

Is ours the only universe?

宇宙是唯一的吗?

陈学雷

中国科学院国家天文台, 北京 100012

E-mail: xuelei@cosmology.bao.ac.cn

2017-01-10 收稿, 2017-01-12 修回, 2017-01-13 接受, 2017-03-09 网络版发表

摘要 宇宙是唯一的吗? 本文介绍近年来宇宙学和量子力学中的“多重宇宙”概念. 在暴胀宇宙中, 可产生巨大数量的时空区域, 这些区域不仅彼此脱离因果联系, 且其中所展现的物理有效理论也可能是不同的. 根据量子力学中的多世界诠释, 世界在每次量子测量时根据其不同结果而分裂为不同的、各自独立演化的分支, 至于这些分支是否“真实存在”取决于对“存在”的理解, 因而更多的是个哲学而非科学问题. 由于多重宇宙的概念很难被实验或观测所检验, 因此它是否是一个科学上有意义的概念也是一个有争论的问题.

关键词 多重宇宙, 暴胀, 人择原理, 量子力学多世界诠释

2005年, *Science* 为了纪念其创刊125周年, 综合其编辑和作者们的意见, 列出了125个重要的科学问题^[1], 其中第26个问题是: “宇宙是唯一的吗?”

对这一问题的回答, 当然在一定程度上依赖我们怎么理解“宇宙”一词. 中文中的“宇宙”一词, 按照《尸子》的解释: “四方上下曰宇, 往古来今曰宙”, 指的是一切空间时间的总和. 中国古代有所谓“天上一日, 地上一年”等神话, 在印度和佛教传统中, 又有所谓“三千世界”的说法, 可见在东方思辨传统中, 宇宙可能包含多种并不统一的时空. 但是在西文中, 描述“宇宙”的有两个词, 以英文为例, “Universe”和“Cosmos”. Universe中的词根“uni”是“唯一”的意思, Cosmos的词根“cos”则是“秩序”的意思, 因此这两个词都是强调宇宙是相互联系的一个整体. 现代科学起源于西方, 通过推理和实验观测给出对宇宙的描述和解释, 因此当然也要求用普适的物理规律描述我们所生活的宇宙, 从这个意义上讲宇宙应该是唯一的.

但是, 近年来一些宇宙学家提出了时空中相互分离的“多重宇宙”(multiverse)或平行宇宙(parallel

universe)概念, 甚至其中不同的“宇宙”可能表现出不同的物理规律. 另一方面, 针对量子力学标准的哥本哈根诠释中的一些矛盾, 也出现了对量子力学的“多世界诠释”. 这些关于宇宙的基本问题也成为公众感兴趣的话题, “多重宇宙”一词也已广为流行. 当然, 从某种严格的逻辑或哲学角度说, “宇宙是否唯一”这个问题并没有意义, 或者说这是一种语言的误用, 因为如果说宇宙并不唯一, 而是存在多种不同的宇宙, 我们总可以把所有这些不同宇宙的总和称之为宇宙. 不过, 语言和哲学上的过度洁癖也可能会抑制思维的活力和创造性. 因此, 这里暂不细究这些词语的详细定义, 而先看看宇宙学和量子理论中产生的这些概念究竟是怎么回事.

1 可观测宇宙

爱因斯坦提出相对论后, 人们认识到时间和空间并非各自独立而是联系在一起的一个整体. 如前所述, 在西方传统中, “宇宙”这个概念强调的是有相互影响或者说因果联系的时空. 由于光速是因果影响(信号)传播的最大速度, 当我们观看远距离外的物

引用格式: 陈学雷. 宇宙是唯一的吗? 科学通报, 2017, 62: 1103–1110

Chen X L. Is ours the only universe (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 1103–1110, doi: 10.1360/N972017-00039

体时,看到的并非是它现在的影像,而是之前某一时刻的.例如,一个一百光年之外的天体,我们现在看到的是它一百年前的样子.我们所看到的天体越遥远,其光波发出的时间越早.现在的观测证据表明,我们所在的宇宙起源于一次大约138亿年前的宇宙大爆炸,也就是说我们现在所知的最早时间就是大约138亿年前.那么,由于宇宙年龄有限,我们现在所能观测的来自最远距离的光波就是宇宙大爆炸时所发出的光波.考虑到在光传播的这段时间里宇宙膨胀造成的距离改变,发出这些光的地方与我们现在的距离不是138亿光年,而是大约469亿光年(这个值与宇宙膨胀的历史有关,因此根据不同的宇宙学参数,具体数字可能略有出入).这就是此刻所能观测到的宇宙范围,称之为“过去粒子视界”(past particle horizon)或简称为粒子视界.图1中标示了这一范围.当然,如果宇宙的寿命是有限的,那么还会存在未来粒子视界.显然,只有发生在粒子视界之内的事件才可能影响到我们,发生在粒子视界之外的时空中的事件目前还不可能影响到我们.当然,如果我们等待更长的时间,那时将能够看到来自更遥远的地方传来的光波,或者说这些更远处的事件可以影响到我们的未来.

我们可观测的范围或者说受到因果影响的范围除了受到宇宙有限年龄的限制外,还受到宇宙空间曲率和宇宙膨胀的影响.空间曲率为正的宇宙是一种有限的宇宙,比如爱因斯坦就曾提出过静止而有限的宇宙.不过,目前的观测表明,宇宙的空间曲率非常接近于零,也就是说空间上是无限的^[2,3].或者,

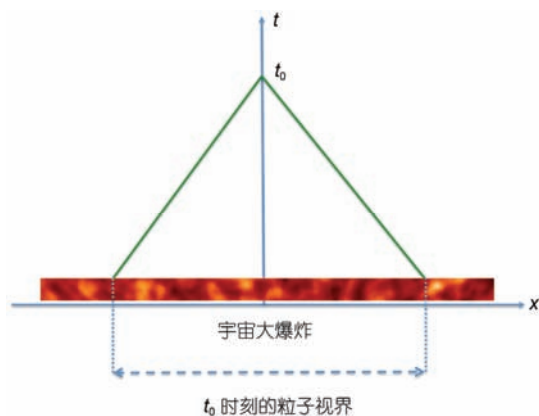


图1 (网络版彩色)粒子视界时空示意图

Figure 1 (Color online) Sketch of particle horizon in space-time

如果它是有限的,其曲率半径也非常大,因此目前限制我们观测范围的不是空间曲率而是宇宙膨胀.宇宙中彼此相距遥远的两点之间都有相互远离的速度,称为退行速度.想象某一时刻 t_0 ,依次排在一条直线上的三点A, B, C(图2),其中AB和BC的长度都是 d .又经过时间 t 后,AB间的距离、BC间的距离、AC间的距离都因宇宙膨胀增大了一倍,那么B相对于A, C相对于B的平均速度都是 $v=d/t$,但C相对于A的平均速度却是 $V=2d/t$,从这个例子看出,距离越远,退行速度越大,这叫做哈勃定律,是美国天文学家哈勃在观测星系时发现的.根据现在的测量结果,在距离约为139.7亿光年处,退行速度将超过光速.这与相对论中光速是物体或信号传播最大速度并不矛盾,因为这是空间膨胀引起的,其速度是相对于遥远的物体而不是本地的物体.这膨胀速度超过光速的地方称为表观视界(apparent horizon),由于这一膨胀速度的影响,在这一点之外的星系向我们这个方向发出的光波将会远离而不是接近我们.这就像我们在站台上看着一列火车离开,我们在列车上的朋友即便尽力向车尾方向跑,但是因为火车速度离去的速度很快,站在车站地面上的我们还是看到他随着火车远去.当然,如果此时火车停了他就会开始接近我们,同样地如果宇宙的膨胀速度减慢,这些光波最终还会传过来.但是,如果火车不断加速,这位朋友就永远跑不过来.过去,人们曾以为由于万有引力的作用,宇宙膨胀会慢慢减速,因此表观视界只是暂时的.但是1998年通过对超新星的观测,科学家们发现宇宙的膨胀正在加速,这种情况下一定距离以外的光将永远无法传到我们这里.这时我们只能看到一定范围之内的宇宙,这个范围称为未来事件视界(future event horizon)或简称为事件视界.

通常我们把信号所能传播范围以内的时空称为“可观测宇宙”(Observable Universe),文献中有时就干脆简称其为“宇宙”.这里的所谓“可观测”仅仅是指以真空光速传播的信号所可及的范围,而不论技术

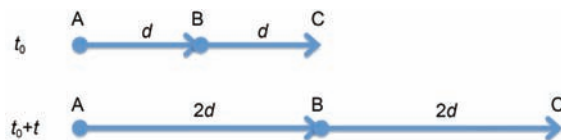


图2 (网络版彩色)退行速度示意图

Figure 2 (Color online) Sketch of recession velocity

上是否有可行的观测手段. 由于上述粒子视界和事件视界的存在, 可观测宇宙是有限的, 但是在可观测宇宙之外时空还是可以存在的. 特别是, 如果空间是无限的, 时空中将存在大量甚至无穷多彼此互相没有直接因果联系的部分.

这样的不同部分是否能称之为不同的宇宙呢? 也许可以这样称呼, 但要注意, 粒子视界是不断扩大的, 因此某一时刻尚未相互影响的时空区域未来可能会相互影响, 而未来事件视界之外的时空区域, 也有可能在过去曾相互影响, 还有可能两个区域彼此没有直接的因果影响, 但都与夹在二者中间的时空区域有相互的因果影响. 另外, 在传统的宇宙大爆炸理论中, 这些时空区域都有相同的演化(膨胀)历史. 因此, 称它们为同一宇宙的不同部分似乎更合适一些.

2 暴胀与多重宇宙

在上面的讨论中, 我们假定了传统的宇宙大爆炸理论, 这是在宇宙均匀各向同性的假定下推出的, 它是一个使问题大大简化的假设. 当然, 实际观测也表明对可观测宇宙而言这是一种很接近实际情况的假设. 但是, 在广义相对论中时间空间并不是先验地均匀各向同性, 而是受物质影响并可以发生动力演化的, 其演化中相互影响的传播同样不超过光速. 这样, 就有一个让人疑惑的问题: 既然在大爆炸宇宙中存在粒子视界, 那么超出粒子视界之外的时空区域是怎么实现这种“神同步”的呢? 何以在远远超出粒子视界的尺度上, 宇宙是均匀各向同性的? 这就是传统宇宙大爆炸理论的“视界问题”. 1980年, 古思(Alan Guth)提出了暴胀(Inflation)理论, 认为在宇宙极早期(宇宙时标约 10^{-32} s), 宇宙曾发生了一种非常快速的加速膨胀, 线性标度膨胀了至少 10^{25} 倍, 这种理论比较自然地解决了“视界问题”等一系列传统大爆炸理论中的疑难问题. 按照这一理论, 比我们原来估算的粒子视界大得多的区域在宇宙极早期其实都曾经处在一块非常小的、有因果联系的时空范围内, 只是此后的暴胀使其变得非常大, 看上去好像超出了粒子视界. 这样, 这些区域的高度均匀一致就不那么奇怪了.

在古思原来提出的模型中, 暴胀是在某种标量场的对称自发破缺相变时发生的. 后来人们提出了一些改进版的模型, 其中林德(Andrei Linde)提出了

混沌暴胀理论. 这一理论假定, 驱动暴胀的标量场有某种相互作用势, 如果这种势比较平坦, 使其发生缓慢的演化, 那么其势能就相当于一种真空能量, 可以驱动宇宙暴胀. 暴胀场从势能较高的状态向较低的状态逐渐演化, 而暴胀就在这一过程中发生, 直到最后势能降低到零值时, 暴胀场原有的势能转化为动能, 产生大量粒子, 暴胀结束. 在这样的理论中, 暴胀的倍数取决于开始时暴胀场的势能, 势能越大, 倍数越高. 我们可以想象, 如果一开始暴胀场的分布是非均匀的, 那么宇宙中各不同点所经历的暴胀持续时间和暴胀的倍数可以有很大的不同——比如差几十个数量级. 由于暴胀过程中空间急剧的增长, 那些暴胀持续时间长一些的地方在暴胀结束时其体积就会远远超过持续时间稍短的地方, 这样暴胀的宇宙将形成一种复杂的分形结构, 形成一些尺度远大于可观测宇宙的“泡泡”, 在这些泡泡内时空是均匀各向同性的, 但在更大的尺度上却是不均匀的, 这些不均匀的区域其宇宙膨胀历史有相当大的不同.

在某些模型中, 甚至有可能发生“永恒暴胀”(eternal inflation): 由于量子力学不确定性原理, 暴胀场在演化中有一定的概率使势能增加而非降低. 尽管这一概率非常小, 但在混沌暴胀所形成的巨大空间内, 这一事件仍有机会发生. 尽管这种事件只在很少处的很小的空间体积上发生, 但那里的暴胀将持续更长的时间, 最终生成比周围暴胀先结束之处更大体积的空间. 在这部分空间中, 同样暴胀场又有一定几率发生这种“逆天”增长, 如此下去, 暴胀将永恒地持续下去. 在这样的模型中, 尽管在我们现在所处的可观测宇宙中, 暴胀早已在138亿年前结束并转入我们所观测到的大爆炸和之后的膨胀过程, 但在

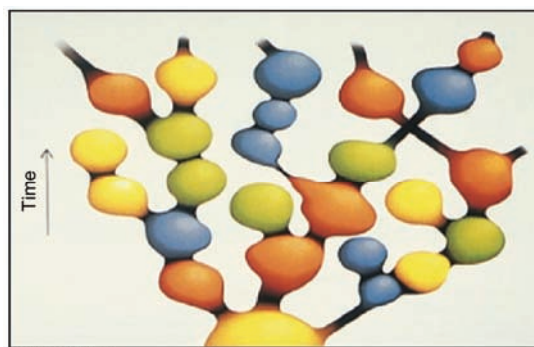


图3 (网络版彩色)混沌暴胀宇宙示意图

Figure 3 (Color online) Sketch of chaotic inflation multiverse

这之外,也许有的地方仍在发生暴胀(关于暴胀理论的发展,参见文献[4]).

在暴胀中可以形成大量的、彼此之间脱离了因果联系的时空区域,而且不同的区域其演化过程可能有相当大的不同,因此一些宇宙学家把它们称之为multiverse,以与传统的“宇宙”(universe)作区别,这其中每一块时空区域并非所有的时空,而只是很多块彼此相连但脱离了因果联系的时空中的一个.

顺便说一下,在中文文章中提到“多重宇宙”中时,究竟指的是所有这些时空的总体,还是指其中的一个,需要根据上下文判断.

3 物理规律与人择原理

除了宇宙膨胀的历史不同外,这些不同区域中所表现的物理规律也有可能是不同的.当然,我们仍然会假定有某种普适的、基本的物理规律支配着所有时空和物质.但是,在一定的能量范围内,我们所观察到的物理规律并不一定是最基本的规律.例如,在不同的温度和压力下,我们所熟悉的水可以表现为固体——冰、气体——水蒸气,或者液体水,因而展现不同的物理规律——流体力学和固体力学,尽管它们都有同样的化学成分,并且服从同样的基本物理规律——描述电磁相互作用的麦克斯韦方程.在水这个例子中被视为更“基本”的电磁相互作用,也不是真正最基本的物理规律,因为电磁相互作用和在核反应中被发现的所谓弱相互作用都是电弱相互作用.在较低能量下对称自发破缺后表现出的有效相互作用.核反应中的强相互作用则是量子色动力学在低能下表现的有效相互作用.最后,我们现在已了解的最基本的相互作用,即用对称群 $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_B$ 描述的粒子物理标准模型,很可能也是某种更基本的但还不为我们所知的理论在较低能量下有效理论.在比较低的能量下,基本理论中的某些自由度不会表现出来,而只有那些需要能量较低的自由度才会表现出来,这时我们看到的仅仅是低能量下的有效理论.

然而,低能有效理论可能并不是唯一的.在宇宙极早期暴胀发生的时候,所涉及的能量很高,系统可能有更多的自由度和更高的对称性.随着宇宙膨胀能量降低时,部分自由度冻结,对称性自发破缺,但这种破缺的结果可能不是唯一的,不同的空间破缺场可能会获得不同的取值,这可能导致这些不同的

“多重宇宙”的低能有效物理理论也即所表现的物理规律有所不同.也许在另一个“宇宙”或者说暴胀形成的时空区域中,其“标准模型”就根本不是我们所熟悉的这些相互作用,当然那里所表现的物理规律也将完全不同.

与此密切相关的一个问题是“人择原理”^[5].长期以来,一些学者已经在思考这样的问题:在基础的物理理论中有一些基本常数,它们为什么会取某些特定的值?例如,为什么精细结构常数大约是 $1/137$?又比如我们现在观测到的暗能量是宇宙学常数,它为什么比普朗克密度小 123 个数量级?传统研究纲领是试图从更基本的物理学规律解释观测到的常数,例如从电磁学以及电子和核子的基本性质,尝试解释氢、氧乃至水的性质.但是,另一种考虑这些问题的方式是,如果这些常数取值不同,那么我们的宇宙将有很大的不同,也许在这样的宇宙中将无法产生智慧生命,当然也就不会有我们询问这样的问题!比如,如果在某个宇宙中宇宙学常数的值比较大而其他条件不变,那么这样的宇宙也许会在大爆炸结束后很快进入加速膨胀,而没有足够的时间形成恒星、星系等结构,当然也就更无法产生生命.因此,我们所观测到的宇宙学常数的取值必定是处在使得生命能够产生的范围.曾因提出电弱统一理论而获诺贝尔奖的温伯格(Steven Weinberg)——从人择原理角度考虑,提出了一种宇宙学常数远小于普朗克密度的解释^[6],甚至以多重宇宙中的观测者数量(假定观测者数量正比于星系数量)为权重,给出了一个与实际测量值数量级相近的估计^[7].

显然,要运用人择原理,前提是要存在大量的“多重宇宙”,并在其中实现各种不同的物理.一个多重宇宙理论的例子是在超弦理论中,时空是十维的,然而我们所能察觉的时空则是四维的,其余六维不可见空间则由数学上的卡拉比-丘(Calabi-Yau)流形描述.可能存在的不同的卡拉比-丘流形数量非常多,而且在卡拉比-丘流形上,又可能存在缠绕的膜(brane)和对应的磁场通量,这些磁场通量可以使描述这些额外维度空间的模场(moduli field)稳定,但各种不同的卡拉比-丘流形和磁通量组合形成非常多的伪真空(false vacuum)——即宇宙学常数不等于零的真空,这种不同的伪真空被称为弦论景观(string theory landscape)^[8].在暴胀结束后形成的泡泡中,可以实现景观中的不同点,从而形成大量不同的宇宙.

4 量子力学中的多世界诠释

另一种多重宇宙的概念起源于量子力学的多世界诠释。自从量子力学被提出以来, 尽管其数学形式已被普遍接受, 但人们对于其中的许多基本概念和意义仍有不同的诠释^[9], 而其中一种影响很大但仍有相当争议的解释就是由Hugh Everett提出的多世界诠释。

量子力学中, 一个孤立系统的状态由波函数描述, 而波函数的动力学演化则由薛定谔方程决定。但是, 人们早已知道, 在一般情况下, 无法完全准确地预言一个量子测量实验的结果, 而只能预言所可能出现的不同测量结果(这些不同结果都是观测量算符的本征值)以及每种结果出现的几率, 即所谓玻恩定则。例如, 假定已知一个电子的自旋状态为沿着z轴方向+1/2, 这已给出了对该电子自旋态的完全描述, 并且沿着z-轴的测量可以得到确定的结果。但是如果我们现在沿着垂直于z轴的x-轴进行测量, 则不能得到确定的结果, 只能预测可能出现的结果是+1/2或-1/2, 且两种可能性各为一半。如何理解这种几率性的结果呢? 爱因斯坦怀疑量子力学并非最后的、完备的理论, 并有名言“上帝不会掷骰子”。但是, 越来越多的实验充分证实了量子力学的普遍适用性。对于实验中出现的几率性结果, 不同的量子力学诠释给出了不同的回答。

玻尔、海森堡等人发展的哥本哈根诠释是最常见的标准诠释。按照这种诠释, 对量子自旋的测量瞬间改变了其自旋态, 使波函数由多个可能状态的线性组合瞬间塌缩到观测量算符的一个本征态上, 这就是所谓波包塌缩。这种波包塌缩不是由薛定谔方程主导的幺正演化, 而是量子测量过程即量子系统与遵守经典力学的测量仪器的相互作用导致的一种破坏幺正性的特殊演化, 在这种演化中可以根据玻恩定则产生几率性的结果。这一诠释有许多让人感到困惑之处, 例如爱因斯坦-波多尔斯基-罗森(EPR)佯谬, 薛定谔猫佯谬, 维格纳朋友佯谬:

(i) EPR佯谬。如果两个粒子曾发生相互作用而形成相互关联的量子态, 即所谓纠缠态, 那么对其中一个粒子的测量不仅导致该粒子的波包塌缩, 也会导致另一个的波包瞬间塌缩, 无论二者相距多远。乍看起来, 这似乎违反了相对论中信息传播速度不能超过光速的原理。不过, 按照哥本哈根诠释, 波函数并不是实体, 而仅仅是观测者对系统的描述, 因此

不能把这种波包塌缩理解为物理信号的传递。就实验而言, 尽管对两个相互远离的系统的测量总是能得到一致的结果, 但由于这种测量结果是随机且无法控制的, 因此这种测量并不能用于超光速传递信息。

(ii) 薛定谔猫佯谬。当把波函数的概念应用于宏观物体时, 似乎会导致一些令人难以理解的结果。例如, 薛定谔设想把一只猫、可以杀死猫的毒气装置以及可以触发该装置的放射源放在一起, 如果放射源中的原子发生衰变, 则会触发毒气装置, 猫会被杀死, 而如果没有衰变则猫会活着。在观测放射源之前, 放射源处在衰变和未衰变的叠加态上, 那么相应的, 猫也处于“生”和“死”的线性叠加态上。但是, 实际上人们看到的猫要么是活的, 要么是死的, 很难想象这种死活叠加的状态。

(iii) 维格纳朋友佯谬。维格纳指出, 待测的量子系统与观测者的划分并不是唯一的。在上一例中, 我们可以把放射源作为待测量子系统, 猫作为观测者; 或者把放射源+猫作为待测量子系统, 把负责照看实验的朋友作为观测者; 或者把放射源+猫+朋友作为待测系统, 自己作为观测者, 在这几种情况下, 发生“测量”和相应的波包塌缩时刻各不相同。这表明在哥本哈根诠释中波函数不仅不是实体, 而且不仅仅与待测的系统有关, 而是也与观测者有关。

另外, 哥本哈根诠释的一个缺点是它需要预先假设由经典力学描述的物体(测量仪器或观测者)的存在, 而不能完全从量子力学本身出发导出其一切结果, 这导致其难以应用于量子宇宙学这样原则上没有“观测者”或任何经典物体的情形。

一种与哥本哈根诠释完全不同的量子力学诠释是多世界诠释(Many Worlds Interpretation), 由埃弗里特(Hugh Everett)提出。Everett是惠勒(J. A. Wheeler)的学生。惠勒一直主张从物理方程(例如薛定谔方程)本身导出物理理论的一切诠释, 并且对量子引力和量子宇宙学研究有浓厚兴趣。惠勒一位较早的学生、著名的物理学家费曼(Richard Feynman)受狄拉克启发, 于1948年提出了一种新的量子力学的表述形式, 即所谓路径积分(path integral)形式。在这种形式中, 量子系统的演化被认为可以有无限多种不同的可能路径, 每一路径都有一个相应的几率振幅, 这一振幅由 $e^{iS/\hbar}$ 给出, 这里S是沿该路径的作用量。这一理论给出了一个从量子力学角度对经典力学的解释: 人们早就知道, 经典力学中系统演化使作

用量取极值. 而在路径积分中, 在非经典路径处, 由于不同路径产生的作用量各不相同, 这导致几率振幅的相位因子快速变化, 最后对几率振幅的贡献几乎抵消; 而在经典路径处, 由于其作用量取极值, 在微小扰动下几率幅变化不大, 可以相干的叠加在一起, 从而得到较大的几率. 如果这个路径的分布几率很大, 系统就好像按经典力学的规律运动, 这为描述从量子到经典的过渡提供了一种表述.

埃弗里特提出了一种新的量子力学诠释, 主张量子力学理论中并不需要预先假定存在具有特殊地位(服从经典力学而不是量子力学)的观测者或测量仪器, 待测系统和仪器的整体状态可由一个普适波函数(universal wave function)描述, 量子测量就是待测系统和仪器之间的相互作用, 这种相互作用过程由整个系统的薛定谔方程决定, 导致二者形成一种关联的(纠缠的)状态, 埃弗里特将这种关系称为相对态(relative state). 在这一理论中波函数是实体, 但并没有所谓的波包塌缩, 一切演化都是幺正的(也即由薛定谔方程描述), 在测量过程结束后, 系统仍处在不同本征态的线性叠加态上, 当然也没有任何与波包塌缩有关的佯谬. 那么, 如何理解我们在一次实验中只能随机地看到某一个本征值的测量结果呢? 例如在薛定谔猫实验中, 波函数可以分解为两项之和: 粒子衰变 $\otimes$ 猫死亡, 以及粒子未衰变 $\otimes$ 猫活着, 埃弗里特主张, 正是相互作用使这两项分裂为不同的分支(branch), 在每一个分支中观测者都只能看到与自己的观测结果一致的世界, 而无法看到不同测量结果的世界.

惠勒于1956年访问哥本哈根期间, 曾试图向玻尔等人解释埃弗里特的新理论, 但未能取得成功. 他不愿意与玻尔发生冲突, 因此坚持要埃弗里特把论文写得比较简洁、抽象和数学化, 因此这一理论最初并未引起人们的注意. 埃弗里特后来也访问了哥本哈根, 并当面与玻尔进行了讨论, 但玻尔等人在量子力学上的立场早已固化, 认为埃弗里特不懂量子力学, 因此未能深入讨论. 他毕业后离开学术界转入国防研究. 惠勒学派另一位比埃弗里特年长一点、研究量子宇宙学理论的学者德维特(Bryce Seligman De Witt) 认为这一理论非常重要而却默默无闻, 感叹“这是世界上保守最好的秘密”. 他撰文介绍了埃弗里特的论文, 将该理论称之为量子力学的多世界诠释, 并编写了包括埃弗里特论文在内的《量子力学多

世界诠释》一书^[10].

根据该诠释, 宇宙中无时不在发生的各种相互作用都相当于量子测量, 这使世界迅速分裂成难以想象的巨大数量的各种可能分支, 每一分支中发生的情况各不相同. 例如, 在这一世界中, 此刻笔者正在撰写这篇文章, 在另一个可能世界里, 笔者可能并未打算撰写这一文章, 在更多的其他可能世界里, 也许根本没有笔者这个人, 甚至根本没有人类乃至地球. 这听上去极为疯狂, 但逻辑上是完全自洽的. 不过, 对于量子实验中看到的几率现象在多世界理论中如何解释, 还是存在一些争议——既然每种可能性都实现了, 又如何谈到几率? 埃弗里特以及后来的一些人试图从量子力学的数学形式本身证明通常量子力学中作为基本假定的玻恩规则, 但关于这些证明, 现在还存在一些争议^[11,12].

多世界诠释现在已是量子力学的主流诠释之一. 不过, 很多人还是觉得这种诠释难以接受. 在多世界诠释中, 每一次微小的相互作用都会产生数量巨大、相差无几的世界, 这难免令人觉得古怪. 不过, 埃弗里特最初提出的一些观点后来得到了广泛的认同, 例如, 应该尽可能从量子力学数学形式自身导出其诠释, 测量仪器和测量过程应该完全可以用量子力学描述而无需专门引入服从经典力学的测量仪器, 等等. 后来Zurek等人发展的退相干(decoherence)理论通过系统与环境的相互作用解释从量子态到经典态的转变, 这样至少部分地可以用量子力学的幺正演化解释“波包塌缩”. 20世纪80年代, 盖尔曼(Gell-Mann), 哈特尔(Hartle), Griffith, Omnes等人发展了相容历史(consistent history)诠释以描述量子测量过程. 在Omnes看来, 相容历史诠释已经汲取了埃弗里特理论的精华, 用退相干理论重新解释波包塌缩, 这样就解决了哥本哈根诠释中原来存在的主要问题, 没有必要把多个世界当做真实存在的^[13]. 另一方面, 对于那些愿意接受多世界诠释的人来说, 也存在如何理解所谓的“多个世界”的问题. 在多世界诠释中, 对应每个不同的测量结果都存在一个相应的分支. 由于退相干, 这些不同的分支的因果演化几乎是独立的, 也正是在这个意义上, 这些分支被称为平行的世界或宇宙. 但如果有人要问, 这些平行宇宙是否“真的存在”? 那我们要指出, “存在”一词本身就有很多不同的意义. 比如, 我们可以说, “柏拉图这个人是存在的”, 也可以说, “平方值等于2的数是存在的”,

但显然这两种“存在”的意义是各不相同的。如果我们自己在某一个宇宙中，平常所说的一切“存在”都是在这一个宇宙中的存在，那么我们是否可以谈多世界是“实际存在”的呢？这种“存在”的本体论意义是什么？这恐怕是物理学抛给哲学的一个问题。

5 总结

上面介绍了几种在不同的物理学理论中出现的多重宇宙概念。某些宇宙学家把这些概念做了一些分类，如Max Tegmark把多重宇宙分成4种层次的^[14]，分别是时空上相互没有联系的；所表现的物理规律不同的；量子力学中的多世界。第4层则是Tegmark猜想的比上述几种更普遍的、数学上的集合理论(Set Theoretic)所允许的多重宇宙。Brian Greene^[12]讨论了9种多重宇宙，分别是缝合的(quilted)、暴胀的(inflationary)、膜(brane)、循环的(cyclic)、景观的(landscape)、量子的(quantum)、全息的(holographic)、模拟的(simulated)、最终的(ultimate)，限于篇幅这里不一一介绍了，但也基本上是我们前面介绍的几种多重宇宙的细分或推广。

对于“多重宇宙”这个概念是有许多质疑和争议的。首先是关于引入这个概念的必要性，量子引力理论家Lee Smolin 就认为，暴胀中产生的这些“多重宇

宙”仍然是同一个时空整体中的不同区域或者部分，它们的整体才是宇宙(Universe)，没有必要引入“多重宇宙”(multiverse)这样的名词或概念^[15]。但是目前看来，这一概念已被大多数学者和公众所接受和使用。实际上，只要我们理解其中的意义和道理，叫什么名字并不是太重要。

另一些学者则质疑多重宇宙概念研究的意义。科学之所以能不断取得进步，其关键在于理论预言能够用实验或观测加以检验，一个理论是否具有可证伪性甚至被认为是判断其是否为科学理论的试金石。而多重宇宙，无论是上面所介绍的哪一种，都没有办法直接用实验方法加以检验，因此这样的概念既无法证实也无法证伪。Paul Steinhardt认为^[16]，按照多重宇宙和人择原理的逻辑，几乎任何现象都是理论所允许的，因此这样的理论无法给出可验证的预言，在这样的方向上投入研究力量毫无意义。但另一方面，弦论研究者们往往并未把多重宇宙作为他们的出发点，而是在理论的推论中出现多重宇宙，至少他们的理论本身原则上还有别的验证方法，因此如果这些理论预言能得到某种实验的证实，也可以给出多重宇宙的间接证据。对特定的多重宇宙模型，在引入某些特殊假定情况下，也可以给出一些间接的检验^[12,17]。

参考文献

- 1 Kennedy D, Norman C. Introduction to special issue: What Don't We Know? Science, 2005, 309: 75
- 2 de Bernardis P, Ade P A R, Bock J J, et al. A flat Universe from high-resolution maps of the cosmic microwave background radiation. Nature, 2000, 404: 955
- 3 Planck Collaboration, Ade P A R, Aghanim N, et al. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. Astron Astrophys, 2016, 594: A13
- 4 Guth A H. The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origin. Cambridge: Persus Books, 1997
- 5 Barrow J D, Tipler F J. The Anthropic Cosmological Principle. Oxford: Oxford University Press, 1988
- 6 Weinberg S. Anthropic bound on the cosmological constant. Phys Rev Lett, 1987, 59: 2607–2610
- 7 Martel H, Shapiro P, Weinberg S. Likely values of the cosmological constant. Astrophys J, 1998, 492: 29–40
- 8 Susskind L. The Cosmic Landscape: String Theory and The Illusion of Intelligent Design. New York: Back Bay Books, 2006
- 9 Jammer M. The Philosophy of Quantum Mechanics (in Chinese). New York: John Wiley & Sons, 1974 [Jammer M. 量子力学的哲学. 北京: 商务印书馆, 1989]
- 10 DeWitt E S, Graham N. The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. Princeton: Princeton University Press, 1973
- 11 Saunders S, Barrett J, Kent A, et al. Many Worlds—Everett, Quantum Theory & Reality. Oxford: Oxford University Press, 2010
- 12 Greene B. The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos, Vintage Books, 2011
- 13 Omnes R. The Interpretation of Quantum Mechanics. Princeton: Princeton University Press, 1994
- 14 Tegmark M. Parallel Universes. Sci Am, 2003, 288: 41–51
- 15 Smolin L. Three Roads to Quantum Gravity. New York: Basic Books, 2001
- 16 Steinhardt P. Theoretic of anything. <https://www.edge.org/response-detail/25405>
- 17 Loeb A. An observational test for the anthropic origin of the cosmological constant. J Cosmol Astropart Phys, 2006, (5): 9

Summary for “宇宙是唯一的吗?”

Is ours the only universe?

CHEN XueLei

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

E-mail: xuelel@cosmology.bao.ac.cn

Is ours the only universe? In this article I review how the idea of “multiverse” in cosmology and quantum theories. Vast space-time were generated during inflation, for which the observable part is limited by horizon and only a tiny small fraction of the whole, and different effective physical laws may be found in the different parts. In quantum mechanics, according to the many world interpretation, during each quantum measurement the world split into different branches which evolve independently. However, whether such different branches should be considered “really exist” is more a question of philosophy than science. The concept of multiverse is however almost impossible to be tested with experiments or observations, thus raising the question whether they are meaningful science questions at all.

multiverse, inflation, anthropic principle, Many World Interpretation of Quantum Mechanics

doi: 10.1360/N972017-00039



陈学雷

1969 年生, 1999 年哥伦比亚大学博士毕业, 现为中国科学院国家天文台宇宙暗物质暗能量团组首席研究员, 星系宇宙学部副主任, 博士生导师. 从事暗物质、暗能量、星系大尺度结构等宇宙学研究, 主持暗能量射电探测实验(又称“天籁计划”), 已发表研究论文 100 余篇. 获国家杰出青年科学基金, 入选中国科学院“百人计划”, 国家百千万人才工程有突出贡献中青年专家.