

关于时间的思考

程伟, 刘培生, 谢柏松 北京师范大学

1. 引言

如果说这个世界上总存在一些很神秘的东西, 也许时间是其中之一, 甚至时间可能是从古至今最神秘的一个概念。按照中国传统文化的理解, 四方上下曰宇, 古往今来曰宙, 因此才有了宇宙的概念和说法。人们关于时间最初的感受就是日出而作、日落而息, 这种周期性的地球运动让人感觉到了时间的流逝。再有就是作为生命体的人, 从孩童到少年, 再到青壮年, 及至逐渐衰老, 这一人生的经历或过程使人感觉到时间流逝的不可逆性, 这似乎与热力学熵增的时间箭头完全一致。

中国古代东方文明用天干和地支来描述一个时间段, 西方文明则用年、月、日、时、分、秒来精确的描述时间。例如中国的十二地支从子时到亥时(每个时辰对应了二小时的时间段)完整地描述了一天二十四个小时, 而从甲子到癸亥则

概括了六十年的时间。因此现在我们就有两套历法系统, 一个是我们保持了两千多年传统的农历, 另一个是国际上公认的公历。虽然两套历法都是从地球绕太阳运动的规律出发得到的, 但也存在一些细微的差别。为了补偿一般规律之间的偏差, 农历里我们的祖先还提出了闰年、闰月、闰日等概念。

2. 经典物理学中的时间

下面我们从物理学的角度来谈谈我们对时间的理解和思考。当然集经典物理学之大成的牛顿(图 1), 其绝对时空观深深影响了好几代人。

时间的牛顿式经典描述通常意味着时间是客观存在的, 和实物粒子一样真实, 只能单向均匀流逝。一般认为我们的宇宙自大爆炸诞生开始到现在已经过去了大约 138 亿年的时间。

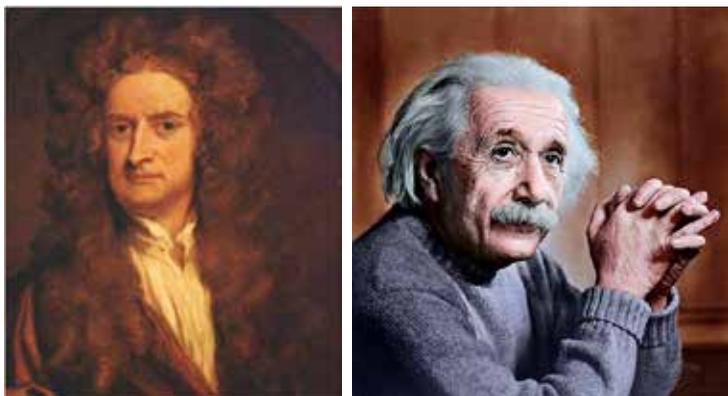


图1 牛顿（左）和爱因斯坦（右）

国际单位制中采用米、千克、秒制。米的最初定义是由1791年法国国民代表大会确定的，一米等于地球子午线1/4长度的一千万分之一^[1]。爱因斯坦提出光速在真空中速度不变， $c \approx 3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ 。物理学中，时间被定义为空间移动距离/速度。时间可用光速和距离来定义。距离的精确测量可以用激光干涉。时间精确测量可以用原子钟，其更精确的测量则可用核子钟。

时间均匀流逝其实只是经典物理学中的一个假设，且具有相当的主观性。经典物理学下人们一般还认为时间的流逝是连续的。

值得一提的是在古代中国，睿哲的先人却提出“天上方一日，地上已一年”的思想。这说明在不同参考系中时间流逝规律和考量方式可能是不同的，也说明时间既可膨胀，也可压缩。

在19与20世纪交替之际，物理学中通过迈克尔逊-莫雷实验否定了以太的存在，继而爱因斯坦（图1）提出了狭义相对论和广义相对论^[2]。一些核心观点是：光速在每个惯性参考系下是不变的，没有一个绝对的参考系更优越，在每个参考系下描述物理的规律都等同。在狭义相对论下，时间对某一参考系的流逝快慢可以随着对该参考系的速度不同而发生改变。物体运动速度越接近光速，时间流逝越慢。在广义相对论下，强引力场可改变附近时空结构，空间引力场越强，时间流逝越慢，黑洞附近时间几乎不流逝。这也引出了人们关于“黑洞火墙悖论”的思考，该悖论基于一个不幸的猜想：如果宇航员掉进黑洞会怎样？扯成碎片，还是被烧焦？在经典广义相对论的引力

理论框架中，宇航员会愉快地通过事件视界，但最终在黑洞无限致密的核心“奇点”处被巨大的引力撕成碎片。但如果基于量子理论考虑，那么事件视界会转化为一个高能量的区域即“火墙”，它会把宇航员烧焦。

作为更著名的关于时间讨论的一个例子，让我们来看看双生子悖论问题。问题通常表述如下，假定有一对双生兄弟，其中一个跨上了宇宙飞船作接近光速的长程太空旅行，而另一个则留在地球。结果当旅行者回到地球后，我们会发现他比他留在地球的兄弟更年轻。这个结果是由狭义相对论所推测出的，而且能够通过实验来验证，当然至今还没有实证。这是以地球为基准参考系得出的结论，而以宇宙飞船为参考系则会得出“留在地球的兄弟比宇宙飞船上的兄弟更年轻”这一相反的结论。这就说明宇宙空间中参考系的选择，对于研究者得出的研究结论具有某种决定性的作用。由此看来，“在每个参考系描述物理规律都等同”这一表述，目前对于在地球上的观察者来说是成立的，对于太阳系内的观察者也可以仍然成立，但超出太阳系甚至更大的空间后就可能难以为继。

再来看另外一个例子：关于 μ 子的寿命问题。如果以地球为参考系，如果没有时间膨胀，大气层上层产生的 μ 子在到达地面之前就已经衰变了，我们无法探测到 μ 子。实际上，我们能够探测到大气层上层产生

的 μ 子,因此可以确定 μ 子速度,速度又可以改变时间流逝,速度越快,时间膨胀越明显。反过来,如果以 μ 子本身为参考系,它的时间流逝均匀,但地球高速向它运动,它和地球之间的间距缩短了,所以它能在有限的寿命里到达地球。

可见,通过狭义相对论描述高速运动的 μ 子的规律,时间膨胀效应和尺缩效应是等同的。这是一个观察者效应。这似乎和古代中国的时间膨胀的说法一致。

从上面两个例子的分析不难得出这样的结论,即运动是相对的。我们可以用运动的飞船为参考系,那么地球上的兄弟以接近光速远离飞船,后来在飞船相聚后,地球的兄弟应该更年轻。我们从不同参考系考察上述双生兄弟,都得出对方年轻的结论,这显然不合理。还有一个可能性就是飞船远离地球和回来的过程经历了加速和减速的过程。而用广义相对论描述加速和减速过程后,可以确定飞船兄弟更年轻。

那么如何解决双生子的悖论呢?之所以有相反结论的悖论存在,我们认为要么推理的逻辑有问题,要么一些假定有问题,例如参考系等同假定,光速不变假定等。

我们先看看逻辑会不会出现问题,不妨先看下一个简单的悖论。一个人A对另一个人B说:“我现在跟你说的话是谎话”。作为第三者C分析:假如A说的是真话,那么根据他的意思,A说的是谎话;假如A说的是谎话,那么根据他的话的意思,A说的是真话。从逻辑上看A的话不是真话也不是谎话。人的逻辑有缺陷,可能无法判断双生子中谁年轻。但这个逻辑问题最早由维特根斯坦所研究,是典型的自指特性的问题,所谓自指就是作为客体的内容和主体的意旨是重叠的。不过,这个从相对论出发得出谁更年轻的悖论在逻辑推理上似乎看不出有自指特性的痕迹。

那么会不会是假定的适用性存在问题?一种可能性是假定我们地球及太阳参考系具有特殊性。如果在宇宙时空中的每个参考系都是独一无二的,只是对于相近的参考系可以得出类似的规律而已,比如在太阳系之内。另外如果光速不变性也是地球及太阳参考系坐标系内的近似规律,或者说是一个假定模型或某些规律运算结果得出的“近似常数”,那么无论如何我们的推理都是限于地球上的观察者得出的结论。换句话说,飞船坐标系需用不同物理框架来处理时间流逝,才能给出和地球及太阳参考系一致的结论。实际上,飞船上的兄弟在地球参考系来看,乘坐高速运动的飞船其时间流逝比地球时间慢,因此回来后显得年轻,相反在飞船参考系下观察,地球上的时间是快了,而不是简单的相对论性的也慢了,这样飞船回到地球后,飞船上兄弟看到的地球上的兄弟是更老而不是更年轻。

所以我们的推测是:其实时间膨胀或者收缩都只是观察者效应,在相对论参考系的等同假定下似乎有更大的某个对称性存在,这导致表面上相对论性的彼此尺缩钟慢的对称性破缺了。这非常类似于没有质量的粒子在希格斯机制下获得了质量。我们认为不同参考系下,特别是有加速和减速过程存在的情况下光速不变假定会因为类似希格斯机制的存在而发生改变。一方面光子可能获得了质量,另一方面所谓的时间和空间的变换规则发生了改变,从而破坏了相对论性的对称性。这是解决双生子悖论的一个可能的途径。

关于光速的不变性,我们还想多说几句。我们的物理规律给出光速不变,不依赖参考系,人们确信这个似乎早已由迈克尔逊-莫雷的实验验证过了,是客观规律。以地球为参考系,我们定义了引力质量与惯性质量,低速情况下两者相同。当物体以接近光速运动时,它的惯性质量就增

加，而引力质量不变。作为一个观察者，光没有静止质量，因此期待不同参考系中不受惯性的影响，速度一直保持不变。我们实验用肉眼观察现象，光速不变，可能导致我们判断不准。比如把左、右手同时放入热水和冰水中，然后一起放入温水中，我们左、右手感觉水温不一样。我们可以用仪器代替左、右手，似乎仪器比较客观地反映了物理规律，但仪器的精度、量子测不准原理和主客体纠缠在一起的“自指”问题等都像左右手一样不可避免地得出的结论产生重要影响。另外，所有的实验都是在地球上完成的，如果在引力巨大的黑洞附近做类似的实验，我们不知道光速不变原理还能不能成立？也不知道几乎停下来的时间流逝到底应该怎样来描述？

3. 量子物理学中的时间

学过量子力学的都知道^[3]，薛定谔（图2）方程中存在的时间是个虚数，这意味着在微观世界里，时间只是扮演了一个参量的角色，或者是个虚拟变量的角色。它的意义只是识别一个粒子或体系的可能性的状态，没有经典物理那种实质性的时空轨道的意义。只有在测量时，波包的塌缩才表现出一点时间的痕迹，即区别于初态的所谓末态的信息，那么在初态和末态的区别上似乎对应了时间的流逝。

如果按照诺贝尔物理奖获得者、荷兰物理学家塔霍夫特的观点^[4]，完全可以认为量子物理的状态是离散但完备的希尔伯特空间，而且可由细胞自动机产生，只是输入和输出符号或数字序列。

进一步考察可知，如果把经典的扩散方程的实数时间改成虚时间，那么扩散方程就变成了量子力学的薛定谔方程，这样经典的不可逆的确定性解则变成了可逆的量子意义概率论性质解，这个转变似乎对时间的认识问题产生了严重的影响。



图2 薛定谔

众所周知，经典扩散方程可以描述一大类不可逆的物理过程，例如像一滴墨水滴进一瓶清水的物理问题等等。随着那滴墨水的扩散，整个容器内的清水都不可逆地变成了墨水，这个物理过程无法反过来进行。与此相反，薛定谔方程的解则完全是可逆的，如果把那个虚时间反过来，则末态可以到达初态。

还有一个反过来的类比。我们知道，量子力学的本征态有一个指数形式，指数上的因子一般是一个虚数时间和本征态能量的乘积形式，即 $\exp(-itE)$ 。但如果把时间换成一个虚温度的倒数，这个因子就成了 $\exp(-E/T)$ ，这就成了有温度系统的玻尔兹曼分布形式，这是热力学系综理论中的普遍表达，也是有温度情况下处理量子场论时所采用的普遍的“虚时间”方法。

还有一个与时间概念有联系的物理思想，那就是如果把正向运行的时间反向，那么可以认为是反粒子的运动，这种正负粒子在时间上的反演行为是一种对偶性的体现（图3），也是狄拉克（图4）发现正电子存在时的逻辑基础和场论中能对反粒子大量使用费曼（图4）图的方便性技巧。

综上所述，宏观上不可逆的时间（实际的有序的变量）与微观上可逆的时间（虚拟的有序的

参量)以及系综中温度的倒数(实的随机无序运动的刻画)这三者之间似乎有很深刻的联系。虽然至今人们不知道这些联系背后的逻辑和机制,但这为人们对时间的认识和理解提供了更多的视角和可能性。至少作为既古老又很神秘的时间,它以不可思议的多副面孔存在着。这也从另一个侧面说明时间远比人们简单的认识或想像要复杂得多。



图3 粒子与反粒子的时间图像(取自参考文献[5])

4. 时间的箭头

人们普遍相信,时间跟因果律联系密切,即先有原因后有结果,这就给出了时间流逝的方向性。正如霍金所说,宇宙存在时间箭头^[5]。时间



图4 狄拉克(左),费曼(右)

箭头指明因果关系。热力学时间箭头指向混乱度(熵)增加的方向。我们宇宙正在膨胀,无序度增加,宇宙时间箭头和热力学时间箭头一致。生理学时间箭头指向衰老的方向。这三种时间箭头(图5)似乎都描述了物理学的因果过程。

霍金在他风靡全球的著名科普大作《时间简史》(图6)一书中^[5],专门用了整整一章来详细

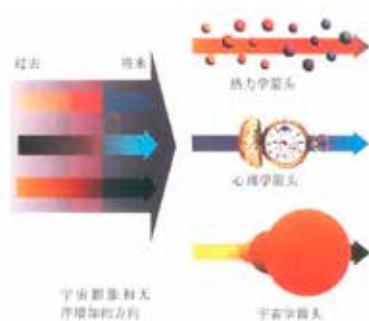


图5 子与反粒子的时间图像(取自参考文献[5])

谈了“时间箭头”,这里我们不需要重复他的思想和观点,但是其中令人印象深刻的一段话有必要重温 and 进一步思考。那就是在他看来宇宙无边界条件与时空的关系导致宇宙的膨胀相和收缩相的对称破缺,使得时间正向流逝时的膨胀相下无序度增加,这是一个正向的时间箭头,但在宇宙停止膨胀开始反向运动收缩时,无序度仍然是增加的,也就是说这时的热力学和心理学时间箭头不会反向。特别值得一提的是在早期,霍金认为收缩相时,无序度减小即时间是反向的。那么由此可知狄拉克和费曼图中反粒子所谓的时间反向问题完全是个数学处理方便起见的虚拟时间问题,而真正的物理时间却只是单向的,就是说时间箭头永远向前,不会逆转。

这一观点似乎与最近获得诺贝尔物理奖的彭罗斯的关于共形循环宇宙学模型(Conformal Cycle Cosmology, CCC)相冲突,因为彭罗斯认为宇宙在

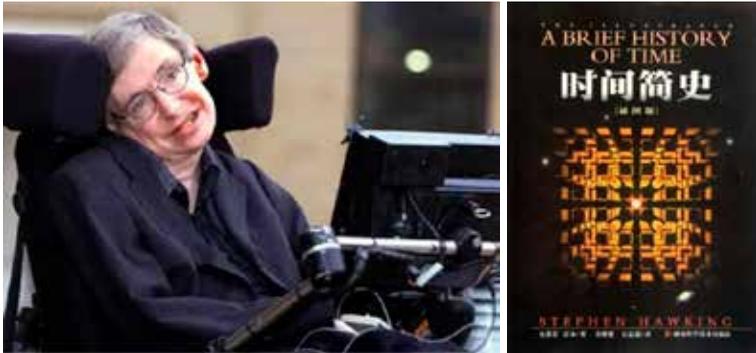


图6 霍金和他著名的科普畅销书《时间简史》

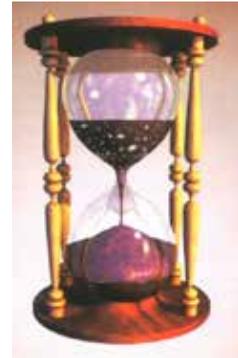


图7 时间的沙漏 (取自参考文献[5])

共形几何结构的意义上是循环开始和结束的，一个宇宙的开始连接着上一个宇宙的结束。但是如果我们仔细考察和思考，霍金和彭罗斯两者的观点和看法似乎可以协调一致，这是因为在所谓“结束”和“开始”的地方，也就是经典物理或者说广义相对论所指出的“奇点”处，物理学定律是失效的，那么作为经典概念的所谓时间是没有定义，或者说是没有意义的。人们可以争辩说是否可以用量子物理的虚拟时间来替代，但物理学定律是失效的显然也包括了量子物理，那么唯一的逻辑就是没有规律是这个“奇点”处的规律，那么没有时间就是时间的开始和结束，一旦开始，时间的箭头又出现了，而且又是永远向前（图7）。这就好比希腊神话中的西西弗，他永远只能背着巨石从山脚下艰难地爬上山头，当他到达山顶时，巨石因为自然的重力效应而自动滚落山下。在这个神话图腾的背景图画上，时间就是向上运动的巨石。

在人们想象认知的框架里，人们关于时间箭头的思考当然可以跳出固有的认知。例如我们在电影或电视里经常会看到所谓的时空穿越剧情，像美国著名的经典系列科幻电影《回到未来》，还有不久前由霍金好友、宇宙物理学家索恩（也是诺贝尔物理奖获得者）进行指导而拍摄的《星际穿越》等。

时间是否可以逆转不仅是科幻的、想象式的问

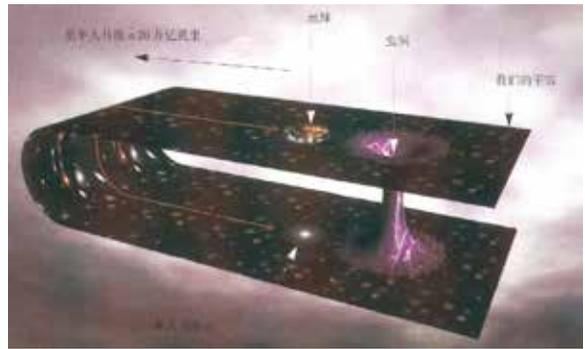


图8 时间的沙漏 (取自参考文献[5])

题，而且越来越成为包括索恩在内的众多物理学家们严肃思考和一直在进行认真探索的科研问题。最近的研究 [7-8] 发现 $ER=EPR$ ，也就是说由爱因斯坦-罗森 (Einstein-Rosen, ER) 桥描述的虫洞，和由爱因斯坦-波多尔斯基-罗森 (Einstein-Podolski-Rosen, EPR) 讨论的量子纠缠描述的高度纠缠的一对无限远黑洞是等同的。众所周知，虫洞（图8）是实现时间旅行的必要途径，目前的研究表明微观虫洞是可以实现的，也许随着研究的深入，宏观上的虫洞也许在未来也能够实现。

5. 与时间不可分割的空间

一般来说，时间总是与空间联系在一起。我们知道任何物体都是由原子构成。原子的空间间

距,可以是几个埃 (10^{-10}m)。因为泡利不相容原理,原子间距可以压缩,但不能无限压缩。原子的内部包括了原子核。原子核直径是几个费米 (10^{-15}m)大小,由于泡利不相容原理,原子核的核内核子(质子及中子)的间距也是有限的,不能无限压缩。质子通常被认为由夸克组成,因为泡利不相容原理和强相互作用,夸克也不能无限缩小。

问题来了:如何描述空间的大小?假如夸克大小不变。长度单位可以用多少个夸克直径来描述。空间体积用夸克直径的立方来描述。因此,已知空间尺度最小的单位是夸克的直径,即夸克的直径是可分辨的最小距离,这意味着,想要表征更小的距离只是数学的概念,没实物可描述。还有就是由于色动力学的夸克禁闭以及渐近自由。人们在实验中没法分离或观察到单个夸克的存在,换句话说,人们没法确定真正的空间大小。

所以物理测量观察到的尺缩效应是否能突破这个夸克尺寸的限制就是一个问题,估计很难突破。这就说明所谓的时间膨胀和尺缩效应都只是观察者效应。看到的尺缩,不是尺子真正缩小了,只是人们观察实验现象后认为尺子缩小了,实际还是原来的尺子。我们的物理规律是根据仪器测量和逻辑分析得到的,逻辑基本上是主观为主,难免会有观察者效应而偏离真正的所谓客观事实。因此,我们可能拿这个夸克的例子告诉别人,这是最小的空间尺度大小,再小一半的空间都不能容纳任何哪怕是概念性意义上的实物,至少目前的物理理论是这样。

著名的海森堡(图9)测不准原理告诉我们对互相共轭的物理量的测量要满足一组不等式的关系,例如 $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$ 等^[3]。在我们已有的物理框架中,空间量子化最小值大概就是夸克的大小了。由于光速的限制,我们可以得出时间也应该是量子化的,所以有个最小时间。事

实上,从三个基本物理学常数,即牛顿引力常数 G 、光速 c 和普朗克常数 \hbar 出发,我们将在理论上得到普朗克时间和普朗克(图10)空间尺度分别是大约 10^{-44} 秒和 10^{-33} 厘米,这是迄今为止物理学理论上所能给出的最小的时间和空间大小的估计。



图9 海森堡



图10 普朗克

6. 总结与展望

我们从不质疑物理规律的正确性,因为在同样实验条件下,物理定律可重复验证,但目前我们知道的任何物理规律都限于研究者处于太阳系内部的观测,太阳系外部呈现给我们的信息有可能是“幻象”。量子力学的出现,颠覆了因果定律。量子力学里有个著名的薛定谔猫的问题^[3],那就是没测量时,猫处于活和死的两个状态的叠加态,

测量后，只能得到一个猫的或生或死的状态。我们不展开讨论这个问题。量子力学的正确性已得到大量实验的证实，包括上个世纪为了检验 EPR 佯谬和量子纠缠而得到的著名的贝尔不等式及其实验验证。

我们在这篇文章中想强调的是：我们知道的物理规律是我们这个时空中获得的规律，超出我们的这个认知时空之外，它们则可能是另外一番景象，甚至不一定是真正的规律。举个例子，我们知道有个关于孔子教育弟子的“一年三季”的典故。说的是我们人类的认识告诉大家一个常识：一年有四季，但这个常识或者规律不是普遍的，拿蚱蜢来说，蚱蜢的一生只经历春、夏、秋三季，所以蚱蜢的物理规律是一年三季。显然该物理规律对于蚱蜢是对的，对于人来说是不对的。与此类似，我们得出的物理规律的正确性是有条件限制的，在我们这个时空被认为是对的东西，可能对于高维时空来说是错的。我们的物理规律只能解释我们时空内的现象。

值得注意的是最近关于时间的思考出现了新的东西，也就是所谓著名的时间晶体 (Time crystal) 的概念 (见图 11)。这是 2004 年诺贝尔物理学奖获得者维尔切克在 2012 年首次提出的^[9]。我们知道空间晶体是具有空间对称性的体系，顾名思义时间晶体则是具有时间对称性的体系。时间晶体是一开放系统，其与周围环境保持非平衡态，呈现时间平移对称破缺的特性。随着时间演化，时间晶体无法与环境达到热平衡。

另一方面，自然界存在大量的空间自组织的现象，这是具有丰富空间对称性的系统，而且通过对系统的控制可以使得系统演化时有同步或者锁相等特性。与此类似，自然界是否存在时间自组织的现象，以及对这一现象的有效控制或操控？这些都是有待进一步研究的课题。因为时间的均

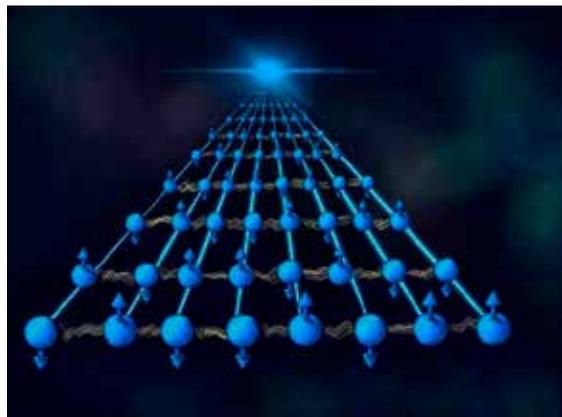


图11 离散时间晶体概念示意图：一维1/2自旋链构成的时间晶体。系统的哈密顿量具有以时间 T 为周期的离散时间平移对称性，使得 T 时间自旋链完全翻转。因此可观测量具有 $2T$ 的离散时间平移对称性

匀性，有益于微观体系控制的精准性，而不论时间还是空间的量子涨落都可能会对精准控制带来巨大的影响，因此如何深刻认识时间的本质及其效应等还是一个任重而道远的挑战。

总之，我们人类认识客观世界，只能尽量抛弃主观因素才能更准确反映物理规律。抛弃主观因素真的不容易，因此如何正确认识和理解时间也将是一个漫长的过程。好在我们仍然有足够的时间来认识时间，至少它值得我们去思考并不断加深对它全方位的理解。

(注：除了注明取自参考文献 [5] 的图片外，所有其他图片均来自百度百科)

参考文献

- [1] 百度百科, <https://www.baidu.com/>
- [2] 爱因斯坦 著, 周学政、徐有智 编译. 相对论. 北京出版社, 北京, 2007.
- [3] 曾谨言 著. 量子力学导论. 北京大学出版社, 北京, 1992.
- [4] Gerard 't Hooft, The Cellular Automaton Interpretation of Quantum Mechanics, Springer, 2016.
- [5] 史蒂芬·霍金 著, 许明贤、吴忠超 译. 时间简史. 湖南科学技术出版社, 长沙, 2002.
- [6] 罗杰·彭罗斯 著, 李泳 译. 宇宙的轮回. 湖南科学技术出版社, 长沙, 2014.
- [7] Jensen K and Karch A. Holographic Dual of an Einstein–Podolsky–Rosen Pair has a Wormhole. Phys. Rev. Lett. 2013, 111: 211602.
- [8] Sonner J. Holographic Schwinger Effect and the Geometry of Entanglement. Phys. Rev. Lett. 2013, 111: 211603.
- [9] Wilczek F. Quantum time crystals. Phys. Rev. Lett. 2012, 109: 160401.



【作者简介】程伟, 1973年生, 男, 汉族, 吉林大学理论化学研究所毕业。现为北京师范大学核科学与技术学院副研究员, 访问过美国加州大学伯克利分校、伊利诺伊州立大学、意大利理论物理中心。研究方向为半导体声子、材料缺陷的从头计算, 发表论文 80 余篇。



【作者简介】谢柏松, 1965年生, 男, 汉族, 安徽桐城人, 理论物理博士。现为北京师范大学核科学与技术学院教授、博导, 研究方向为等离子体物理和强场量子电动力学等, 已发表 SCI 论文 170 多篇。业余爱好诗歌、科学哲学与周易等。