

[物理故事]

洛伦兹收缩与光速不变

文_赵 峰

赵峰，1967年毕业于中国科技大学物理系，1981年于北京师范大学天文系获硕士学位，1987年于布鲁塞尔自由大学获博士学位。曾任北京师范大学研究生院副院长、物理系主任、中国引力与相对论天体物理学会理事长、中国物理学会理事。现为北京师范大学物理系教授，理论物理博士生导师、教育学博士生导师。



荷兰物理学家，著名的电磁学权威洛伦兹反复研究了迈克耳孙实验与光行差现象的矛盾。他认为，很可能存在一种以前不知道的物理效应：当一根长为 l_0 的尺子在以太中以速度 v 运动的时候，会沿运动方向有一个缩短效应，长度缩短为 l （图1）。而与运动方向相垂直的尺，不产生这一效应。他于1892年公布了这一“发现”。

这就是说，洛伦兹提出的收缩效应恰好抵消了地球相对于以太运动引起的光程变化，所以干涉条纹不会有移动。这一效应，后来被称为“洛伦兹收缩”。

现在考虑两个作相对运动的惯性系。 s 系的空间坐标为 (x, y, z) ，其中的时间用 t 计量。 s' 系的空间坐标为 (x', y', z') ，其中的时间用 t' 计量。先让 s' 系的3个轴分别与 s 系的3个轴重合，它们的原点也重合，现在让 s' 系沿 x 轴以速度 v 运动， x' 轴与 x 轴一直保持重合； y' 轴与 y 轴保持平行， z' 轴与 z 轴保持平行；让它们的钟也对准（如图2）。这时， s' 系与 s 系的时空坐标被称为伽利略变换，这是物理界早就熟知的。

洛伦兹注意到，从伽利略变换导不出洛伦兹收缩的公式。他还注意到，如果用伽利略变换，把麦克斯韦的电磁场方程式从 s 系变到 s' 系，即从用坐标 (x, y, z, t) 表示，变换到用坐标 (x', y', z', t') 表示，则电磁场方程式的表达式将发生改变，不能保持原来的样子。洛伦兹觉得，这似乎表明电磁规律在不同惯性系中将不同，似乎电磁规律不满足相对性原理。

洛伦兹反复思考这一问题，尝试解决办法。1904年，他终于又向前走了一步。他凑出一个新的坐标变换来取代伽利略变换，作为两个惯性系之间的变换。这个新变换后来被数学家庞加莱命名为“洛伦兹变换”。用这一变换可以推出洛伦兹收缩公式，而且，麦克斯韦电磁方程组的形式在洛伦兹变换下不变。

洛伦兹认为，自己得到的新变换不仅在数学形式上比伽利略变换复杂，而且物理意义也根本不同。伽利略变换中的 s 系和 s' 系是任意两个作相对运动的惯性系，它们的相对运动速度 v 与绝对空间没有关系。而新变换中的 s 系不是任意的惯性系，

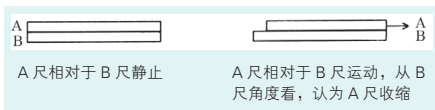


图1 洛伦兹的动尺收缩假设

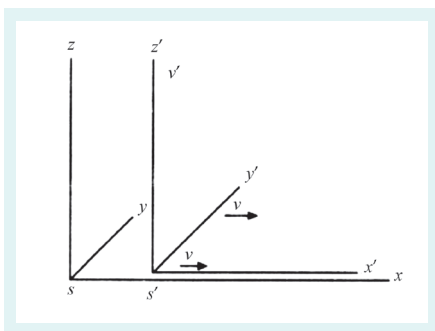


图2 伽利略变换

而是一个特殊的惯性系，是相对于以太静止，也即相对于绝对空间静止的参考系。 s' 系相对于 s 系的运动速度 v ，同时也就是相对于以太的运动速度，当然也就是相对于绝对空间的速度。

正当洛伦兹等人为自己的成绩感到自豪，以为他们已经解决了第二朵乌云造成的困难时，爱因斯坦的革命性论文发表了。

爱因斯坦这篇划时代论文的核心公式就是洛伦兹变换，他得到的变换公式与洛伦兹的公式完全相同，但物理解释却不同。爱因斯坦坚定地认为相对性原理是一条根本的自然规律，应该坚持。他认为不存在绝对空间，也不存在以太，没有优越参考系，所有的惯性系都是平等的。他认为洛伦兹变换是任意两个作相对运动的惯性系之间的变换， s 系和 s' 系是完全平等的。这种情况与伽利略变换类似，不过伽利略变换只能近似使用于远低于光速的情况。当相对运动速度很小， $v \ll c$ 时，洛伦兹变换就可以回到伽利略变换。所以，伽利略变换是洛伦兹变换在低速下的近似。当两个惯性系的相对速度 v 趋近光速时，这两种变换的差异就会明显表现出来。这时，只有洛伦兹变换可以使用，勉强使用伽利略变换，就会得到错误的结论。不过，我们日常生活中接触到的运动，其速度都是远远小于光速的，所以人们原来没有注意到伽利略变换的局限性。

爱因斯坦导出洛伦兹变换的方法也与洛伦兹完全不同。洛伦兹是为了解释迈克耳孙实验与光行差现象的矛盾，先提出洛伦兹收缩假设，进而凑出洛伦兹变换公式的。洛伦兹没有意识到这个变换的背后存在着根本性的原理。爱因斯坦则是先提出两条根本性的原理，然后在这两条原理的基础上用数学工具严格推导出洛伦兹变换。这两条原理，一条就是相对性原理，另一条是爱因斯坦本人提出的“光速不变原理”。

爱因斯坦本人高度评价自己提出的光速不变原理。他认为，自己的相对论

与牛顿经典物理学的分水岭就是光速不变原理。这条原理是说，“光的运动速度与光源相对于观测者的运动无关。”也就是说，在任何一个惯性系中的观测者，不管它相对于光源是否运动，运动速度是多少，测得的同一束光的速度都相同，都是同一个值 c 。

举一个例子，大家就可以看到这一原理有多么不可思议。如果相对于光源静止的观测者测得的光速是 c 。那么一个迎着光以速度 v 运动的观测者测得的速度是多少呢？从人们的常识和物理学中的速度迭加原理看，都应该是 $(c+v)$ 。一个以速度 v 与光同向奔跑的观测者测得的光速是多少呢？从常识和迭加原理看，都应该是 $(c-v)$ 。爱因斯坦的光速不变原理却告诉我们，这3个观测者测得的光速都是同一个值 c 。这显然不符合速度迭加原理（即平行四边形法则），也似乎与一般人的常识和生活经验完全不符。这一原理太难以让人接受了。

爱因斯坦怎么会想到这样一条原理呢？这是因为他觉得电磁学规律是大量实验证明的，应该确信麦克斯韦电磁理论的正确性。另外，相对性原理是一条根本性原理，也不应该轻易放弃。按照这一原理，麦克斯韦电磁规律应该在所有惯性系中都相同。然而这一理论的公式中有一个常数 c ，即真空中的光速。如果相对性原理对电磁规律成立，那么在所有惯性系中岂不光速都是同一个值 c ，与这些惯性系之间的相对运动无关吗？如果各惯性系中的 c 不同，电磁规律的形式在各惯性系中就会有差异，这似乎与相对性原理有矛盾。

正是这一矛盾，迫使洛伦兹在电磁理论和相对性原理之间作一选择，他坚持了电磁理论，放弃了相对性原理。而爱因斯坦认为电磁理论和相对性原理都是经过大量实验观测证实的，都应该坚持。这样，爱因斯坦就遇到了如何认识光速的问题。

他想到了自己在阿劳中学时思考过的“光速悖论”：既然光是电磁波，那

么一个以光速追随电磁波运动的人，岂不就应该看到一个不随时间变化的波场吗？可是为什么谁也没有见过这种现象呢？这至少说明光相对于任何观测者都不可能静止。看来，光对任何观测者都应该运动。但运动速度都相同，都是 c 吗？他又想到了自己思考过的以光速飞翔的小孩，他能从自己举在前方的镜子中看到自己的像吗？光相对于小孩的脸和镜子的速度如果是 c ，光相对于地面的速度不就会是 $2c$ 吗？可是谁也没有见过以 $2c$ 运动的光，见到的光速都是 c ，似乎光速不可能大于或小于 c ，只能是同一个值 c 。

对双星轨道的观测，支持光速与光源运动速度无关的看法。爱因斯坦知道这一观测结果，其他科学家也知道这一结果，但一般人都没有从中悟出更深刻的道理。只有爱因斯坦，认识到了这一观测结果支持自己关于光速不变的猜想。从而他最终以原理的形式把它提了出来。

应该说明的是，提出光速不变原理对爱因斯坦也是一件艰难的事情。他曾在这个问题上耗费了大量时间。爱因斯坦后来回忆说，坚持相对性原理比较容易，伽利略、牛顿和此后的物理学家都在使用这一原理，只是电磁理论与伽利略变换产生矛盾之后，洛伦兹等人对这一原理产生了怀疑。爱因斯坦在奥林匹亚科学院时期看过马赫的著作，马赫不承认以太，也不承认绝对空间，坚定地认为相对性原理正确。爱因斯坦从那时起就赞同马赫的观点，认为相对性原理是一条应该坚持的、正确的根本性原理。

光速不变原理则不同，以前没有人提出过。而且，光速不变原理似乎和力学中的速度迭加原理（即平行四边形法则）矛盾。这是怎么回事呢？这个问题长时期困扰着年轻的爱因斯坦，他觉得“这可真是个难解之谜”。■

本文节选自上海教育出版社出版的《爱因斯坦与相对论——写在广义相对论创建100周年之际》，有删改。