

物理学咬文嚼字之四十一

如何是直？

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

宁在直中取,不在曲中求。
——[明]许仲琳《封神演义》

摘要 什么是直的问题关系到物理学对运动和时空结构的理解. 英文文献关于直线有 right line, straight line, direct line, beeline 等说法, 分子轨道的记号 g , u 也与“直”有关.

商朝末年,渭水河边有处叫磻溪的地方,一位鬓须皆白的老者独坐垂杨之下,悠然垂钓.令人诧异的是,老先生用的鱼钩却不能算是“钩(勾)”,因为它是直的,说不定就是根缝衣针.用直钩(这个说法好像有点别扭)钓鱼这件匪夷所思的事情,符合信息的定义 $I = -p \log_2 p$ 所表达的精神,即人咬狗比狗咬人包含更多的信息,因而更有新闻价值.这件新奇事经樵夫、渔父散播出去,传到了当地领导的耳中,终于让老者实现了“非为锦鳞,只钓王侯”的海口.这位姓姜名尚号飞熊的老汉直钩钓鱼,借了俗人的口口相传向领导表达了当官的愿望,与其说是“直中取”,毋宁说是高明的“曲中求”,所以看到领导驾到,还是“忙弃杆一旁,俯伏叩地…”,猥琐状与俗人无异.元人张明善在小令《水仙子讽时》中称其为“三脚猫渭水飞熊”,与“两头蛇南阳卧龙”诸葛孔明先生并列,语气好像很有一些不恭敬.可见,这是非曲直不是很好评判的.

物理学中也随处有“直的”这个概念,且也是个需要颠覆思维才能深入理解的一个概念.最常见的概念“直线”就不太好定义.倘若说平面上两点之间距离最短的路径为直线,这只是把问题推给了更难定义的“平面”和“距离”¹⁾.如何是直呢?我们中国人有垂直的说法:瓦匠为了保证能把墙砌得直,会从高处用细线垂下一个小重物块,俗称铅垂(图1),则细线此时的状态就是直的,为一垂线(plumb line).在地面附近,“垂”意味着“直”,这可是有深刻的物理内涵的.按照牛顿力学,地球附近的引力 $f \propto \frac{r}{r^3}$: 铅垂受重力下垂,plumb line 就是 r 的再现,认定 plumb line 是直的,其实就相当于认定地球表面附

近的空间是平直的.质量不是很大的地球,其引力为我们定义平直空间提供了物理基础.汉语用“垂直”翻译 perpendicular,属于直译,其名词形式 perpendiculum²⁾ 就是 plumb line.



图1 铅垂.垂者,直也

物理学的入门概念肯定应该包括直线运动.牛顿第一定律告诉我们,一个不受外来影响的物体保持其运动状态不变,即保持静止或者作匀速直线运动.牛顿第一定律的原文(拉丁文)为“Lex I: Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare”,所谓的直线地(运动),这里用词为“in directum (directly)”.在如下的英文翻译中,“Law I: Every body persists in its state of being at rest or of moving uniformly straight forward, except insofar as it is compelled to change its state by force impressed”^[1],所谓的直线地(运动)被表述为 straight forward.在另一种英文表述中,“Law I:

- 1) 如果您以为这样的概念很简单,恭喜您,物理学对您来说太简单了.——笔者注
- 2) Perpendicular 的词干为 pendere, 相关的词有 pendulum. Pendulum 汉译单摆,其实 pendulum 意在“垂”而不是“摆”.——笔者注

Every body preserves in its state of rest , or of uniform motion in a right line, unless it is compelled to change that state by forces impressed thereupon”^[2], 直线地(运动)则被表述为“in a right line”. 如众所知, direct line, straight line, 以及 right line 都可汉译为直线.

感觉上, 牛顿第一定律中的惯性运动用 a right line 表述正规一些. Right, 来自德语的 recht (权力、正确的), 拉丁语词源为 legere (统治, to rule), 有用 ruler(统治者、尺子)³⁾规定好了的意思, 所以是直的. Right, 还有正、正派、正直、正当、正确、正义的、令人满意的、右侧的(法语的直朝前走, Tout droit, 其中的 droit 和 right 的意义几乎完全重合)等等意思. Right angle, 直角, 指的是垂线和地平面上的线(a horizontal base line)之间的夹角——若引力取有心力的形式且是在欧几里得空间中, 则这个论断是有物理保障的. Right angle 是拉丁语 angulus rectus 的借用, rectus (upright), 即有垂直之意. Straight line 也是数学和物理语境中关于直线的常用说法, 如“to draw a straight line(划一条直线)”, “the equation of a straight line is usually written this way(直线的方程经常表达如下): $y=kx+b$ ”, “to move along a straight line”, 等等. Straight 还是一个比较生活化的词汇, 如“set the matter straight(厘清关系)”, “go straight(循规蹈矩、直截了当)”等. Direct line 字面上是直线, 其代表的事物表现上却可能是弯的, 译为“直达(通)线”更恰当些, 如“called direct line to Zhongnanhai”. 这里, direct 强调的是 least action(最少动作)⁴⁾, 已经包含物理学的精义了. Direct (direction) 出现在如下关于直线的循环定义中, 如“a straight line having the same direction throughout its length; having no curvature or angularity”. Direct 这个词来自拉丁语动词 dirigere, 有 to keep straight 的意思, 强调一种努力. 比如 direct current (直流电), 并不是说电流是直的, 而是说它一直努力保持其值的稳恒.

直线的英文表述还有 beeline, 源于这样的认识: 蜜蜂采花以后会直接飞回蜂房, 例句有“make a beeline for an object(直奔某个目标而去)”. 字面上看起来是“直线的”还有 rectilinear 一词, 有沿着直线的、形成直线的、由直线围成的、能保直线的等意思. 理想气体分子在容器中运动的径迹, 就是 rectilinear, 即除了因碰撞改变方向外, 其它时间都沿 a right line

运动; 在光学中, rectilinear 指的是能保持“线段”不变形的性质. Rectilinear 如果用汉语的“由线段围成的”来理解, 可能做不到正确地望文生义, 如 rectilinear polygon, 是指顶角全是直角的边形, 这里“recti-”显然是取 upright (取直角)的意思.

Right line 对应的德语词为 die Geradelinie, 其中的 gerade 对应英文的 straight. 往前直走, straightforward, 在德语为 gerade aus. Gerade 也出现在英文物理学文献中, 取的是英文 even 在“to get even(扯平了)”里的意思. 谈及分子轨道的偶对称性(even symmetry)和奇对称性(odd symmetry)时, 还是保留了使用德语词 gerade(even)和 ungerade(odd)的习惯. 在分子轨道记号中, g(gerade)表示偶对称的, u(ungerade)表示奇对称的, 比如关于 π -轨道的 π_u, π_g . 因此, 就有了 $g \leftrightarrow g$ 或者 $g \leftrightarrow u$ 之类的关于轨道间跃迁的记号. 对于多光子激发过程, 因为光子角动量 $l=1$, 则偶数个光子激发过程对应的选择定则为 $g \leftrightarrow g$ 以及 $u \leftrightarrow u$, 奇数个光子激发过程对应的选择定则为 $g \leftrightarrow u$ 以及 $u \leftrightarrow g$.

上面谈到 beeline 被理解为直线(a straight line), 不过, 如果采花地点离蜂房足够远的话, 这蜜蜂的 straightforward 飞行径迹, 一如飞机的航线(图2), 应该沿着以地心为中心之球面的某个大圆, 因此是曲线的(curvilinear). 如果我们认定地球表面附近的空间是欧几里得的, 则从地面上的一点到另一点的 straightforward 径迹在以地心为中心之球面的某个大圆上, 这可以看作是曲线, 或者“球面约束下”的直线. 我们完全有两种不同的态度来看待地球上两点沿大圆的连线. 如果我们认定有一个平直的三维欧几里得空间, 地球表面是嵌在(nest in)三维空间中的球面, 则其上沿大圆的两点之间的连线是曲线(curvilinear); 但是, 一个几何体完全可以依靠其本身得到描述, 地球表面就是一个 self-defined 空间, 其上沿大圆的两点之间的连线就是 a straight line——物理上一只蜜蜂就是这样 straightforwardly 从一点飞向另一点的.

1919年, 关于直线的定义经受了一次震动. 这一年, 两支科考队在日食发生时其光线经过太阳附近而到达地球的恒星位置进行了观测, 确定恒星光线经过太阳附近时确实发生了弯曲(图3). 这是对

3) Ruler(统治者)们认为他们有“recht”决定老百姓的行为, 都非常辛勤地为百姓制定行为的准则(ruler, 尺子). ——笔者注

4) Least action, 译为最小作用量, 有其不妥的地方, action is action, 而不是什么量. 容后议. ——笔者注



图2 飞机航线——受球面约束的直线

爱因斯坦广义相对论的一个重要论断的支持,该论断称大质量物体周围的空间是弯曲的.这里,自然地带来了一个观念上的冲击:我们是认定光线被重力场弯曲了呢,还是认为重力场弯曲了时空,而看起来弯曲的光线只不过是弯曲时空里的 a straight line 呢?显然,后一种观点有个方便之处,就是光线保持同样的行为:在任何空间中,光线都沿空间的直线前行.而所谓的直线,不妨就认为是光线的几何化.

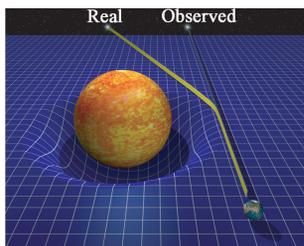


图3 恒星光线经过太阳附近时会被弯曲,此时在地球上的观测位置(我们的视觉习惯以为它应该出现的位置)并不是恒星的实际位置⁵⁾

在非欧几何中,或者说在弯曲空间中,测地线(geodesic,来自土地丈量的实践)取代了“straight line”的概念.对于度规张量为 g 的黎曼流形 M ,针对一条参数化形式为 $\gamma(t)$ 的曲线可定义能量泛函 $E(\gamma) = \frac{1}{2} \int g_{\gamma(t)}(\dot{\gamma}(t), \dot{\gamma}(t)) dt$, 则关于能量泛函的 Euler-Lagrange 方程为

$$\frac{d^2 x^\lambda}{dt^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\lambda \frac{dx^\mu}{dt} \frac{dx^\nu}{dt} = 0,$$

其中 $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$ 是 Christoffel 符号.这就是测地线方程,可看作是流形上自由粒子的轨迹.此公式反映广义相对论的一个重要思想:在引力场中,粒子沿引力所决定的流形上的测地线运动.当然,在黎曼几何中,测地线并不完全等同于距离最短曲线,区别在于测地线只是局域意义上的两点间的最短距离,且是用“匀速”参数化的.球上的大圆被两点分成的两个弧都是测地线,但只有一个是最短距离.

关于粒子运动走最短路径的思想,古已有之⁶⁾.早在人们对光的本性进行深入讨论之前, Fermat (1601—1665)就提出了 Fermat's principle of least

time:两点间光束的路径是用时最短的路径,即最小化 $\frac{1}{c} \int_a^b n ds$ 的路径,其中 n 为折射率. Hamilton 将这个思想类比到力学领域,认为运动的轨迹是将 $\int_a^b m v ds$ 最小化的路径,此即所谓的最小作用原理(least action principle). Hamilton,当然还有 Maupertuis, Euler 以及 Lagrange 等人,由此奠定了理论物理研究的范式.此话题太大,容以后讨论.最短路径,且不管是什么量最短,应该是直线的物理定义.直,就是不弯,不瞎耽误功夫(least action)! 确定了目的(终点)和环境(流形的度规)之后,以最短路径直扑目标,此乃粒子以及粒子之上层建筑(比如看见骨头的狗)的基本行为模式.

人类对于运动轨迹,以及存在之外形,所表现的曲直有天然的敏感,这可能和我们是用眼睛观察世界,而光线在到达我们眼睛前的局域环境中基本上是处在均匀介质中因而沿欧几里得几何意义上的直线传播有关.人类本能地抽象出欧几里得几何意义上的直线的概念,且“直”是个被赋予了正直、正义、正当等内容的词.与直线偏离的各种曲线中,圆具有最为人们接受的品质(圆和直线就全局等曲率这一点来看,它们是等价的,可以以相同的方式由线段加平移构造出来),因而也得到了最深入的研究和最广泛的应用.实际上,欧几里得几何的对象就是 straight line,各种 rectilinear 的图形和圆.或许古人认识到直线和圆是世界之形象的代表性抽象,所以赋予了造物主以手持圆规(图4)或者圆规加距尺(图5)的形象.



图4 油画 The ancient of days (William Blake, 1794). 构造天地的上帝手中所执的就是圆规.这暗示空间本来就是弯曲的?

- 5) 我们的眼睛以及我们对光学仪器成像的诠释一直下意识地认为远处光线是沿直线,想象中的欧几里得意义上的直线,到达我们的.我们的这种意识是那样的顽固,以致于我们宁愿认为广义相对论不好理解,而且甘愿让魔术师用几片镜子骗我们.——笔者注
- 6) 其实,如你观察人,或者狗,的目的明确的运动,会发现它们一定采取距离最短路径.这也是草地上插“禁止践踏”的标语牌往往少有效果的原因,因为它违反最基本的科学原理.——笔者注



图5 新疆吐鲁番地区发现的伏羲女娲图。伏羲、女娲分别呈男女形象侧身相对,各扬举一手,伏羲执矩,女娲执规

搁笔时忽然想到,爱因斯坦能够弄出广义相对论这种与空间曲直有关的理论,是否和德意志民族的较真性格有关?而懒得分辨是非曲直的地方,怕是很多大学里连广义相对论的课都开不出来吧。

参考文献

- [1] Newton I. The Principia(A new translation by I. B. Cohen and A. Whitman), University of California press, 1999
- [2] Coopersmith J. Energy: the Subtle Concept. Oxford University Press, 2010