或者说也可以说, 如果这样连续行驶一秒钟, 我们将驶过 1/60 英里. “这样”当然是指“每小时 60 迈的速度”——可这正是我们首先要定义的^[1].

这个困难每当我们试图用平常的空间间隔和时间间隔解释速度的时候就会出现——因为不能这么做. 速度不存在于平常的空间中, 它不是简单的一段距离和一段时间的比值, 即 $\Delta x/\Delta t$. 它存在于一个抽象的空间, 一个与平常空间相切 (tangent) 的由极限过程产生的切空间 (tangent space). 在图 1 中, A 、 B 两点相距 Δx , 若越过这段距离用时为 Δt , 则我们说在 AB 之间的平均速度为 $\Delta x/\Delta t$. 当 B 无限趋近于 A 点时, AB 两点的连线变成了在 A 点的切线, 同曲线只有一个接触点. 这时的 $\Delta x/\Delta t$ 的极限才是在 A 点的瞬时速度. 速度为我们提供了自连续产生不

连续——从此前存在之概念的极限产生新概念——的基本案例. 图 1 中给出的速度表述是不合适的, 因为速度始终在 x -方向上而不是在 $x-t$ 平面内.

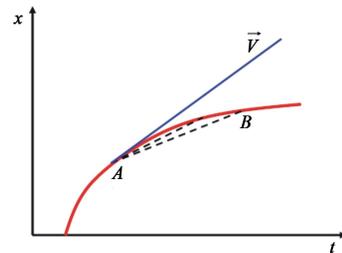


图 1 速度是切空间里的现实, 因此是切现实 (tangent reality)

速度是一个“切现实”的现实, 应该认真理解. 有一段时间, 因为执著于 $\vec{V} = \frac{d\vec{x}}{dt}$, 我感到相空间的概念和 Hamilton 方程不好接受. 其实, 就算是存在关系 $\vec{V} = \frac{d\vec{x}}{dt}$, \vec{V} 和坐标还可以是互相独立的. 一个系统里的粒子处在不同的位置上, 但它们依然可以有相同的 \vec{V} . 实际上, 这和微分的性质是自洽的, $\vec{V} = \frac{d\vec{x}}{dt} = \frac{d(\vec{x} - \vec{x}_0)}{dt}$ 对任意的常量 x_0 都成立. 其实, 在相空间的概念和 Hamilton 方程中, 出现的是动量 $\vec{p} = m\vec{V}$ 而不是速度 \vec{V} , 这是因为就描述运动来

1) Milan Kundera 于 1995 年出版的法文小说《慢》. ——笔者注
2) 这则故事中的性别偏见为费曼从女权主义者那里赢得了“大男子主义猪”的称号. 后来, 实际上是很后来的事情了, 费曼狡黠地指出故事中的警官也是女的. ——笔者注

说,速度 \vec{V} 相对于动量 $\vec{p}=m\vec{V}$ 其能力是不足的. 动量为质量和速度之积,用这种两重的物理量描述运动的合理性,非物理学家也早认识到了. 据说拿破仑征服埃及时,就提出用人数乘上速度这样的量来衡量军队的战斗力. 骑兵和步兵的速度不同,人数等量的这两者突袭效果显然是不一样的. 物理学来自生活,此为一例.

速度是一个矢量,有方向. 有方向的速度在英语中被称为 velocity,一般用符号 \vec{V} 表示. Velocity 来自拉丁语 *velocitas, velox*,在被当成物理学专门概念之前也是一个非常家常的词,就是“快”的意思. 在英文中表示快的意思还有 *quickness, swiftness, rapidity, speed* 等. 如果你在单位时间内越过的距离很大,耳边就会有呼呼的风声,不管你是勇往直前还是原地绕圈. 也就是说,有时我们不太关心位置改变率 (rate) 的方向. 与方向无关的纯粹快慢的概念就是速率,一般英文文献用 *speed*. 当然,如上所见, *velocity* 这样的家常词是怎么也摆脱不掉“速率”的角色的,这一点在阅读英文文献时很容易注意到.

不管是洋文的 *velocity* 还是中文的速度,速度意味着快. 速,形声字,束声,大约是车开到 20—30 公里/小时耳边的风声(再快了古人没办法). 在物理上,速度变成了中性的词,多小的 $\Delta x/\Delta t$,我们也称为速度而不是慢度或者磨蹭度. 历史上,人类提升自己行进速度的第一次革命是利用别的动物,主要是马³⁾;第二次革命是力学的,利用滚动摩擦较小的原理. 带轮的自行车,西语称为 *velocipedes* (快脚); Karl Benz 1893 年造了第一批廉价的、批量生产的四轮车,就叫 *velo*,那大约是第一代奔驰车.

人有了(高于自身能力能完成的)速度会怎样? 昆德拉在小说《慢》中这样评论一个骑摩托车的人:“他抓住的是跟过去与未来都断开的瞬间,脱离了时间的连续性;他置身于时间之外.”当我读到这句话时忽然觉得,就理解物理来说,笔者这样的所谓物理学家是连昆德拉这样的名作家,或者韩少功这样的中文作家⁴⁾,都不如的.

速度是时空之切空间里的存在,加速度就是速度空间之切空间里的存在,是速度的速度. *Acceleration*,来自拉丁语 *ad + celer*,即加 + 速. *Celer* (*celeris, celere*) 是拉丁语的形容词“快”,副词形式为 *celeriter* (*quickly*). 在我们的时空里,我们看到的只是一个物体的不同位置,所谓的时间、速度、加速度,只存在于我们的思维中. 但我们常常以为我们看

到了速度和加速度,我们甚至在一幅图中表示出一个运动过程——比如圆周运动——中的速度和加速度的方向(图 2),但理性会告诉我们它们不在一个空间里,因此所谓的速度同加速度不在一个方向上是自然而然的事情. 认识到这样的事实是人类物理学上的一个革命性的步骤,且还伴随着从亚里士多德力学(力带来速度)到牛顿力学(力带来加速度)的进步.

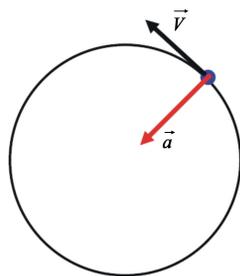


图 2 一个作圆周运动的物体,其速度沿圆周的切线方向,加速度指向圆心

人类关于加速度的心理,同关于速度的心理如出一辙. 虽然速度可增可减,但我们习惯把 $d\vec{v}/dt$ 或 d^2x/dt^2 说成是 *acceleration* (加速度),而很少提及 *deceleration* (减速度). 对于 $d^2x/dt^2 < 0$ 这样的情形,我们宁愿说是 *negative acceleration* (负加速度),也不说是 *deceleration*. 这就如谈论经济,明明是经济滑坡,我们偏说成是负增长⁵⁾. 难怪昆德拉感叹“我们的时代迷上了速度魔鬼”——在奥运口号“*citius, altius, fortius*”中,“更快(*citius*)”就是排在首位的.

拉丁语形容词 *celer* 对应的名词为 *celeritas* (速度),在伽利略的《关于运动的旧作 (*De Motu Antiquiora*)》和牛顿的《自然哲学之数学原理》等书中, *celeritas* 一词就是我们现在所理解的速度. 这个词的首字母 *c* 在物理学中具有特殊的地位,被用来表示真空中的光速. 为什么用 *c* 表示光速? 理由之一就是因为它 *c* 是 *celeritas* 的首字母,阿西莫夫还专门撰写了 *c for celeritas* 一文^[2]. 不过,这背后其实有相当曲折的历史. 字母 *c* 代表速度,在声学中研究波动方程时就有先例,这一点可见于欧拉的工

3) 所以在中文中马意味着快,如立马、马上. 比马快的是风和电,不过只能想象风驰电掣的感觉. 请注意,这种场合下时间是用速度表示的. ——笔者注
 4) 韩少功《马桥词典》中的一些文章有关于狭义相对论和时间的朴素思想. ——笔者注
 5) 更过分的是,官员作恶不叫作恶,而是“走到了群众美好愿望的反面”. ——笔者注

作^[3]. 在 1856 年的一篇文章中, 韦伯曾写到“and the constant c represents that relative speed, that the electrical masses e and e must have and keep, if they are not to affect each other (速度 c 代表两个电荷⁶⁾ e 与 e 之间的相对速度, 在此速度上它们就影响不到对方了)^[4].”后来, 在 Drude 1894 年出版的著作和洛伦兹 1909 年出版的著作中都能见到用 c 表示光速. 爱因斯坦研究相对论早期文章中用 V 表示光速, 这可能是延续麦克斯韦的习惯, 但在 1907 年的一篇文章中他把光速的符号改成了 c , 于是有了著名的公式 $E=mc^2$. 一个可能的原因是, 相对论总是涉及运动物体或者参照系的速度 v 以及光速, 如果光速用 V 表示的话, 一定很难避免混淆.

不过, 有另一种说法认为用 c 表示光速是因为 c 是 constant⁷⁾ 的首字母. 光速同电磁学常数相联系, $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$. 这样, 后来用 c 代表光速就有了逻辑的基础. 至于光速用 c 表示到底是因为 celeritas 还是 constant, 倒不必计较. 如果我们知道 c 是光速同时还是常数 (很特殊的常数, 特殊到它可能不是速度⁸⁾), 这对我们理解狭义相对论是有帮助的. 所谓的光速不依赖于源或者参照系, 应该说的是它是时空的关联, 也即如果我们认定不同参照系的时空是按照洛伦兹变换那样联系的, 则在这两个时空中, 时空都是通过 c 连接的, 自然有光速不变.

光速按照狭义相对论不只是一个常数, 它还是个上限, 是物质、能量甚至信息之传播速度的上限. 按照俄国学者 Yuri I. Manin 的观点, 这个速度上限, 和角动量的单位 \hbar 一样, 都具有绝对的意义, 其意义在于存在这样一个现实, 而不在于其按照某个单位制取 (看起来) 或大或小的数值. 量子力学文献中常出现 $c=1, \hbar=1$ 的写法, 有时作者写到这里时总要想个“为简单起见”或者“基于约定”等借口, 却不知道之所以可以这么写是因为可以这么写, 它们就是 1!

光曾被认为是即时到达的. 伽利略意识到光是有限速度的, 并试图和助手用灯光延迟来确定光速, 这当然不凑效——距离太短而光速实在太快. 1670 年代, 丹麦天文学家 Ole Römer 发现土卫 1 (Io) 在土星上的投影有时快 (地球离土星近的时候), 有时候慢 (地球离土星远的时候). 这个现象很容易用光有有限速度加以解释. 知道了地球和土星之间距离的变化, Römer 估算出光速约为 30 万公里/秒. 这个数值当然不精确, 因为 Römer 用来计算光速的 Δx 和 Δt 都不太精确. 后来据说有人在月球岩石上

放了一面镜子, 若向月球发射一束激光, 则通过测量往返所用的时间, 就能精确地计算出光速. 现代物理实验中有用于干涉仪的: 把一束已知频率的光分束然后合并, 改变光路差, 观察干涉花样的变化计算出波长, 从而计算出光的速度. 这些方法, 花样多变但精神没变, 本质上都是通过测量 Δx 和 Δt 来决定光速⁹⁾, 因此都不太精确. 重要的是, 笔者以为, 它们根本就不正确.

注意在关系 $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 中, 三个角色只有两个是独立的. 时间虽然概念上很难理解, 但日常物理学中用的时间是通过事件计数实现的, 容易精确. 距离 Δx 虽然好理解, 但不易测量. 既然光速是常数, 不妨利用这个性质. 注意, 我们目前的光速的标准值是 299,792,458 米/秒, 这是一个**整数值**, 是建立在我们之前的物理学知识上所确立的一个数值, **因此它是任意的, 又是精确的!** 相应地, 现在长度的标准是用光速和时间标准决定的. 这就告诉我们, 如果今天还用测量 Δx 和 Δt 的方法决定光速, 甚至判断光速是否是常数, 就有点缺乏常识了.

光速 c 不仅出现在狭义相对论中, 还出现在粒子理论中, 据信无质量粒子的速度是光速; 它还出现在引力理论中, 据信引力波的速度也是光速. 2011 年物理学界最热闹的是有人用 GPS 精确测量距离 Δx 加上测量飞行时间 Δt 从而测量中微子的速度, 并且宣称中微子的速度可能高于光速 (虽然低于光速的数据点可能更多). 2012 年热闹的则是关于中微子振荡的研究, 根据这个现象中微子三个味本征态中至少有两个是有质量的 (因此速度是明显低于光速的). 真不知道这些科学家们眼中还有没有物理学自洽性的问题. 中微子超光速的实验后来被说成是因为接口造成的测量错误, 笔者认为其是根本性的错误. 用 GPS 测定距离 (强调一下, 长度标准是用给定的光速常数标定的) 外加原子钟测量时间差, 然后计算 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, 这个方法比较两辆汽车的速度当然是可行的. 但是用来比较一个 (可能是) 零质量粒子和

6) 注意这里的用词 electrical masses. ——笔者注

7) Constant 对应的德文词为 Konstant, 这也就是物理学文献中常用 K 代表常数的原因. ——笔者注

8) 我有一种感觉, 虽然光速的量纲是速度, 但它不是普通的速度, 甚至未必是速度. ——笔者注

9) 光速还可以通过测量电磁学常数 ϵ_0 和 μ_0 , 然后由 $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 来计算. 不过测量电磁学常数可能也绕不过精确测量时间和长度的问题. ——笔者注

光速的些微差别(如果有的话),可能是不合适的.用这个方法测量光速你都可能得出一个关于 $c=299,792,458$ m/s 附近的非对称分布.你是否想得出光速比光速大的结论呢?针对这样的研究,德国马普所的一位科学家在上世纪九十年代评论低温核聚变实验时所曾写到(大意):“此事件只是说明,这个世界上超过 80% 的物理学家对物理学其实是一窍不通的.”言虽刻薄,却也离事实不远,可叹.

参考文献

- [1] 曹则贤译.至美无相.中国科技大学出版社,2012.原著为 Giovanni Vignale. The beautiful invisible. Oxford University Press, 2011
- [2] Asimov I. C for Celeritas in The Magazine of Fantasy and Science Fiction. 1959, Nov-59
- [3] Gibbs P. Why is c the symbol for the speed of light? 1997 (源自互联网)
- [4] Kohlrausch R, Weber W E. Annalen der Physik. 1856, 99:10

补缀 速度与时空的关系,按照一般教科书上的做法是写成 $\vec{V} = \frac{d\vec{x}}{dt}$ 的形式.关于这一点,笔者觉得值得商榷.此处的空间坐标 x 作为位置 (position) 理解的话,是无需写成矢量形式的, $dx = x_2 - x_1$ 就决定了速度是个矢量.这也是微分的更一般形式,比如梯度算符 ∇ ,作用到标量场 ϕ 上,其结果 $\nabla\phi$ 是个矢量的原因.若将位置 x 理解成矢量,则必须引入一个参照点,而这种做法恰恰是 Riemann 几何出现以来要避免的事情:一个空间结构的几何,应该在其内部得到描述.额外引入的参照点、参照系甚至嵌套空间 (nesting space) 都不是必须的,它们在带来某种方便的同时,也会带来一些问题.若此处的 x 当作位移 (displacement) 来理解,看似应该表示为矢量,但其实其矢量性质还是来自 dx 是矢量的事实——位移就是 dx 的积分.