

狭义相对论困难的思考- 狭义相对论效应与加速度之间的关系

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员 (作者为中国科学院高能物理所研究员)

xiandaiwulixue@21cn.com, 1922538071@qq.com

Abstract: 物理学是一门自然科学, 它的理论和应用基础是建立在实验和观测上的. 而实验和观测总是离不开某一个具体的参考系(或坐标系), 加上历史上把惯性系之间的伽利略相对性原理和伽利略变换推广到狭义相对性原理和洛伦兹变换, 从而建立狭义相对论这样的背景, 许多物理学工作者以参考系的属性(惯性系或非惯性系)来界定狭义相对论的范畴是自然的, 不足为怪. 至于这种界定的优劣, 那就是属于“仁者见仁, 智者见智”的事情了.

[Li X. 狭义相对论困难的思考- 狭义相对论效应与加速度之间的关系. *Academ Arena* 2017;9(16s): 139-148]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 3. doi:[10.7537/marsaj0916s1703](https://doi.org/10.7537/marsaj0916s1703).

Keywords: 物理学; 力学; 因果; 分析; 数学; 方法

1. Introduction

物理学是一门自然科学, 它的理论和应用基础是建立在实验和观测上的. 而实验和观测总是离不开某一个具体的参考系(或坐标系), 加上历史上, 把惯性系之间的伽利略相对性原理和伽利略变换推广到狭义相对性原理和洛伦兹变换, 从而建立狭义相对论这样的背景, 许多物理学工作者以参考系的属性(惯性系或非惯性系)来界定狭义相对论的范畴是自然的, 不足为怪. 至于这种界定的优劣, 那就是属于“仁者见仁, 智者见智”的事情了.

1966年, 人们做过实验让粒子做接近光速的高速圆周运动, 粒子既有很高的速度, 也有很高的加速度. 实验表明, 粒子寿命的变化只与速度有关, 而与加速度无关. 在验证时间膨胀效应的实验中, 有许多实验涉及到加速过程, 覆盖的加速度范围非常广. 例如在原子钟环球航行实验中, 时钟经受的向心加速度为 $10^{-3}g$

(g 代表地球表面的重力加速度); 在转动圆盘的实验中, 光源的向心加速度达 10^5g ; 在穆斯堡尔效应的温度依赖性实验中, 晶格中原子核振动的加速度以及作圆周运行的 μ 介子的向心加速度都高达 $10^{16}g$ 以上. 尽管加速度范围这么广, 但最终, 几乎所有的实验都得到了与狭义相对论预言的由速度引起的时间膨胀效应基本相符的结果. 这一事实表明, 加速度对实验中的时间膨胀没有任何贡献. 即使我们承认时间膨胀效应的存在, 也只能说这些效应都是由速度引起的时间膨胀效应, 而“非加速度效应”.

相对论中引起广泛兴趣的一个问题是“孪生子佯谬”问题, 它曾困扰了物理学界几十年, 特别是 50 年代掀起了空前激烈的争论, 发表了许许多多的文章. 然而时至今日, “孪生子佯谬”的问题, 可以说不但在实验上而且在理论上都已经很好地解决了, 因而不妨将之改称为“孪生子效应”. 可是, 近年国内有人认为“孪生子效应”并没有从理论上得到解决, 而且沿用当今的理论(相对论)可能导致某观测者看到“返老还童”的荒谬结果. 这种见解其实是把两个坐标系中观测到的钟慢效应, 误认为是某个观测者所“看到”的结果.

根据 Einstein 的观点, 狭义相对论效应不具有累积效应. 如果不具有累积效应, 那么在实验中怎么测量狭义相对论效应? 时间与长度的变换符合洛伦兹变换, 您如何理解双生子佯谬和潜水艇悖论? 假设一个物体在运动方向上的长度为 l , 开始由静止做加速运动, 当速度达到 $0.99c$ 时开始减速直到静止, 那么开始与最后的长度是否相等? 如果速度相等说明不具有累积效应, 时间变换也符合洛伦兹变换, 为什么现代物理学的实验证明时间膨胀(譬如 μ 子绕地运行)具有累积效应, 而长度收缩是瞬时效应?

从 Einstein 狭义相对论我们知道, 运动物体发生“尺缩”、“钟慢”等效应. 运动物体“尺缩”效应在狭义相对论看来并不是动体自身物质的收缩, 只是时空的一种性质, 是时空测量中必然产生的效应, 动体的内部结构不会发生任何变化; 按 Einstein 自己的说法: 狭义相对论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论, 根本不考虑动体物质的具体结构和动力学效应问题, 这样狭义相对论中动体的“尺缩”“钟慢”等效应不是一种伴随动体物质结构变化的物理实在以及动体运动过程中基本性物理量的真实变化, 在狭义相对论中, 根据洛伦兹变换运动物体的长度在运动方向上收缩, 是观察效应, 还是本质规律? 洛伦兹认为这种收缩效应

是实在的、客观的，是真实的动力学效应，这种收缩效应引起物质内部结构和物理性质变化，对物质来说具有普遍意义。狭义相对论中‘钟慢、尺缩’属运动学效应，而广义相对论中，它们已属动力学效应，不应该是观察效应，而是物理的真实性。Einstein 曾说过：“……仅仅是外部关系的结果，不是一种真正的物理变化”。如果仅仅是观测效应，显然不符和 Einstein 的哲学观——“有一个独立于知觉之外的客观世界是一切自然科学的基础”。

为了导出狭义相对论，爱因斯坦作出了两个假设：运动的相对性(所有匀速运动都是相对的)和光速为常数(光的运动例外，它是绝对的)。他的好友物理学家 P. Ehrenfest 指出实际上蕴涵着第三个假设，即这两个假设是不矛盾的。物体运动的相对性和光速的绝对性，两者之间的相互制约和作用乃是相对论里一切我们不熟悉的时空特征的根源。(李新洲，《寻找自然之律---20 世纪物理学革命》)

2、Lorentz transformation 的修正

如果认为加速运动的物体引力质量增加、长度缩短、时钟延缓，减速运动的物体引力质量减小、长度增加、时钟加速，这样我们便可以看出自然界的改变具有对称性。这样 twins paradox 便可以迎刃而解，因为双生子在运动过程中既有加速过程，也有减速过程，时钟既有延缓过程，也有加速过程，所以见面时年龄应当相同，潜水艇悖论根本不存在。

在上文的理想实验中，物体的引力质量(或者长度)开始与最后应当相等，静止引力质量(或者长度)是绝对的，运动引力质量(或者长度)是相对的，运动引力质量(或者长度)是在实验过程中观察者测得的引力质量(或者长度)，并非内禀引力质量(或者长度)，不同观察者测得的引力质量(或者长度)不同。

因鉴于此，现将 Lorentz transformation 修正如下：

$$t=t_0 [1-(\int_0^t \text{adt})^2/c^2]^{+1/2}, l=l_0 [1-(\int_0^t \text{adt})^2/c^2]^{+1/2}, \text{加速时取负号, 减速时取正号.}$$

根据 space-time 平权理论，加速运动的物体时钟延缓与长度缩短本质是一致的，速度不变(即能量不变)时长度与时间不变，进一步说明了场的 space-time 本质观点的正确。根据这个修正，上面的潜水艇悖论自然不存在，潜水艇对于不同的观察者看都应当是相对于海平面静止的。这样修正与 Lorentz transformation 并不矛盾，与上面的实验也符合，狭义相对论效应不是由加速度决定，而是由加速度对于时间的积分决定。(我认为这一修正可能只是近似，可以从广义相对论推导而来，希望有关数学家可以做这方面的工作。)

3、狭义相对论效应与广义相对论效应的统一

狭义相对论与广义相对论是紧密地联系在一起，有质物体的最主要的作用就是产生空间曲率，一切物体在重力场中运动的轨道之所以会发生弯曲在于空间本身是弯曲的，引力质量的大小是物体周围空间曲率大小的表现形式，因此加速运动的物体引力质量的增加可以认为从 space-time 中获得，此时引力场增强。不同观察测得同一物体的引力质量不同，但是宇宙的总能量不变，进一步说明能量守恒定律的正确性，即狭义相对论效应是能量守恒定律的表现形式。相对论中的时间、长度、引力质量不但具有相对性，同时具有绝对性，是相对性与绝对性的统一，Bohr 的观点具有一定的局限性。广义相对论揭示了物质对 space-time 结构的反作用。因此一个粒子的引力质量并不是它本身所特有的，而是由宇宙中所有其它粒子决定的。这样运动引力质量与静止引力质量之间便统一起来，从根本上解决了上面的问题。狭义相对论可以从广义相对论推导出来。我们在地球上之所以能站起来行走，是由于一切天体都向地球发射引力波。按照广义相对论，只在引力作用下运动的物体，如果用它自己的时钟测量，它总是走者一条费时最多的路线。

设想宇宙中的每一个粒子都带有自己的时钟(一个给定的时间)，固有时间(绝对时间)是对相对时间流逝的仅有的有内禀特性的度量方式。例如当物理学家列出某种亚核粒子的寿命时，他们指的是用粒子自身的钟测得的寿命，而不是实验者测得的寿命。因为如果用实验者测得的寿命，还必须说明粒子与实验者的相对加速度，根据广义相对论它不是一个内禀的物理量，因此会因不同实验而异。相对论天空存在着“两朵乌云”，这是 Einstein 发现的：第二朵乌云：在狭义相对论中，任何事物都随观察者的不同而不同。它还包含下面两层意思：一个是每个观察者都只承认自己的结论正确，其他观察者的结论不正确；另一个是所有观察者都对。想在两个观察者中决定谁是正确的，既没有经验上的方法，也没有理论上的方法。这就是相对论的相对性。很明显，这个观点与经典天体力学中的观念相矛盾。“Einstein 自从量子力学革新了物理学中的思想方法以后，到他逝世为止，一直想要保持经典天体力学中的观念，即一个系统的客观物理状态必须跟观察它的方式完全无关。虽然 Einstein 坦白地承认，他对这方面达成一个完整的解答的希望到目前为止尚远未满足，而且他还没有证明这一观点的可能性，他认为这是一个有待解决的问题。(W. 泡利的《相对论》补注 23)”后面我们将分析根据引力场的时空本质的观点，这朵乌云根本不存在，观察者运动状态不同测量物理量不同，主要是相对时空作用的结果，但并非实证主义的观点。

在 Lorentz transformation 修正后，狭义相对论仍然仅适用于惯性参照系。由于相对 space-time 总会影响

绝对 space-time 的结构, 因此不可能通过追求物理学世界图景的客体性的意向从其实在图景中排除观察及其制约着的效应, 重新解释相对论与量子力学, 不过相对论效应与测不准原理也是客观的, Einstein 与 Bohr 分别看到了问题的一个方面. 这样修正也符合 Einstein 的基本思想.

由于狭义相对论的几何基础是 Minkowski 空间, 它仅适用于直线运动. 在曲线运动中速度的大小和方向都可能变化, 虽然曲线的每一点可以认为是直线段, 但是总体上不能看作直线. 因此曲线运动必须用广义相对论解释, μ 子作圆周运动时间延缓, 必须用广义相对论研究. 狭义相对论应当是广义相对论的特例. 在没有物质的空间中, 场方程的解就是 Lorentz transformation.

广义相对论认为, 万有引力实质上只不过是弯曲时空的物理效应, 时空弯曲由物质的分布及其运动决定. 从大范围讲, 时空是弯曲的, 平直时空只存在于小的局部范围内. 这就是为什么在宇宙中实际上总是找不到严格的惯性系, 而只能找到近似的局部惯性系的原因.

孪生子效应之所以出现“佯谬”或“悖论”, 不在于留在地球上的孪生子所处的惯性参考系中是否观测到旅行孪生子的时钟变慢, 问题的症结在于从旅行孪生子所处的非惯性参考系中是否也能得到同样的结果. 从非惯性系的观点来处理这个问题, 借用发展广义相对论所用的一套张量分析数学工具进行计算是方便的. 在这个意义上说, 孪生子效应的比较令人信服地解决还是与广义相对论有关的.

4、爱因斯坦的早年哲学观

(一) 唯心主义者

第一阶段唯心主义者(1879年——1891年), 当时 Einstein 是一个宗教信仰者, 一个唯心主义者. 他在《自述》里写道: 那时“我还是深深地信仰宗教”的. 他作为一个有思想、有感情的人, 出于对追名逐利的世俗传统的厌恶, 因而到宗教中寻找出路和安慰. 但是, “这种信仰在我 12 岁那年就突然中止了.” 由于读了通俗的科学著作, Einstein 很快相信《圣经》里的故事有许多不可能是真实的.

(二) 实证主义者

第二阶段实证主义者(1891年——1916年), 它自1891年起像一根红线一样贯穿于 Einstein 的一生, 成为他的哲学思想的牢固基石和本质特征. 十七世纪牛顿时代的物理革命是文艺复兴人文主义思想的直接结果, 而二十世纪初的物理学变革是十九世纪末哲学变革的结果. 爱因斯坦统一性思想是建构在物质性基础之上的, 因此, 它的最显著、最根本的特征就是坚持了唯物主义路线. 也可以说, 这就与恩格斯首先提出的“物质性统一”思想保持了本体论意义上的一致. 恩格斯认为世界是统一的, 并且这个统一的基础是它自身的物质性: “世界的真正的统一性是在于它的物质性, 而这种物质性不是魔术师的三两句话所能证明的, 而是由哲学和自然科学长期的和持续的发展来证明的.”

上大学时, 爱因斯坦有几位卓越的数学老师, 按理说应该在数学方面得到深造, 可是他“大部分时间却是在物理实验室工作, 迷恋于同直接经验接触”. 他曾设计了用热电偶检测地球运动引起光速变化的实验, 由于得不到设备和支持, 实验最终未能完成. 爱因斯坦的女婿凯泽尔在传记中写道: “谁也无法使他参加数学讨论会, 他还没有看到掌握存在于数学之中的创造力的可能性. 他希望完全凭经验进行研究, 以适应他当时的科学情绪. 作为一位自然科学家, 他是一位纯粹的经验论者.” 凯泽尔断言早期的爱因斯坦是“纯粹的经验论者”固然言过其实, 但至少道出了爱因斯坦当时的经验论思想倾向是相当明显的.

爱因斯坦的这一倾向也表现在他与奥斯特瓦尔德的关系上. 在 1901 年那个心情沉重的春天, 面对失业的爱因斯坦于 3 月 19 日和 4 月 3 日两次给这位莱比锡大学的化学教授写信, 恳请谋取一个实验员的职位(看来他相信自己是一个实验论者). 他说他发表的毛细管论文是受到奥斯特瓦尔德《普通化学教程》一书的启发, 说自己是“一个对绝对测量很熟悉的数理工作者”. 爱因斯坦的父亲也于 4 月 13 日贸然给奥斯特瓦尔德写信, 为儿子求职, 说他儿子“在当代所有大物理学家中最崇敬奥斯特瓦尔德”.

爱因斯坦选中奥斯特瓦尔德并非偶然. 因为奥斯特瓦尔德不仅是一位第一流的物理化学家, 而且还是世纪之交一位活跃的哲人科学家. 他反对对自然现象作纯力学的解释, 坚定地怀疑并批判了力学自然观. 以他为代表的能量论者认为, 只要能测量观察中所出现的各种量(例如能量、压力、体积、温度、热、电位、质量等)即可, 用不着把它们归结为假想的原子过程或动力学的量. 他们谴责像以太这类具有无法直接观测到的性质的概念. 他们发出号召, 要求重新考察作为所有物理推理基础的基本原理, 尤其是要考虑牛顿运动定律、力和作用的概念、绝对运动和相对运动概念的适用范围. 所有这些破除迷信的要求(除了反原子论), 肯定与年轻的爱因斯坦的志趣十分契合, 而且现象论的思想也与他的经验论追求相近.

5、洛伦兹变换是动力学效应

我们认为, 对于高速力学运动, 实际上存在着不同性质的时空变换. 我们把它们分别称为“运动学变换”与“动力学变换”: (相对论的)“运动学变换”指的是: 对于同一物体在不同惯性坐标中测量它的长度、运动

所经历的时间间隔以及质量, 此时被测物体本身运动状态不变, 只是由于测量系统与被测物体的关系不同而得到不同结果, 这时自然不存在物体属性的实在性变化. 动力学变换(效应)指: 在同一坐标系、针对同一物体的静止和运动两种不同状态, 测量其长度、运动所经历的时间间隔以及质量. 此被测物体由静止到运动, 经历一个加速过程, 此时, 长度收缩、时间延长、质量增加不仅是观察效应, 而且是物体属性变化. 这是由于有关“高速运动介子寿命的延长”“加速器中被加速电子、质子的惯性质量加大”, 以及“铯原子钟绕地球飞行后变慢”的实验告诉我们: 物体的实在属性确实发生变化, 而不是观察效应. 至于这种变化的机制, 还有待进一步研究. 狭义相对论就其本身的内容来说, 是研究不同惯性系间时空坐标变换. 因此, 这种物质属性的变化已超出了狭义相对论的范畴. ——钱时惕

洛伦兹认为这种收缩效应是实在的、客观的, 是真实的动力学效应, 这种收缩效应引起物质内部结构和物理性质变化, 对物质来说具有普遍意义. 从 Einstein 狭义相对论我们知道, 运动物体发生“尺缩”、“钟慢”等效应. 运动物体“尺缩”效应在狭义相对论看来并不是动体自身物质的收缩, 只是时空的一种性质, 是时空测量中必然产生的效应, 动体的内部结构不会发生任何变化; 按 Einstein 自己的说法: 狭义相对论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论, 根本不考虑动体物质的具体结构和动力学效应问题, 这样狭义相对论中动体的“尺缩”“钟慢”等效应是不是一种伴随动体物质结构变化的物理实在以及动体运动过程中基本性物理量的真实变化. 狭义相对论中“钟慢、尺缩”属运动学效应, 而广义相对论中它们已属动力学效应, 不应该是观察效应, 而是物理的真实性. Einstein 曾说过: “……仅仅是外部关系的结果, 不是一种真正的物理变化”. 如果仅仅是观测效应, 显然不符和 Einstein 的哲学观——“有一个独立于知觉之外的客观世界是一切自然科学的基础”.

文章前面分析了洛伦兹变换, 说明了其真实含义, 使狭义相对论时钟收缩效应与广义相对论的时钟收缩效应统一在一起, 圆满地解释了双生子佯谬和潜水艇悖论, 说明了相对性原理正确的原因.

狭义相对论中的运动长度与运动时间其实是相对 space-time, 并非绝对 space-time, 这是 Einstein 实证哲学观的体现. 马赫的观点是, 物体的运动不是绝对空间中的绝对运动, 而是相对于宇宙中其他物质的相对运动, 因而不仅速度是相对的, 加速度也是相对的; 在非惯性系中物体所受的惯性力不是“虚拟的”, 而是一种引力的表现, 是宇宙中其他物质对该物体的总作用; 物体的惯性不是物体自身的属性, 而是宇宙中其他物质作用的结果. 马赫的精辟见解被 Einstein 取名为马赫原理. 狭义相对论与广义相对论中的时钟延缓本质上是一样的, 加速运动的物体激发的引力场的增强, 空间曲率变大, 相当于引力质量增加, 长度缩短, 时钟延缓; 减速运动恰好相反. 如果将引力场与产生引力场的源(物质)作为一个整体来考察. 则牛顿的万有引力定律是从整体的角度来考察万有引力场, 比如引力质量、惯性质量等描述的是物体和场这个整体的物理性质. 只要产生场的物体的整体性质在空间的状态不随时间变化、也不随物体的运动而变化. 我们就认为这些引力质量和惯性质量总是守恒的.

在爱因斯坦的狭义相对论论文中, 既有大胆的假设和虚构的成分(这是理性论思想的体现), 也有明显的经验论和操作论的成分. 而且, 马赫的思维方式对爱因斯坦的影响也十分明显, 它显著地表现在两个相互关联的方面. 第一, 爱因斯坦在他的论文开始就坚持, 只有对各种概念, 尤其是对时间和空间概念的意义进行认识论的分析, 才能理解物理学的基本问题. 第二, 爱因斯坦认为各种感觉, 也就是各种“事件”所提供的东西等同于实在, 而不是把实在放在感觉经验之外或感觉经验之后的位置上. 根据 Einstein 的观点, 狭义相对论效应不具有累积效应. 如果不具有累积效应, 那么在实验中怎么测量狭义相对论效应? 时间与长度的变换符合洛伦兹变换, 您如何理解双生子佯谬和潜水艇悖论? 假设一个物体在运动方向上的长度为 l , 开始由静止做加速运动, 当速度达到 $0.99c$ 时开始减速直到静止, 那么开始与最后的长度是否相等? 如果长度相等说明不具有累积效应, 时间变换也符合洛伦兹变换, 为什么现代物理学的实验证明时间膨胀(譬如 μ 子绕地运行)对于空间具有累积效应, 而长度收缩对于时间是瞬时效应?

有一种比较普遍的观点, 即相对论是一种基于测量的理论. 关于相对性理论是一个测量理论, 有美国大学物理教科书编者 R. Resnick 先生也作过如下评述: 在经典力学中, 运动影响测量也不是一个奇怪的概念. 例如, 由测量得到的声音或者光波的频率与声源或者光源相对于观测者的相对运动有关. 这一现象称为 Doppler 效应, 他是每一个人都熟悉的现象(比如汽车从身边驶过那个机声声调的变化). 虽然, 所有的物理学都认为地面上的观测者和行驶中的火车上的观测者所测得的同一运动物体的运动速度, 动量和动能数值是不同的, 但是在经典物理学中, 空间和时间的测量是绝对的. 而在相对性理论中, (除了光速的测量是绝对的, 与观测者是否在运动无关) 包括空间与时间的测量都是相对于观测者的. 不仅实验事实推断起来与经典物理相矛盾, 而且只有考虑了时间与空间的相对性以后, 才能使依据物象来完美构造的物理定律对于所有的观测者来说是不变的, 即物理定律的绝对性. 的确, 如果像时间和长度的经典概念所要求的那样, 放弃

Maxwell 电磁场方程的确定形式, 那么留给我们的将是一个任意而又复杂的方法系统. 比较起来, 相对性理论那个方法才是确定的和简单的. 所以, 相对性理论应当称作绝对论. 这个理论的主要之点不在于测量数值的相对效应, 而在于把物理定律的相对性移去了, 反倒强调了物理定律的绝对性, 即所谓事物运动规律不依赖于观察者的立场.

从 Einstein 狭义相对论我们知道, 运动物体发生“尺缩”、“钟慢”等效应. 动体“尺缩”这种收缩效应在狭义相对论看来并不是动体自身物质的收缩, 只是时空的一种性质, 是时空测量中必然产生的效应, 动体的内部结构不会发生任何变化; 而洛伦兹认为这种收缩效应是实在的、客观的, 是真实的动力学效应, 这种收缩效应引起物质内部结构和物理性质变化, 对物质来说具有普遍意义. 按 Einstein 自己的说法: 狭义相对论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论, 根本不考虑动体物质的具体结构和动力学效应问题, 这样狭义相对论中动体的“尺缩”“钟慢”等效应是一种伴随动体物质结构变化的物理实在以及动体运动过程中基本性物理量的真实变化.

根据 Einstein 的观点, 在狭义相对论中, Lorentz 收缩应当属于观察效应, 然而到了广义相对论时空弯曲(收缩)是本质规律. **它确实是一种观察得到的结果, 但是对于运动体系确实存在这种规律.** 一维可以理解为数轴, 理论上有了原点、单位、方向就可以使每一个时间点与一个数值(时间)对应起来. 但我们某时刻总是在某时间点上及不能倒退, 也不能超前, 也不能让时间停止. 这样的时间可以与时钟程对应关系. 但建立坐标系时, 数轴变成了坐标轴. 坐标轴上的刻度, 表示的不再是坐标轴上的值, 而是扩展到整个坐标系, 即坐标线(二维)和坐标面(三维). 时空参考系中的时间, 是四维时空中的一维. 时钟的某一时刻都应该有时空图中的坐标线、坐标面与之对应, Lorentz transformation 中是有这些东西的, 称之为同时性. 但在非惯性系中, 由于产生了时空弯曲, 同时性失去了原有的意义.

在相对论中, Einstein 指出, 空间收缩的效果是可测量的. 然而 Einstein 却又宣称, 对同一参考框架, 两不同的时空度规(metric)解(例如: 史瓦西(Schwarzschild)解和各向同性的解)在物理上是等效的. 基于史瓦西解和各向同性的解产生相同的光线偏移, Einstein 评论, “应该注意, 这个结果和相关的理论, 同样地不被我们的坐标系统的任意选择所影响”. 宋健说, 关于 GPS 能否检验收缩因子的存在这个问题, 至今使研制 GPS 的人头痛. 航天部门林金教授已多年研究此问题, 目前还介入指导中国的 GPS 研制. 泡利在其《相对论》一书中有一段评论(上海科学技术出版社, 凌德洪等译): “. 我们知道, 这种收缩是和同时性的相对性有关的, 正因为这个理由, 曾经有过这样的论断, 这种收缩仅是一种‘表观’收缩, 换句话说, 它是由于我们的时空测量所引起的. 但是我们不认为这样的观点是合适的, 而认为在任何情况下洛伦兹收缩原则上是可以观察的. 在这一方面, 爱因斯坦的理想实验是富于启示性的. 它证明了观察洛伦兹收缩所必须的, 测定空间上相互隔开的两事件的同时性, 可以完全借助于量杆来完成, 而不必用时钟. 我们设想用具有相同的静止长度 L_0 的两个杆 A_1B_1 和 A_2B_2 , 它们分别以大小相等, 方向相反的速度 v 相对于 K 运动. 当 A_1 和 A_2 , B_1 和 B_2 分别重合时, 我们在 K 中标出这两点并记为 A^* 和 B^* (由于对称性的理由, 这种重合在 K 中是同时发生的). 因而 A^*B^* 的距离当用在 K 中为静止的杆来度量时, 其值为 $L=L_0*(1-v^2/c^2)^{0.5}$. 由此可知洛伦兹收缩不是单一量杆所量出的性质, 而是两根彼此作相对运动的同样的量杆之间的倒易关系, 这种关系原则上是可以观察的.”

瓦瑞恰克是在狭义相对论诞生之初就对相对论作出重要贡献的物理学家, 发现了相对论速度空间可以用罗氏几何来理解. 对于相对论的时空观的提法, 他提出了自己的看法, 就是认为“尺缩”仅仅是由“校准时钟和度量长度的方法所引起的.”. 这是他在莱比锡《物理学的期刊》上一篇《关于艾伦菲斯特的悖论》论文中提出的, 爱因斯坦觉得“对这些意见是不应当置之不理的, 因为它们可能引起混乱.” 于是写了《关于艾伦菲斯特的悖论——对 V. 瓦瑞恰克的论文的意见》, 发表在同一刊物上, 文章短小, 似乎击中要害, 我们引述最重要的文字(《爱因斯坦文集》第二卷, 范岱年等编译): “这一点瓦瑞恰克先生或许会承认. 但是他也也许会坚持这样的观点, 认为洛伦兹收缩的根源完全在于任意规定‘我们校准时钟和度量长度的方法’. 下述理想实验表明, 这种观点是多么缺乏根据. 设有两个(静止时相比较)等长的量杆 $A'B'$ 和 $A''B''$, 它们能够沿着一个非加速的坐标系的 X 轴, 同 X 轴平行的, 以同样的取向滑动. 当 $A'B'$ 向 X 轴的正方向, $A''B''$ 向 X 轴的负方向, 以任意大的恒速度运动时, $A'B'$ 和 $A''B''$ 应当相互滑动而过. 这时端点 A' 和 A'' 在 X 轴的一个 A^* 点相遇, 端点 B' 和 B'' 在 X 轴的一个 B^* 点上相遇. 于是, 根据相对论, 距离 A^*B^* 小于量杆 $A'B'$ 和 $A''B''$ 中任何一个的长度, 这是可以由一个在静止状态中同线段 A^*B^* 相重合的量杆来加以证实的.”

从 Einstein 狭义相对论我们知道, 运动物体发生“尺缩”、“钟慢”等效应. 运动物体“尺缩”效应在狭义相对论看来并不是动体自身物质的收缩, 只是时空的一种性质, 是时空测量中必然产生的效应, 动体的

内部结构不会发生任何变化；按 Einstein 自己的说法：狭义相对论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论，根本不考虑动体物质的具体结构和动力学效应问题，这样狭义相对论中动体的“尺缩”“钟慢”等效应不是一种伴随动体物质结构变化的物理实在以及动体运动过程中基本性物理量的真实变化，在狭义相对论中，根据洛伦兹变换运动物体的长度在运动方向上收缩，是观察效应，还是本质规律？洛伦兹认为这种收缩效应是实在的、客观的，是真实的动力学效应，这种收缩效应引起物质内部结构和物理性质变化，对物质来说具有普遍意义。狭义相对论中‘钟慢、尺缩’属运动学效应，而广义相对论中，它们已属动力学效应，不应该是观察效应，而是物理的真实性。Einstein 曾说过：“……仅仅是外部关系的结果，不是一种真正的物理变化”。如果仅仅是观测效应，显然不符和 Einstein 的哲学观——“有一个独立于知觉之外的客观世界是一切自然科学的基础”。

钱时惕讲：“我们认为，对于高速力学运动，实际上存在着不同性质的时空变换。我们把它们分别称为“运动学变换”与“动力学变换”：（相对论的）“运动学变换”指的是：对于同一物体在不同惯性坐标中测量它的长度、运动所经历的时间间隔以及质量，此时被测物体本身运动状态不变，只是由于测量系统与观测物体的关系不同而得到不同结果，这时自然不存在物体属性的实在性变化。动力学变换（效应）指：在同一坐标系、针对同一物体的静止和运动两种不同状态，测量其长度、运动所经历的时间间隔以及质量。此被测物体由静止到运动，经历一个加速过程，此时，长度收缩、时间延长、质量增加不仅是观察效应，而且是物体属性变化。这是由于有关“高速运动介子寿命的延长”“加速器中被加速电子、质子的惯性质量加大”，以及“铯原子钟绕地球飞行后变慢”的实验告诉我们：物体的实在属性确实发生变化，而不是观察效应。至于这种变化的机制，还有待进一步研究。狭义相对论就其本身的内容来说，是研究不同惯性系间时空坐标变换。因此，这种物质属性的变化已超出了狭义相对论的范畴。” Einstein 说过：……这也许是物理学的一个特征，某些基本问题可能会永远纠缠着我们。狄拉克临终前提醒我们：……对狭义相对论的认识还远没有完善。2005年6月，英国的 J. Dunning-Davies 教授曾说过一段很有意思的话：“在 20 世纪末，许多人仍象对待圣物那样盲目相信由相对论推出的任何结果。他们忘记了所有理论都是人为的，而宇宙却不是人造的。任何理论或模型，只不过是微不足道的人类智力作出的某种解释。但许多人如此深信某个理论的正确，而知名权威们竟不惜代价地阻止任何人对这些理论提出任何问题。Dingle（对相对论）的忧虑至今被隐藏起来，Thornhill 对狭义相对论（SR）的有效性的怀疑难见天日。……实际上，主流物理学并非如大多数人所以为的那样坚实与无懈可击。”

根据 Einstein 的观点，狭义相对论效应不具有累积效应。如果不具有累积效应，那么在实验中怎么测量狭义相对论效应？时间与长度的变换符合洛伦兹变换，假设一个物体在运动方向上的长度为 1，开始由静止做加速运动，当速度达到 $0.99c$ 时开始减速直到静止，那么开始与最后的长度是否相等？如果速度相等说明不具有累积效应，时间变换也符合洛伦兹变换，为什么现代物理学的实验证明时间膨胀（譬如 μ 子绕地运行）具有累积效应，而长度收缩是瞬时效应？

我们生活的世界是 3 维线性空间，加上时间维是 4 维。在这个空间上给出一个度量（就是一个二次型矩阵）：标准的情形 $\text{diagonal}(1, 1, 1, -1)$ 。观测者的参考系不同，这个度量也不同。有人认为度量是人为给定的，因为度量的选择不能改变整个空间或流形（就是高维的曲面，广义相对论中存在弯曲）的微分结构和拓扑结构。度量的选取乃是观察者的感觉，同一个客体可以给出不同的度量，但是最终决定空间结构的拓扑量和微分结构不会改变（Milnor 怪球是拓扑同胚但微分结构不同的例子）。‘钟慢、尺缩’等度量的改变是观察效应，还是物理的真实性，决定于我们认为到何种程度上的结构是真实存在的。（拓扑，微分，度量是逐步细化、逐步更高层次的结构。）我们处理的眼光角度不同，得出“‘钟慢、尺缩’等度量的改变是观察效应，还是物理的真实性”问题的答案就不同。

笔者认为，Lorentz transformation 不是观测效应，是物质运动过程中的真实变化，不具有累积效应，它的本质只能通过广义相对论才能理解。

6、修正后的洛伦兹变换的实验验证问题

通过这样修正狭义相对论，不但可以解释减速以及虚速率下的相对论，而且发现相对论更加具有数学上的美感：运动物体的长度既可以增加，也可以缩短；运动时钟既可以延缓，也可以加速；运动物体的引力质量既可以大于静止质量，也可以小于静止质量。自然界物体的运动——加速与减速、实速率与虚速率更加显示出对称性与统一性，反映在科学上便具有科学美。无疑这样修正符合 Einstein 的科学思想——“大自然总是喜欢简单与美感。”笔者认为简单本身就是一种美感。进一步可以设想，这样还可以解释一些用现代物理学无法解释的现象，譬如由于运动物体的引力质量可以减小，可以解释动物在死亡过程中重力略微减小——其体内某些物质的运动速度在减速（当然应该利用实验证实）等等。澳大利亚新南威尔士大学网站对双生子

问题的解释网页 <http://www.phys.unsw.edu.au/~jw/twin.html> 说明了上述观点的正确。

假设 A、B 两物体的静止质量相等，一个物体以角速度 ω 旋转，同时两物体以 V 作平动，那么根据 Lorentz transformation，他们的能量相等，可是旋转物体具有转动动能，那么如何解释？狭义相对论只研究了平动状态下情形，因此在转动状态下需要进一步修正。假设一个物体的静止引力质量为 m_0 ，转动动能为 E （计算时应当考虑相对论效应），则它的能量为 m_0c^2+E ，此时它的运动引力质量为 $(m_0c^2+E)/c^2$ 。如果一个物体同时作平动与转动，那么转动时的运动质量可以作为平动时的静止质量。自旋是带电粒子的相对性理论的一个自然特色，它和广义相对论是以一种未知的方式深刻地联系在一起。两个电子的总自旋通过体系轨道波函数的对称性质，对氦原子的能量具有很大的影响。

下面的实验可以验证修正的 Lorentz transformation 的正确性：用宇宙飞船携带国际米原器、时钟到月球旅行一周，在运动过程中使米原器始终沿着运动方向。根据广义相对论，在运动过程中引力场在减弱，返回后米原器的长度应当基本不变，时钟的运动应当加速。Hafele 和 Keating 把铯原子钟分别放在地面和飞机上，据说飞机向东绕地球一周返回地面，飞机上的铯原子钟比地面的慢，而飞机向西绕地球一周返回地面，飞机上的铯原子钟比地面的快，说明了上面的修改是正确的。“根据凯利博士从美国海军天文台索取的原始资料复印件，四个钟的其中三个有严重的不稳定基线漂移。用 Hafele 在 1971 年内部报告上自己的话说，多数人包括我自己不认为这些原子钟指出的时间加快说明任何问题，理论与测量数值的不同令人困扰。理论上东向飞行的钟应比地面钟-40ns，西向飞行的钟应比地面钟+275ns。而实验值用最稳定的 447 号钟，东向飞行的钟比地面钟-97ns，西向飞行的钟比地面钟+26ns，从对比数据可以发现实验的值与理论计算发生严重的偏差，根本谈不上实验验证了狭义相对论的时间延缓效应。”当物体作匀速直线运动时，物体的质量没有变化，周围的时空结构也没有变化，因此与静止状态效果一样，并不辐射引力波，相对性原理是正确的。

7、几个狭义相对论验证实验的重新分析

尽管相对论解释了许多实验，但是否揭示了导致实验的本质原因，需要继续研究。1971 年美国科学家在地面将精度为 0.00000001 秒的铯原子钟对准，把其中 4 台原子钟放到喷气式飞机上绕地球一圈，然后返回地球与地面上静止的原子钟比较，结果是绕了地球一圈的这 4 个原子钟比地面上的慢了 59 毫微秒（0.00000059 秒），与广义相对论的计算结果误差为 10%。后来将这个实验的喷气式飞机换成宇宙飞船，实验数据更接近广义相对论的计算结果。物理学家曾经利用原子钟高速运动时钟减缓寿命的延长，说明狭义相对论的正确，笔者认为这是不妥的。因为原子钟在高速运动过程中，地面上的时钟相对于它也在高速运动，为什么地面上的时钟不减慢呢？因为原子钟在实验中有一定的飞行高度，在飞行过程中实际是变速运动，加速运动的物体可以产生引力场，根据广义相对论引力场中时间延缓，所以对此应当重新分析。引力场强度不变，时钟的快慢不变，强度变大，时钟延缓，反之时钟加速。1971 年，为了验证相对论的时间变化，美国进行了原子钟环球飞行实验，其结果是：时钟向东飞行时慢了 59×10^{-9} ，往西飞行时快了 273×10^{-9} 。广义相对论的计算值与实验结果有一定的偏差（尤其钟快现象）。总之，在实验中的三组原子钟相互看来，实验中既有“动钟变慢”现象，也有“动钟变快”现象。

一般认为，来自外层空间的宇宙线轰击地球大气，产生了大量的 μ 介子，这些 μ 子具有很宽的能量范围，飞行速度有大有小，高能量的 μ 子速度非常接近光速 c ，可大于 $0.9954c$ 。 μ 子寿命很短暂，产生后会很快衰变掉，各个 μ 子的实际寿命有长有短，但是当我们统计群体 μ 子的平均寿命时发现，其平均寿命是恒定的。一群 μ 子衰变掉一半所需的时间，称为半衰期，常被用作寿命的标志，大量的实验统计出静止 μ 子的半衰期 $T = 1.53 \times 10^{-6}$ 秒，恒定不变。在 μ 子和介子实验中， μ 子和介子作有加速的圆周运动，实验证实作这样运动的 μ 子和介子的平均寿命大于静止 μ 子和介子的平均寿命。因为 1963 年的一次实验中，人们在高 1910 米的山顶上，测量铅直向下的速度在 $0.9950c \sim 0.9954c$ 之间的 μ^- 子数目，每小时平均有 563 ± 10 个；然后在离海平面 3 米高的地方测量相同速度的 μ^- 子数目，平均每小时 408 ± 9 个。 μ^- 子从山顶运动到海平面所

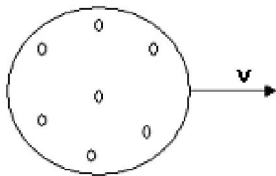
$$t = \frac{(1910 - 3)m}{0.9952 \times 3 \times 10^8 m/s} = 6.4 \times 10^{-6} (s)$$

需时间应为：

这是静止 μ^- 子半衰期 $(T_{1/2})$ 的 4 倍多，如果高速运动的 μ^- 子半衰期和静止时相等的话，人们预期在飞行经过 1907 米距离后，在海平面附近的 μ^- 子数应不到

$$\frac{563}{2^4} \approx 35$$

个。而当时实际测量却有 408 个，这清楚地表明，运动着的 μ^- 子半衰期增长了，或者说，衰变过程变慢了。



【1】 【2】

笔者认为这是一个广义相对论效应—— μ 子和介子在飞向地球的过程中，引力场在增强，同时由于 μ 子带有电荷，地磁场的存在相当于加强了引力场。笔者认为下面的实验也应当是一个广义相对论效应，长度收缩不具有累积效应：在现代高能物理研究中常用的粒子加速器中，粒子可以被加速到 $0.9998c$ 的高速。从下表可以看出原长 1 米的原子管道的长度收缩效应。

速度	静止长度	运动长度
$0.1c$	1m	0.995m
$0.5c$	1m	0.886m
$0.8c$	1m	0.6m
$0.9c$	1m	0.436m
$0.97c$	1m	0.243m
$0.99c$	1m	0.141m
$0.999c$	1m	0.045m
$0.9998c$	1m	0.02m

参考文献：

【1】A. P. 弗伦奇著《狭义相对论》人民教育出版社 1979 年 6 月第 1 版。

【2】倪光炯李洪芳著《近代物理》上海科学技术出版社 1979 年 8 月第 1 版。

8、同时性的绝对性

泡利所说“测定空间上相互隔开的两事件的同时性，可以完全借助于量杆来完成，而不必用时钟。”绝对有序的概念和普适时间的概念都包含同时的绝对性论断，这与狭义相对论的同时的相对性是完全矛盾的。最后可以提到，在时间观念上，作为现代物理学的两个支柱的相对论和量子理论一直存在着抵触。量子力学在绝对意义上使用时间的概念，同时性也具有绝对的意义，而相对论认为这是不容许的。正如狄拉克所说：“这里我们就碰到了巨大困难的开头。……这个抵触是最近四十年来物理学的主要问题。可以说，物理学家们的主要努力全是围绕着要协调相对论和量子力学这一问题而转的。对于这一课题已经做了大量工作，但还看不到解决的办法。”现在，远距关联实验的结果也许为我们解决这个问题提供了一点依据和线索。

根据相对绝对论，同时性应当是相对性与绝对性的统一，也符合唯物辩证法的观点——除了作为整体的宇宙及其一般规律而外不承认任何绝对不变的东西和绝对不变的界限。狭义相对论引发了对空间和时间的物理概念的清晰理解，对运动着的测量杆和测量钟的行为的认识。它在原则上去掉了绝对同时性的概念，表明了当处理运动速度同光速相比不是小的可以忽略的运动时，如何对运动规律进行修改。它导致了 Maxwell 的电磁场方程组形式上的澄清，尤其是它还引发了对 electric field 和磁场本质上的同一性的理解。它把质量守恒和能量守恒这两个规律统一起来，从而展示了质量和能量的等效性。从形式的观点上看，人们可以这样来刻画狭义相对论的成就：它概括性地表明了普适常数 C （光速）在自然规律中扮演的角色，同时展示了以时间为一方，空间坐标为另一方，两者进入自然规律的方式之间存在着密切联系。【1】一九零五年 Einstein 第一篇相对论论文“论运动物体的电动力学”中讲到 $t_A - t_B = r_{AB}/c - v$ ， $t'_A - t'_B = r_{AB}/c + v$ ，这里 Einstein 误用了经典速度合成公式，许少知先生首先发现并对此进行了批评。如果用相对论速度合成公式可得 $t_A - t_B = r_{AB}/c$ ， $t'_A - t'_B = r_{BA}/c$ 。由于相对于观测者 A、B 是以速度 V 运动的，因此光从 $A \rightarrow B$ ，距离 r_{AB} ，不等于光从 B 返回到 A，即： $r_{AB} \neq r_{BA}$ ，还是可以得到同时性的相对性结论。

协同学的创始人，H·哈肯是这样说的：“狭义相对论否定了绝对参考系的存在，但是 $3k$ 宇宙背景却是一个很好的绝对参考系。这个新的绝对空间导致了一个有趣的时间概念：在狭义相对论中，作任意运动的不同观察者不可能找到一个共同的时间，而与 $3k$ 宇宙背景联系的观察者却经历着一个宇宙的或者说是普适的时间。”【2】相信有一个外在的客观世界，以及对其描述时我们的时、空概念具有客观性、统一性、普适性和相对独立性，这是物理学的最最基本信念和概念基础，全部物理学可以说都建立和展开在此基础之

上. Einstein 所讲的同时性的相对性只是对于以光速传播的电磁场而言, 并非绝对化. 在运动会上以光信号与声信号得到的同时性是不同的, 但是绝对的同时性在理论上还是存在的, 例如 A 点发出的光信号, 在以 A 点为圆心, 以 R 为半径的圆上收到信号的时间是同时的. 郭峰君先生说: “众所周知, 狭义相对论推导洛伦兹变换是以坐标系的原点 O' 与坐标系 K 的原点 O 完全重合的瞬间开始计算坐标位置和计时时刻的. Einstein 在论证所谓“尺缩钟慢效应”时, 却都疏忽了坐标系的原点 O' 与坐标系 K 的原点 O 是否处于完全重合的瞬间这个必须具备的最起码的基础条件, 全然忘记了他自己设计的“同地性”和“同时性”这两个最原则的基本概念. 爱因斯坦说: ‘只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里, 那么任何想要满意地澄清这个悖论的尝试, 都注定要失败.’”

参考文献:

- 【1】Einstein 著方在庆韩文博何维国译. 《Einstein 晚年文集》海南出版社 2000 年 3 月第 1 版.
【2】《自然杂志》7 卷 8 期 P582.

9、虚速率及其存在下的相对论

赫拉克利特 (鼎盛年约 BC504 - 501) 已经认识到“思想是最大的优点, 智慧就在于说出真理, 智慧只在于一件事, 就是认识那善于驾驭一切的思想.”, 亚里士多德 (BC384 - 322) 则更加明确地指出“人们追求智慧是为了求知, 并不是为了实用.”

量子统计物理证明了, 任何具有上限能量且有有限个能级的平衡孤立系统, 可以出现负绝对温度. 当温度 $T \rightarrow +\infty$ 后, 系统内能再增大, 温度跳变到 $T < 0$, 这就是负温度状态. 负温度的存在, 不仅在理论上得到证明, 而且在核磁共振与激光技术中已有应用.

由量子统计物理可知, 粒子具有的统计平均速率与系统温度的平方根成正比, $V \propto T^{0.5}$, 当 $T > 0$ 时, V 为实速率; 当 $T < 0$ 时, $V = v_i$ 为虚速率【1】.

既然负温度的存在, 不仅在理论上得到证明, 而且在核磁共振与激光技术中已有应用, 因此我们应该承认负温度与虚速率的存在, 进一步假定 Lorentz transformation 对于虚速率状态依然成立.

当物体的运动速率为虚速率时, 加速度应当为虚加速度, 此时 $[1 - (\int_0^t a_i dt)^2/c^2] > 1$, 于是: 当速率的绝对值增加时, 物体引力质量减小、长度增加、时钟加速; 当速率的绝对值减小时, 物体的引力质量增加、时钟延缓、长度缩短.

参考文献:

- 【1】 阎庚年著. 《热力学史》山东科学技术出版社 1989 年 5 月版.

附录: 负温度——颠倒了的物理世界

文章提供于 2013-1-14 10: 29: 29 (北京时间: 2013-1-14 23: 29: 29)

文章作者: 程鄂

今年元旦刚过, 德国物理学家乌尔里克·斯奈德便发布了一项新成就: 实现了处于比绝对零度还低的“负温度”状态的气体. 这个结果通过新闻界报道引发了对温度的好奇. 其实, 所谓的“负温度”并不是一项新发明, 也不是不可思议的极低温. 恰恰相反, 那可以说是非常高的温度, 以至于无法用通常的温度概念描述. 这也是一个与经验相反的颠倒世界.

.....

热力学研究发现, 不仅仅不存在绝对零度以下 (负温度) 的状态, 绝对零度本身也是无法达到的. 此后发现的量子力学之测不准原理更说明原子是不可能绝对静止, 因此不可能存在处于绝对零度的系统. 目前所知的最接近绝对零度的物质是在实验室里人为创造出来的. 科学家通过激光制冷手段可以将处于气体状态的原子冷却到极低温, 并因此实现玻色-爱因斯坦凝聚. 2003 年, 麻省理工学院的实验室将钠原子降到 450pK (1pK 是 10 的负 12 次方开尔文度), 是现在的最低温记录.

后来的统计物理学研究为熵作出了更为清楚的定义: 熵值描述的是系统在可能占有的微观状态上的分布程度. 如果一个系统只占有小部分的状态, 比如固体中分子只在固定的晶格点附近振动或者按照颜色站好队的水, 它的熵值便比较低. 反之, 流体中分子可以完全自由运动; 不同颜色融合后的分子间的分布组合也大大增加, 其熵值也就比较高.

熵还为温度本身提供了一个更为严格的定义. 因为热运动并不是系统唯一的能量来源, 把温度简单地看作热能的衡量并不准确. 物理系学中的温度是改变一个系统的熵所需要的能量. 在不同的状态下, 将一个系

统的熵改变一定量时所需要的能量是不同的，而这正是系统温度的不同。

在我们日常的世界中，能量和熵的变化总是步调一致的，系统在获得能量的同时熵会增加。物体获得能量（热量）后会膨胀，扩大状态空间，甚至从固体融化成液体、进而蒸发为气体，这都是趋向无序的过程。反之，能量减少时熵亦会减小。这样得出的温度数值随状态变化虽然不同，却永远是正数，也就是绝对零度以上。

然而，在量子世界里，我们却可以遇到甚至构造出一些奇异的体系，与日常经验不符乃至相反。在经典世界里，随着能量的增加，系统中粒子动能会越来越大，没有止境。它们能占据的态也因此越来越多，更加无序，所以系统的熵会随着能量增加。

而量子世界中的粒子只能占据量子化的能量态。随着能量的增加，越来越多的粒子会进入高能量态。绝大多数的量子系统有着无止境的高能量态，粒子占据越多的高能量态，系统的熵越高。这与经典系统没有区别。的确，量子系统在高温条件下通常可以用经典物理描述。

但在非常特殊的情况下，人们可以设计出只存在有限能级的量子系统。在这样的系统中，粒子所能占据的能量态有限。能量增加的结果使得越来越多的粒子集中在最高的能级上。这样集中的结果是系统趋于有序，熵反而减少了。如果所有的粒子都集中在最高能级上，系统会变得完全有序，熵因此变成零——与所有粒子都集中在最低能量态的经典意义上的绝对零度情形一样，只是完全颠倒了。因为能量增加导致熵减少，按照“改变系统的熵所需要的能量”的定义，该系统的温度是负数！

这个意义上的负温度虽然匪夷所思，它其实是很早就被科学家认识的。它之所以稀有，是因为它在经典物理世界中不可能存在，在量子世界中也需要非常特殊的条件才可能。这样的负温度系统早在 1951 年就被物理学家在核子自旋系统中证实了。差不多同时，科学家发明了激光。他们选择合适的材料和条件，使得其中原子只有少数几个能级可供电子跃迁，然后输入能量将大量原子激发到其中的高能激发态，使得处于高能量态的原子多于基态。这样的原子体系便处于负温度状态。而这些原子步调一致地从激发态跃迁回基态时所付出的光子便成为激光束。

核自旋和激光系统都不是“纯粹”的负温度系统。它们只是在特定的自由度（自旋和原子能级）上实现了负温度，而原子本身所处的还是平常的正温度环境。今年德国物理学家所实现的突破便在于他们把一些经过激光制冷的原子通过调制整体地进入了负温度状态，这些原子完全处于负温度，不再另有正温度环境。但这样实现的状态非常不稳定，只能存活非常短暂的时间。

如果负温度系统接触到正温度系统是会发生什么样的现象？处于负温度状态的系统是不稳定的，会自发的释放能量。激光束正是这种能量释放的表现。它们接触到正温度系统时会自发地将能量传递给对方。正温度系统接收热量后能量和熵都会增加，温度增高。同时负温度系统在损失能量时（如果没有外来能量补充的话）熵也会增加，直到失去负温度状态。因此整个系统正像热力学定律所要求的那样向熵增加的方向演变。因为这个过程中能量（热量）是从负温度一方传向正温度一方，负温度并不比正温度更“冷”，而是比任何正温度还要“热”——这正是一个颠倒了物理世界。来源：搜狐。

5/6/2017