

量子力学与哲学

作者：张天蓉

1. 温伯格的困惑

著名理论物理学家 Steven Weinberg 从 2016 年开始，多次提到他对量子力学的不满。除了 2016 年《环球科学》的文章^[1]之外，还包括他 2017 年和 2018 年作的演讲，以及今年 1 月 19 日他为纽约书评写的一篇文章。温伯格在这些公开场合，表达了他作为一个资深物理学家，对量子物理未来前景的困惑和担忧。

在量子力学的发展过程中，不乏提出质疑的物理大师，爱因斯坦就是最著名的一个，当初持怀疑态度的还有普朗克、德布罗意和薛定谔。他们都是赫赫有名的量子力学创始人：普朗克为解决黑体辐射难题，率先打响了第一炮；之后，爱因斯坦提出光量子以解释光电效应；然后，波尔的原子模型，以及德布罗意的物质波和薛定谔的波动方程，为量子论的建立奠定了重要的理论基础。

另一方面，绝大多数物理学家，甚至也包括上述抱质疑态度的大师们，都一致认为量子论对人类社会做出了杰出的贡献。量子力学被认为是自然科学史上被实验证明了的最为精确的理论，它是我们理解原子、原子核、电磁性、以及半导体、超导，等微观现象的理论基础。

那么，量子论到底怎么啦？既然已经取得了巨大成就，高科技产品中随处可见其应用，但为何又争议不断，众说纷纭呢？原来，人们对量子论的分歧不在计算结果，而是在于不同的诠释。如果不管这点，只要我们遵循一个原则：“闭上嘴，用心计算！”那便万事大吉，无论哪派的物理学家，都能学会程式化地使用抽象复杂的数学方法，对各种微观系统进行研究和计算，给出准确的结果。例如，量子力学对某些原子性质的理论预测，被实验验证结果的准确性达到 10^8 分之一！

对量子理论诠释的认识有一个过程，温伯格说，他曾经同大多数物理学家一样，认为量子力学只要实用就够了，无需深入探讨其基本概念和含义，但最近几年，他对量子力学的各种诠释越来越不满意，呼吁物理学家找到新的理论来解释量子力学中存在已久的问题。从这个意义上，温伯格明确地站到了当年爱因斯坦和薛定谔的那一边！

量子力学诠释的问题，一定程度上是与若干哲学问题相关的。曾经听过这样的说法：“物理学做到极致，便会诉诸于哲学”，笔者并不认为哲学能解决任何物理问题，但是不可否认两者之间的紧密关联。物理与哲学，探索的都是世界的本源问题，因此，最早期的物理学家，都同时又是伟大的哲学家。此外，几乎所有的物理学大师到了晚年都会走向哲学思维，温伯格的思想转变也可算作一个例子，从这些事实中不难体会到这两门学科之间深刻的内在联系。

2. 科学、哲学、宗教—历史回顾

万物如何构成？世界的本质是什么？自人类文明开始，此类问题就伴随而生。古希腊时，哲学科学为一体，均始于探求世界本原的本体论。泰勒斯认为世界本原是水，他的学生阿那克西曼德最为有趣且富有惊人的想象力。阿那克西曼德最令人吃惊的科学预言有两个：一是他提出了与现代宇宙学中某些模型颇为相似的循环往复宇宙论，二是他思考生命起源，认为生命从湿气元素中产生，最初大家都是鱼，后来来到陆地上，进化成人。这听起来与现代生物理论相似。然后，泰勒斯的学生的学生阿那克西美尼，比他的老师显得平庸一些，不过也有他独特的看法，他认为万物

之本源是气……还有最奇怪的是将“数”当作世界之本的毕达哥拉斯学派，这个学派奇怪的规则颇多，例如，其中包括“不能吃豆子”、“掉到地下的东西不能捡起来”之类匪夷所思的天方奇谈。

大凡哲学家们，总有些古怪行径。现在想象当年的古希腊一带，似乎充满了此类哲人。他们一个一个地排着队，走过古希腊，走过历史，走出爱琴海。从米利都到雅典、到埃及、到亚历山大港、到罗马。他们的脑袋中充满着当年的政治术语、哲学理念，也有伦理观念和科学思维。

米利都学派后面跟着毕达哥拉斯学派，这都是主张将万物归于一“本”的哲人们。不过，古希腊哲人并不仅仅研究本源问题，也探索世界随时间的变化规律，这正是赫拉克利特为代表的爱非斯学派和巴门尼德为代表的埃利亚学派争论的焦点。前者认为万物都在变化着，“一切皆流”；后者则反驳说：没有事物是变化的，只有静止不动。

主张“变化”的赫拉克利特，生性忧郁，以喜欢哭著称。他是一个出身高贵的异类，有机会做高官，继承王位，但他一生却大多数时候将自己隐居起来，没有朋友，不近女人。因此，当时的希腊人将他看成如同一个珍稀动物。赫拉克利特最早将“逻各斯”这个名词引入哲学，用以说明万物变化的规律性。此外，赫拉克利特还是第一个提出认识论问题的哲学家。

认为万物本源是永恒静止的巴门尼德，是那个提出几个著名悖论的芝诺的老师。巴门尼德认为，世间的一切变化都是幻象，因此人不可凭感官来认识真实。整个宇宙只有一个永恒不变、不可分割东西，他称之为“一”。芝诺捍卫老师的哲学观点，并提出了“阿基里斯和乌龟”、“飞矢不动”等悖论为其学派辩护。

值得后人可歌可泣的，还有那位从西西里岛走出的恩培多克勒，也就是英国近代诗人马修·阿诺德笔下的那位跳进火山口而被烤焦死去的“热情的灵魂”。恩培多克勒认为万物皆由水、土、火、气四者构成，然后，在实物之上，他又加进了几项主观而热情的、类似“认识论”的元素，认为我们周围的宇宙是在“爱”与“冲突”的较量之间来回摆动。

与现代科学最为接近的古希腊学派，是留基波和德谟克里特（**Democritus**）的原子论。尽管他们所谓的“原子”，完全不同于今日我们称为原子的东西，但在思维方法上使人不能不惊叹古希腊人的智慧。对原子论哲学家而言，物质已经不复具有如米利都学派时那么崇高的地位。德谟克里特说，每个原子都是不可渗透、不可分割的，原子所作的唯一事情就是运动和互相冲撞，以及有时候结合在一起。在他们看来，灵魂是由原子组成的，思想也是一种物理的过程。原子论者令人惊奇地想出了这种当年没有任何经验观察为基础的“纯粹”假说，直到两千多年后，人们才发现了一些证据，用以解释化学上的实验事实。这种解释让原子论重新复活，并且导致了牛顿绝对空间时间的理论。

刚才说过，古希腊时科学哲学不分，共处一体。再到后来的雅典三杰以及亚里士多德时代，科学逐渐从哲学中脱胎分离出来。而宗教，则以解释世界的权威姿态，洋洋得意地出场。说是解释世界，其实它们什么也没解释，也解释不了。因为宗教只不过是將一切原因都归于上帝和神。宗教之权威与崇尚理性的科学格格不入，但它们仍然希望能拉大旗做虎皮，于是便拉上了哲学，将哲学这匹大布平铺在科学与宗教之间，借助于哲学，来与科学拉上关系，也将哲学家描述的美妙的世界图景，解释为“充分体现了上帝之完美”。

正如罗素所定义的：

“哲学，乃是某种介乎神学与科学之间的东西。它和神学一样，包含着人类对于那些迄今仍为确切的知识所不能肯定的事物的思考；但是它又像科学一样是诉之于人类的理性而不是诉之于权威的，不管是传统的权威还是启示的权威。一切确切的知识都属于科学；一切涉及超乎确切知识之外的教条都属于神学。但是介乎神学与科学之间，还有一片受到双方攻击的无人之域；这片无人之域就是哲学。”

然而，历史并不总是按部就班地尽随人意。当科学势如破竹地壮大发展起来，将宗教的权威势力范围几乎驱赶到了一个狭小的角落之时，夹在中间的哲学也拦不住两者的冲突了。于是，教会利用它最后的权威，烧死了布鲁诺，反对哥白尼的理论，软禁了伽利略。

但权威挡不住自由思想，最终，科学支持的本体论逐渐取得了胜利，以数学及观测实验为手段的科学方法论发展起来，取代了古希腊哲学家们纯粹思辨性的描述。同时，科学也接纳融合了认识论，启蒙运动席卷欧洲。虽然宗教人士仍然口口声声地宣称“一切最终都是神的安排”，但却是显得如此软弱无力，因为科学似乎告诉我们：人类可以全方位地探索、理解、和利用万物，无需借助于上帝！

当年的哲学家们依然得意，因为他们尚能勉强赶上科学进展的脚步，甚至有些自以为是地以为可以凌驾于科学之上来“指导”科学。于是，笛卡尔开启了唯理论，并建立起可以决定性解释世界的宏伟哲学大厦。之后的康德，算是启蒙时期的最后一位主要哲学家。他发展了世界本体的哲学思辨，提出人类理性有其认识的极限。认为时间、空间、基本粒子、因果律以及上帝，是先验的而不是经验的，是人类理性所无法认识的，这理性之外的事物，又为信仰开启了地盘。

接着，科学继续突飞猛进。19世纪一百年，麦克斯韦电磁场、热力学定律，元素周期表、化学、进化论、细胞学，令人目不暇接。在经典物理的光芒照射下，拉普拉斯提出闻名遐迩的决定论：如果可以知道现在宇宙中每一个原子的状态，那么就可以推算出宇宙整个的过去和未来！

哲学家科学家们都信心十足跃跃欲试，相信人类将给予世界以终极解释，决定一切的日子不远了！

不过，到了20世纪，情况好像有些不尽人意！物理学中的相对论和量子力学两大革命，给人们脑海中的美妙图景带来了灾难性的冲击！物理学的革命，似乎带来了哲学的灾难？科学，年轻而有为，它大踏步地前进，所向披靡！科学不仅仅与哲学分离，科学本身各门学科的分类也越来越多，越来越细。即使是第一流的哲学家，也难以跟上科学的发展脚步，更不用说起指导作用了！那么，科学革命到底如何影响了哲学呢？下面我们主要探讨迄今已有将近120年历史的量子论，对原有几个哲学概念的冲击^[2]。

3. 决定论面临破产

量子力学与经典力学之不同，可以从它们对粒子（比如电子）运动的描述为例来说明。在牛顿力学中，粒子用它的“运动轨迹”来描述。所谓轨迹，是粒子的空间位置随着时间变化的一条“曲线”。经典粒子，一个时刻出现于一个空间点，这些点连接起来成为一条线，即粒子的轨迹。而在量子力学中，电子表现出“波粒二象性”，量子力学用波函数描述（一个）电子的运动。波函数是同时在空间每个点都有数值，类似于弥漫于整个海洋中的水分子密度。这就有了问题：一个电子怎么会同时出现于空间的每一个点呢？

为了回答上面的问题，物理学家一般将波函数解释为概率波。对此，我们又回到开始所述的温伯格之困惑。有关概率波，他有一段话发人深思：

“概率融入物理学使物理学家困扰，但是量子力学的真正困难并非概率，而是这概率从何而来？描述量子力学波函数演化的薛定谔方程是确定性的波动方程，本身并不涉及概率，甚至不会出现经典力学中对初始条件极为敏感的“混沌”现象。那么，量子力学中反映不确定性的概率究竟是怎么来的呢？”

温伯格的疑问貌似数学问题，但细究数学方面并无问题。薛定谔方程是线性的，如使用坐标表象，在一定的初始和边界条件下，它的解（波函数）是时空的确定函数。产生不了混沌，也不涉及任何概率。问题来自于如何解释这个弥漫于整个空间的“波函数”？如何将它与电子的运动联系起来？波函数表示的物理图像不可能是电子的电荷在空间的密度分布。叫人如何想象一个在经典理论中被看作一个“点”粒子的“实体小球”，到量子力学中却成了分布弥漫于全空间的东西？这种说法就连提出此解释的薛定谔本人也不能接受。

想来想去，比来比去，还是波恩的概率解释比较靠谱，因而被大多数物理学家所接受。波恩认为波函数是概率波。其模的平方代表粒子在该处出现的概率密度。

也就是说，人们使用概率解释，似乎仍然可以将电子想象成一个类似的经典小球（这使我们得到一点安慰），只不过我们不能确定这个小球在空间的位置，只能确定它在某点出现的概率！

于是，人们不再思考波函数，而转向思考概率，概率是什么呢？当然是从琢磨经典定义的“概率”开始。概率给世界带来了不确定性，它可以定义为对事物不确定性的描述。

然而，在经典物理学的框架中，不确定性是来自于我们知识的缺乏，是由于我们掌握的信息不够，或者是没有必要知道那么多。比如说，当人向上丢出一枚硬币，再用手接住时，硬币的朝向似乎是随机的，可能朝上，可能朝下。但按照经典力学的观点，这种随机性是因为硬币运动不易控制，从而使我们不了解（或者不想了解）硬币从手中飞出去时的详细信息。如果我们对硬币飞出时每个点的受力情况知道得一清二楚，然后求解宏观力学方程，就完全可以预知它掉下来时的方向了。换言之，经典物理认为，在不确定性的背后，隐藏着一些尚未发现的“隐变量”，一旦找出了它们，便能避免任何随机性。或者说，隐变量是经典物理中概率的来源。

那么，波函数引导到量子物理中的概率，是不是也是由更深一层的“隐变量”而产生的呢？

这个问题又使得物理学家们分成了两大派：一是爱因斯坦为首的“隐变量”派，认为“上帝不会掷骰子！”，一定是隐藏于更深层次的某些隐变量在起作用，使得微观世界看起来表现出不确定性。另一派则是以波尔为首的“哥本哈根学派”，他们认为不确定性是微观世界的本质，没有什么更深层的隐变量！正是这个分歧，导致了爱因斯坦和波尔之间的“世纪之争”。

1935年，爱因斯坦针对他最不能理解的量子纠缠现象，与两位同行共同提出著名的EPR佯谬^[3]，试图对哥本哈根诠释做出挑战，希望能找出量子系统中暗藏的“隐变量”。

爱因斯坦质疑量子力学主要有三个方面：确定性、实在性、局域性。这三者都与“概率之来源”有关。如今，爱因斯坦的EPR文章已经发表了80余年，特别在约翰·贝尔提出贝尔定理后，爱因斯坦的EPR悖论有了明确的实验检测方法。然而，令人遗憾的是，许多次实验的结果并没有站

在爱因斯坦一边，并不支持当年德布罗意-玻姆理论假设的“隐变量”观点。反之，实验的结论是：没有隐变量，不确定性是世界的本质。

量子力学创始人之一的海森堡，给出了微观世界的不确定性原理。这个原理表明，粒子的位置与动量不可同时被确定，位置的不确定性越小，则动量的不确定性越大，反之亦然。不确定性原理被无数实验所证实，这是微观粒子内秉的量子性质，反映了世界不确定的本质。

世界本质上是不确定的，这个结论使得当年拉普拉斯有关决定论的宣言变成了一个笑话。实际上，我们仔细想想，还是非决定论容易理解。试想，某个科学家在某天出了个意外的车祸死去了，难道这是预先（他生下来时）就决定了的结果吗？当然不是！除了量子论揭露了世界的本质是非决定论的之外，对非线性导致的混沌理论的研究，也支持非决定论。混沌理论解释了：即使是决定性的系统，也有可能可能产生随机的、非决定性的结果！

承认非决定性不难，难的是进一步解释下去。波函数的概率解释在理论上导致对概率本质的思考。而量子力学中的实验测量也使物理学家们困惑。微观世界是不确定的，宏观现象又都是确定的，如何从不确定的微观衔接过渡到确定的宏观？量子力学认为微观世界中粒子的状态是“叠加态”，是一种概率叠加态。而实验测量不到叠加态，只能得到某个确定值的“本征态”，这里的解释方法之一就是所谓的“波函数坍缩”，即“叠加态的波函数以某种概率塌缩成了本征态的波函数”。

测量为什么引起波函数坍缩？什么叫测量？

4. 测量的本质，主观和客观

首先以电子双缝实验为例，回顾一下量子力学中“诡异”的测量现象。

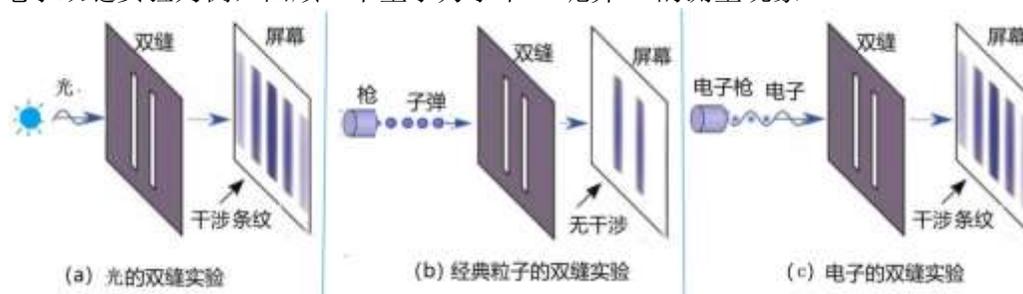


图 4-1：双缝实验

双缝实验中，像发射子弹一样，让电子一个一个地射到“双缝”附近。从经典观点看，电子是一个一个过去的，不可能互相干涉。但实验结果却是：屏幕上产生了干涉条纹。这表明电子具有波粒二象性，既是粒子又是波。电子的波粒二象性颇为奇特，而更为诡异的行为是表现在对电子的行为进行“测量”之时！

电子双缝实验中的干涉到底是如何发生的？为了探索这点，物理学家在两个狭缝口放上两个粒子探测器，企图测量每个电子到底走了那条缝？如何形成了干涉条纹？然而，诡异的事情发生了！无数次的实验证实：一旦想要用任何方法观察电子到底是通过了哪条狭缝，干涉条纹便立即消失了，波粒二象性似乎不见了，实验给出与经典子弹实验一样的结果！

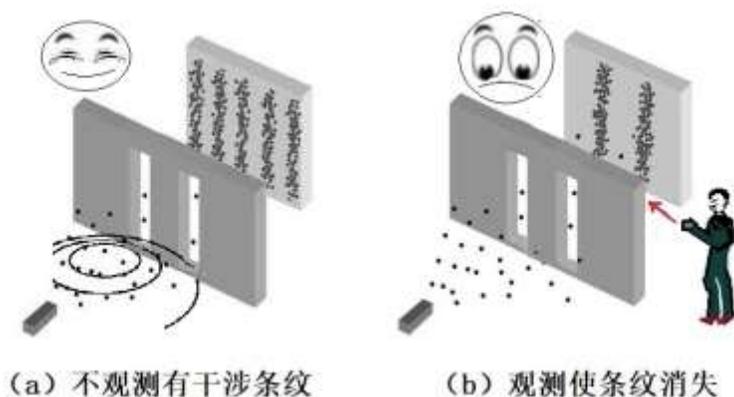


图 4-2：测量影响结果

刚才说到“用任何方法观察电子”，括号中这句话表达的意思就是“测量”，或者称为“量子测量”。量子测量有别于经典宏观测量，主要是指在量子测量中，测量所涉及的仪器、方法和手段，一定会与微观系统相互作用，互相形成纠缠态，从而影响测量结果。而在宏观世界中进行的经典测量，就可以做到环境与被测系统独立，或者说改善实验条件，可以使得互相之间的干涉很小，基本能够忽略不计。因而，经典测量基本可以做到不影响测量结果。

量子测量则有所不同，根据量子理论，微观世界的电子，通常处于一种不确定的、经典物理不能描述的叠加态：既是此，又是彼。比如说，被测量之前的电子到达狭缝时，处于某种（位置的）叠加态：既在狭缝位置 A，又在狭缝位置 B。之后，“每个电子同时穿过两条狭缝！”，产生了干涉现象。

但是，一旦在中途对电子进行测量，量子系统便发生“波函数坍塌”，也就是说，原来表示叠加态不确定性的波函数塌缩到一个固定的本征态。因此，波函数坍塌改变了量子系统，使其不再是原来的量子系统。量子叠加态一经测量，就按照一定的概率规则，回到了经典世界。

这种解释带来很多问题。所谓波函数塌缩，与演化是迥然不同的过程，演化遵循薛定谔方程，而波函数塌缩是随机的、不可逆的，没有适当的方程来描述。（后来有另一种说法“退相干”，也并不能完全令人满意，在此不表）。并且，至今也不清楚塌缩的内在机制究竟是什么。是什么触动了波函数的坍塌？是“观测”吗？人们经常说到“观测”，即观察加测量，但却没有给它下一个精确的定义。什么样的行为算是一次“观测”？仅仅仪器与粒子的相互作用，似乎还不能构成“观测”。那么，如何理解观测（测量）的本质？谁才能测量？只有“人”才能测量吗？猫能不能测量？计算机呢？机器人呢？测量和未测量的界限在哪里？

例如，月亮高高地挂在天上，用眼睛望它一眼，知道它在那儿，也就算作是一种测量。按照经典物理的观念，主观和客观是分开的。月亮客观存在于地球之外，不管我们主观意愿“看”还是“不看”它，它都在那儿。

然而，量子世界中不是如此，未“测量”之前，电子位置不确定，所以谈论“电子位置”没有意义。只有测量，才赋予电子以确切的位置。这句话似乎就是说：电子的客观存在性，是以测量为前提的，所以，反对派就问：难道月亮只有在我们回头望的时候才存在吗？

测量，是人类有目的而进行的活动。要测量什么东西，涉及到人的主观愿望。主观和客观也是长期有所争论的哲学话题。主观指人的意识，客观指不依赖于意识的物质世界。量子力学对测量的解释，使人们又回到哲学上关于主观和客观的困惑中。

以上诠释中电子的行为，也等同于公众皆知的“薛定谔的猫”：打开盖子前，猫是既死又活，只有揭开盖子后观测，猫之死活状态方能确定。那么，有人又问：猫自己不是也有感觉吗？虽然人没有打开盖子“看”，猫自己应该知道自己的“死活”啊！

此外，我们还可以返回来思考爱因斯坦提出的 EPR 佯谬。因为波函数塌缩是在同一时刻发生在所有地方，对量子纠缠中的两个粒子，导致了爱因斯坦的“幽灵般超距作用”之困惑。总而言之，看起来，对量子力学的诠释违反了确定性、实在性、和局域性。经典物理学从来认为物理学的研究对象是独立于“观测手段”存在的客观世界，而量子力学中的测量却将观测者的主观因素掺和到客观世界中，两者似乎无法分割。

测量中主观客观的关系也相关于概率的“主观客观”性。对概率通常也有两种极端的解释：频率派和贝叶斯派。频率派强调概率的客观性，一般用随机事件发生的频率之极限来描述概率；贝叶斯派则将对不确定性的主观置信度作为概率的一种解释，并认为：根据新的信息，可以通过贝叶斯公式不断地导出或者更新现有的置信度。贝叶斯派的主观概率思想与量子力学的正统诠释在某些方面有异曲同工之妙，因此而有人提出量子贝叶斯模型，也许能为量子力学的诠释提供一种新的视角^[4, 5]。对此我们不予深究，感兴趣的读者可参考笔者的另一篇文章^[6]。

物理世界是客观存在的，而解决问题的科学方法却总是人为的、主观的。回到前面说的测量过程，有一派观点（例如，冯诺依曼）认为，人类意识的参与才是波函数塌缩的原因？那么，究竟什么才是“意识”？意识是独立于物质的吗？意识可以存在于低等动物身上吗？可以存在于机器中吗？这带来的种种问题，比波函数塌缩的问题还要多，而且至今无解。

但是，看起来，因量子力学测量而引发的，人的主观意识与物质世界的关系，是一个人们总想回避但却终究回避不了的事情，就像哲学家们争论了两千年以上的自由意志问题。

5. 自由意志定理

人类有关自由意志的思考，由来已久，但科学界的真正介入，却是因为十几年前（2006年）被普林斯顿两位数学家（John Conway 和 Simon Kochen）所证明了一个数学定理：“自由意志定理”^[7, 8]！

这个定理，也是来源于量子力学，可以用一句话简单地陈述它：“如果人有自由意志，那么亚原子粒子也有。”

也许大多数中国人乍一听这句话，都会觉得匪夷所思，怎么能把“意志”这种人类才具有的意识活动，与微观世界那些“无知无觉”的亚原子粒子联系在一起呢？

这儿有部分原因可能是由于中英文转换的问题，不过，“自由意志”所对应的英文是“Free Will”，意思也差不多。这个名词引发人们争论了上千年，却一直没有一个准确的定义。但粗略地解释，就是人在决定做某件事的时候，他是否具有完全独立选择的意志？

• 自由意志

自由意志是一个古希腊开始就有的哲学概念，归功于公元前 4 世纪的亚里士多德。亚里士多德提出“四因说”，不完全等同但类似于现代的“因果”观念和决定论。从事件的“原因”往上推，便自然地终结到某种“神”力，宗教使用他的这个哲学推论来作为“神”存在的理论基础，但从而也引起一个令人深思的问题：既然一切都是神创造的，都是神的意愿，那么一个人犯的错误是否也是神设计的呢？换言之，犯法而杀人的罪犯是否应该受到惩罚呢？

因此，自由意志之所以受到持久的关注，主要是这个问题在哲学上和道德责任有关。对它的解读影响到宗教、神学和道义，也涉及心理学以及司法界判罪等问题。就像我们现在为机器人写程序，会有 bug，也许使机器人犯错误伤害了人。但这不是机器人的责任而是程序员的错误，用自由意志的语言来表达，就可以说“机器没有自由意志啊！”

那么，上帝创造的人是否有自由意志呢？即使我们不涉及宗教神创论的观点，这个问题也显然与决定论还是非决定论有关。不仅神学上有决定论，科学上的经典物理也是决定论的（爱因斯坦也是笃信决定论的）。如果世界和人脑都是决定论的，一个人的基因和大脑结构，是在出生时就决定了，那么，他的所有行动，包括犯罪，是不是都预先决定了？

也就是说，如果决定论是成立的，那么还存在自由意志吗？决定论和自由意志可以相容吗？在这个问题上，哲学家基本上分成了三大类。认为可以共存的算一类（相容主义着），不可共存者又分两类：一类支持决定论的 **Determinist**，另一类支持自由意志的 **Libertarian**。

偏向“可共存”的哲学家很多。柏拉图、笛卡尔、康德等，在某种意义上都算。这几个二元论者主张世界有意识和物质两个独立本原，物质世界的一切是决定了的，但意识世界是自由的。

荷兰的犹太哲学家斯宾诺莎 **Spinoza** 是决定论者。他在伦理 **Ethics** 一书中，用写数学书的方式“证明”了自由意志不存在。

第三类是自由意志哲学家，代表人物是伊壁鸠鲁学派的卢克莱修 **Lucretius**。伊壁鸠鲁（**Epicurus**，公元前 341 - 前 270 年）是第一个无神论哲学家，他的学说中最有趣的观点有两个：一是将享乐主义与德谟克利特的原子论结合起来，二是他对死亡的看法。伊壁鸠鲁认可德谟克利特的“灵魂原子”，认为人死后灵魂原子飞散各处，便没有了生命。所以伊壁鸠鲁认为对死亡没必要恐惧，因为：“死亡和我们没有关系，只要我们存在一天，死亡就不会来临，而死亡来临时，我们也不再存在了。”

卢克莱修为伊壁鸠鲁的自由意志思想辩护，最出名的是他的长篇诗歌作品《物性论》，其中一些有意思的想法。和现代量子不确定性原理有相似之处。

实际上，是不可能只从哲学的理性思辨就能回答“自由意志是否存在”这个问题的。所以，我们更感兴趣的是 2006 年由两位数学家证明的“自由意志定理”，从那时候起，才真正开始了物理学界对“自由意志”的哲学思考。

• 自由意志定理

数学家康威（Conway）的名字早就广为人知，笔者 80 年到美国留学时，奥斯丁德州大学天文系的一位教授热衷于在计算机上玩一种“生命游戏”，就是康威发明的。这个游戏用几条简单的规则，模拟生命演化过程。

A. 定义和公理

首先，两位数学家给“自由意志”下了一个明确的定义：**not determined by past history**，意思是做出的选择不能由过去发生过的历史所确定。用更为数学的语言来说，就是“不是宇宙所有过去历史的函数”。

3 个公设：SPIN，TWIN，MIN

SPIN：源于量子力学，对一个自旋 1 粒子，在空间三个垂直的方向上测量其自旋的平方，总是得到两个 1（黑点），一个 0（白点），如图所示 3 种情形。

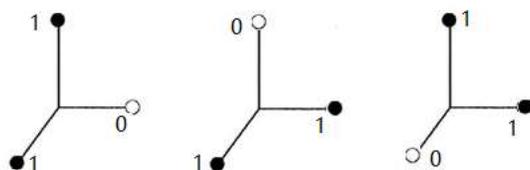


图 5-1：三个方向测量自旋平方的三种组合情形

TWIN：源于两个粒子量子纠缠（EPR），当在相同方向上测量两个粒子自旋平方时，总是给出相同的结果（1 或 0）。

MIN：源于狭义相对论和因果率，光速最大，类空间隔的实验者 A 和 B 不能互通消息和彼此影响。

B. KS 佯谬

自由意志定理被简称为 CK 定理，C 和 K 分别代表康威和寇辰。2006 年 CK 定理的工作是基于寇辰 40 年前的 KS（S 代表另一位科学家）佯谬^[9]。因此，明白 KS 佯谬是理解 CK 定理的关键。

寇辰—史拜克佯谬：如下图所示，在立方体的 6 个面上，每个面选择 9 个点，总共 $6 \times 9 = 54$ 个点，再加 12 条边的中点，共 66 个点，从立方体的中心向这 66 个点连线，可以得到 66 条射线。不过，位于同一条直线上的对应两点，被认为是表示同一个方向，所以，总共有 33 个方向。

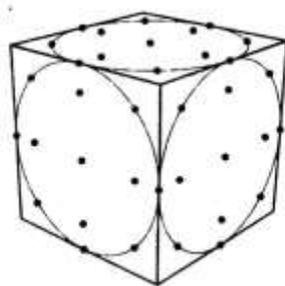


图 5-2：KS 佯谬用到 33 个方向

现在，我们给每个方向上都安排一个 0 或 1 的数值，就好比给图中的 33 个（双点）着上颜色：或黑或白。上面这个“对应点涂同样颜色”的操作不难做到，但是，如果再加上下面第二个涂色规则，就不一定了。

这 33 个方向中，可以构成一些互为垂直的三个一组的框架。第二条涂色规则则要求：任意三个彼此垂直的方向上，都恰好被安排有两个 1 和一个 0。也就是说，33 个方向可能构成的 40 个不同的“三向架”，都要求是图 5-1 所示的 3 种情形中的一种。事实上，KS 佯谬就是证明了：不可能存在这样一种安排，使得满足上面两条涂色规则。

可以将以上的陈述说得更“数学”一些：对图 5-2 中的立方体和 33 个方向中的任意方向 w ，不存在这样一个函数 $\beta(w)$ ，在任意三个彼此垂直的方向上，函数 $\beta(w)$ 给出的值为两个 1，一个 0。

C. 思想实验

以上的定义、公设、以及 KS 佯谬，都是为了最后证明“自由意志定理”服务的。康威和寇辰根据三个公设，提出了一个思想实验。

考虑自旋为 1，静止质量不为 0 的某种粒子：它可以被一个三个分量的波函数所描述。这种粒子不是光子。光子因为静止质量为 0，三个自旋分量只有两个非 0 分量是独立的，对应于经典电磁理论中的两个圆偏振。对于有静止质量的自旋为 1 的粒子，三个分量可以用 $(1, 0, -1)$ 来表示。

如果我们在空间中 3 个互为垂直的方向测量此类粒子的自旋，可按一定的概率得到 $(1, 0, -1)$ 。但因为三个方向的自旋算符不对易，所以不可能同时在三个方向测得确定的数值。为了解决这个问题，我们可以不测量自旋而测量自旋值的平方，因为在三个垂直方向的自旋平方的算符是互相对易的。测量结果总是两个 1，一个 0，这也就是图 5-1 所描述的 SPIN 公设的内容。

假设在思想实验中，上述粒子形成量子纠缠对 a 和 b (EPR) 被发送出来。当 a 、 b 两个粒子的自旋平方在相同方向上被测量时，总是给出相同的结果。比如，爱丽丝在 (x, y, z) 方向上测量粒子 a 的自旋平方，而鲍勃在某个 w 方向上测量粒子 b 的自旋平方，如果正好 w 与 x, y, z 中的一个方向相同，则鲍勃测得的结果将与该方向上爱丽丝测得的结果一致。这是 TWIN 公设。

为了满足公设 MIN，可以将爱丽丝和鲍勃分开一段距离，物理的语言叫做“类空间隔”。例如，爱丽丝带着粒子 a 在地球上进行测量，而鲍勃带着粒子 b 在火星上进行测量。这样，相对论和因果的时序性严格保证了他们各自都具有自由意志，作出选择。

D. 结论

CK 定理，从“人具有自由意志”这个假定出发，用反证法来证明“粒子也具有自由意志”。也就是说，如果实验者的选择不是历史的函数，那么，被测量粒子给出的结果也不可能是历史的函数。在这儿，粗略地说：自由意志 \Rightarrow 不是历史的函数 \Rightarrow 不是预先设定的 \Rightarrow 没有隐变量。

实验者爱丽丝和鲍勃的自由意志是由几条公设保证了的，现在，假设实验结论反过来，即假设被他们测量的粒子 a 和 b 没有自由意志。由于实验者 B 具有自由意志，可以在 33 个方向中任意选择，这样的话，粒子 b 必须面对所有 33 种可能性给出与粒子 a 被测量时相符合的结果，就好似 b 带了一个“基因本”，即函数 $\beta(w)$ ，以保证这两点：1. 任意一个方向 w 的测量得到 0 或 1，2. 任

意 3 个垂直方向得到一个 0 两个 1。然而，KS 佯谬已经证明，这样的函数 $\beta(\mathbf{w})$ 是不存在的，所以假设的结论不成立，所以就证明了：粒子必须具有自由意志。

E. 意义

自由意志定理与贝尔不等式比较，更为彻底更为直接地否定了决定论。贝尔不等式否定的是定域隐变量，而自由意志定理否定了所有的隐变量，包括非定域的。

自由意志定理有一个基本假设：我们人类是拥有自由意志的。虽然不能证明这点，但很少人持怀疑态度，否则，人还算人吗？

定理彻底否定了决定论，特别是很多哲学家赞成的二元论，宗教实质上也是支持二元论的。起码现代的基督教是如此，他们认为上帝造出的天使是完美的，但因为他们有自由意志而有时选择了罪恶才变成了魔鬼。

二元论哲学家笛卡尔认为，人的意识是自由的，但物质是决定论的。但 CK 定理将这两个世界联系起来，因为人的自由意志决定了粒子的自由意志，而宇宙万物包括人，都是由基本粒子组成的。因此，人、粒子、万物、整个宇宙都有自由。宇宙的未来并不确定。

仅物理而言，自由意志定理是对量子力学中不确定性的一个精确陈述。但其意义却超越量子，超越物理，潜在地陈述了整个世界的不确定性，这一点比量子力学本身更为基本。也许将来，别的理论取代了量子论，但却取代不了宇宙的不确定性。

CK 的文章中对自由意志给出了明确的定义，粒子的行为显然是自由的，但意志体现在哪儿呢？从而进一步也思考从粒子到最高级的人脑自由意志的问题，基本粒子的自由意志可以只是它的不确定性的另一种表述。然而，从无生命到生命，还有各种层次的结构，果蝇、植物、黏菌，等等，自由意志也应该体现出从复杂到简单的渐变过程。

自由意志定理使人们再度思考微观与宏观的过渡问题。我们仍然不能否定物质世界与精神意识之不同。一方面，物质世界中，微观过渡到宏观，量子物理中的不确定性过渡为经典物理的确定性。另一方面，生物界的进化过程，产生了大脑，继而产生了意识，这是一个比物质世界的过渡复杂得多得多的过程，到了意识阶段，人脑又有了“自由意志”，不确定性又回来了，这个过程是如何产生的呢？起码说明生物系统中，粒子的不确定性并没有完全被统计平均所掩盖，能在宏观行为中体现出来。自由意志定理也可以算是理性探讨“意识”“灵魂”等问题的一个开端。

6. 因果律

延迟选择实验是美国理论物理学家惠勒（John. A. Wheeler, 1911—2008）在 1979 年提出的一个思想实验。上世纪 80 年代初，我到美国奥斯丁相对论中心读博士，惠勒是我的博士论文指导小组成员之一，当年他正在准备到中国访问的一篇讲稿，其内容就是基于他提出延迟选择实验的论文：“Law without Law”。因此，我有幸与惠勒合作将其讲稿翻译成中文。后来，此讲稿由科大的方励之整理编著，1982 年出版，取名为《物理学和质朴性》^[10]。

作为波尔学派的一员，惠勒对量子力学有深刻的理解，在 2000 年，量子力学诞生一百周年之际，惠勒写了一篇文章表示纪念^[11]。文章中综述了量子力学的巨大成就，以及理论诠释存在的问题。惠勒一直到 2008 年 96 岁高龄去世之前，都还一直在继续思考量子力学中的哲学问题。

惠勒的延迟选择实验将量子力学对传统哲学中实在观及因果律的挑战推向极致。但他认为这些问题并非哲学问题，而是物理问题，应该成为下一代物理学家所投身的目标。

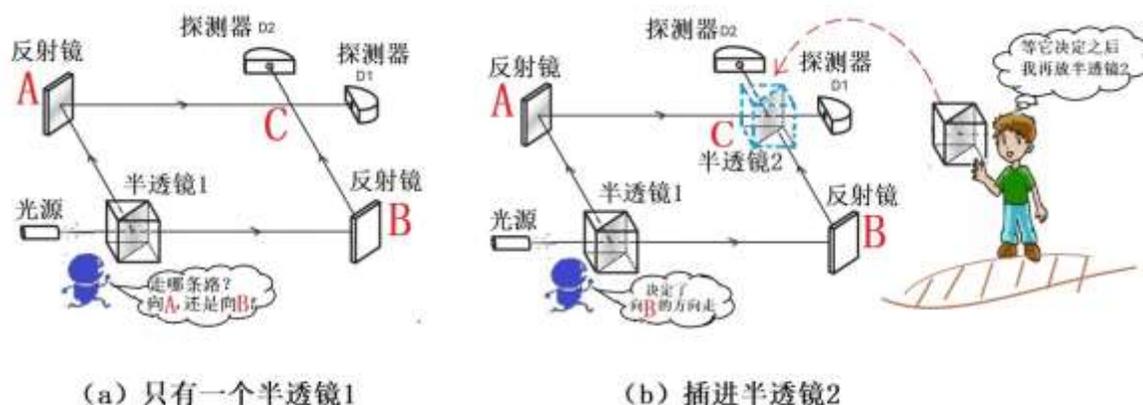


图 6-1：延迟选择实验

延迟选择实验实际上是杨氏双缝实验的变种。图 6-1 是其简单干涉仪版本。如图 6-1a 所示，从光源发射的光子束，到达半透镜 1 时兵分两路：50%的光子走向 A，50%的光子走向 B。经过 A 或 B 的全反射之后，分别到达探测器 D_1 和 D_2 。图 6-1a 中的 C 点，看起来像是个交叉点，但实际上两条光线互不搭架。因此，实验结果显示，当光子一个一个从光源发出来，有时候探测器 D_1 响，有时候 D_2 响，绝不会两个同时响。这个实验说明光是作为一个一个的光子被探测到的，显示出光的粒子性。

然后，惠勒说，我们在 C 点放上一个半透镜 2，让两条光路关联起来。光子仍然是一个一个被发射出来，但这时，从 A 来到 C 的光子，不会全部走向 D_1 了，而是有一半的可能性被半透镜 2 反射而走向 D_2 。从 B 来到半透镜 2 的光子，也同样地面对着两种选择性，见图 6-1b。这种情形下，实验结果显示，两条光路会发生干涉现象，并且，借助于调整两条路的光程差，可以做到探测器 D_1 收不到任何信号，即两条光线相消，而只有 D_2 收到信号，来到 D_2 的两条光线相增。

上面实验结果并没有多奇怪，只是显示出了光的波动性质而已。如何解释单光子干涉呢？一种说法是光子同时走了两条路，就是说，光子在到达半透镜 1 的时候，决定了自己走一条路还是走两条路，一条路表示是粒子，走两条路说明是波！这种解释很奇怪：难道光子在到达半透镜 1 的时候，就已经知道道路前面的 C 处有没有半透镜 2 吗？并且，这种一个光子同时走两条路的解释在宏观世界是不可想象的，据说惠勒曾用一幅漫画来调侃：就像是滑雪者经过一棵树时的轨迹一分为二，左脚走一边，右脚走另一边。这和爱因斯坦当年的疑问本质上也是一样的，但是，谁也没能给出更好的解释呀。

那是 1979 年，爱因斯坦和波尔都相继进了天堂，只有惠勒、贝尔等还在折腾。于是，惠勒又说，既然光子是首先经过半透镜 1 时就决定了是走 1 条路或 2 条路，那么，我们就来个“延迟选择”，就是说，等（延迟）到光子过了半透镜 1 之后快到 C 点时，再决定（选择）放还是不放半透镜 2，看看结果会如何呢？

实验结果使人大跌眼镜：如果不放半透镜 2，光子似乎只走 1 条路，如果放半透镜 2，光子走 2 条路。但是，光子早在半透镜 1 时就作了决定，怎么会被后来放没放半透镜 2 的行为所改变呢？这样就导致了一个怪异的结论：观察者现在的行为决定了光子过去的路线。好像是“未来改变了历史”，违反了因果律！

延迟选择实验被提出时，是个思想实验，但却具有实际可操作性。在惠勒提出构想 5 年之后，马里兰大学的一个团队实现了延迟实验，其结果与惠勒的预言一致。后来，更多的实验也证明了同样的结论。那就是，观察者最后的选择可以改变光子过去的决定！

这个思想实验中，从光源经过 A、B 的两条路线，原则上可以无穷长，于是，科学家们便尽可能地加长这两条光路，以增加“未来”与“过去”的时间差。2017 年，意大利的几个物理学家在超长的空间尺度上（地面到外层卫星之间，3500 公里）验证了惠勒的延迟选择实验。

不仅如此，惠勒还想象过在宇宙中天体的尺度上，利用中间星系对遥远恒星的引力透镜作用来实现延迟选择实验，如图 6-2 所示。

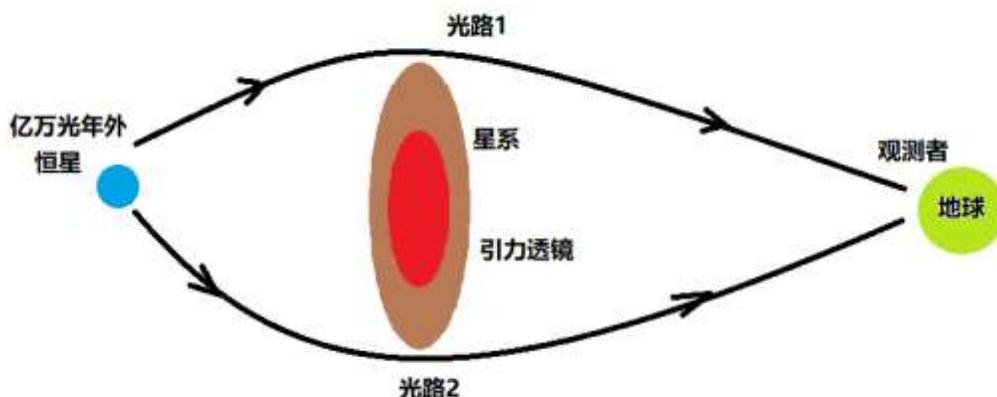


图 6-2：宇宙尺度上的延迟选择实验

惠勒也为此提出了一个具体的实验装置，将望远镜分别对准恒星所成的左右两个虚像，利用光导纤维调整光子间的光程差，形成干涉。

延迟选择实验突显了量子力学与经典物理在实在性、因果问题上的深刻分歧。物理学家们如何解释呢？大多数人不予解释，大师们仍然是各执己见，因为这归根到底还是量子力学诠释的问题。波尔、惠勒等代表的哥本哈根学派的基本说法可归纳如下：

不能将观察仪器与观察对象分开来讨论，放上半透镜 2 与不放半透镜 2 的两种情况，从经典观点看起来，只是光子行进过程中的最后部分不同，但这其实已经是两个完全不同的实验。玻尔曾说：“事实上，在粒子路径上再加任何一件仪器，例如一个镜子，都可能意味着一些新的干涉效应，它们将本质地影响关于最后记录结果的预言。”

按照经典物理学的还原论，物质还原成分子、原子……直到基本粒子。而物理过程，也都可以分解成更小的部分。在延迟选择实验中，光子按照时间顺序通过半透镜 1、（A 或 B）、C……，还原成几个不同的时段（部分）。从经典观点看，既然 C 之前的观察仪器部分是完全相同的，光子

在那些部分的行为也应该是完全相同的。这是得到“因果颠倒”荒谬结论的分析基础。但是，根据量子理论，却不能这样说。量子理论认为这是两个不同的实验。在每个实验中，都要把光子的全部行程当作一个整体来看待。不能认为两个实验中每个时段在不同的整体中会具有相同的行为。

此外，微观世界中的因果关系是否应该与其在宏观中的表现不一样？也是至今无定论的问题。

7. 时间到底是什么？

时间是什么？时间是大自然的奥秘，也是物理学家最感复杂最为困惑的事情之一。

量子力学与经典力学的巨大差异，启发我们许多哲学思考，特别是对哲学中最基本问题：时间和空间的思考。上一节中介绍的延迟选择实验，把时间问题尤其凸显出来。最简单的问题往往有最复杂的答案，时间和空间的问题证明了这点。

在牛顿的经典物理学中，时间和空间都被视为是绝对的，凌驾于一切物理规律之上。空间就像是立于宇宙中的大框架，或者说，可以用互相作匀速运动的惯性坐标系来表示。时间呢，则是一个以不变的速度运行的大钟。物体按照一定的时间规律在 3 维的空间框架（惯性系）中运动。因此，牛顿力学中的时间独立于空间，在所有的惯性坐标参照系中，时间是以一样的速度流驶的。

之后，爱因斯坦深入思考时间空间的问题，特别是在对“同时性”概念研究的基础上，假设了光速不变定律，建立了狭义相对论。提出了不同于经典的、相对性的时间观念。在狭义相对论中，时间与空间不再互相独立而是互相关联。时间变成了相对的，意思是说，相对于不同的惯性系，时间的流逝速度不一样。

相对论强调“相对”，爱因斯坦认为：在你讨论问题之前，一定要明确你是处在（相对于）哪个参照系。比如，你在静止的 A 参考系内观察，会发现运动参考系 B 内的事件具有尺寸收缩，时间延缓等效应。但如果你在 B 内观察 A 内的情况时，也一样觉得 A 中的尺寸收缩了，时间延缓了。因此，时间的概念只对应于特定的参照系才有意义。

时间问题是狭义相对论的核心部分，由此而给予人们一个崭新的科学的时空观。广义相对论则是将这种时空相对的观念扩大到具有物质和引力的情况。认为：时间因物质的运动而改变，空间因物质的存在而弯曲！时间和空间都是与物质分布紧密相关的客观存在。

两个相对论是爱因斯坦对人类文明作出的最杰出贡献，然而，使人迷惑的是，爱因斯坦并未因相对论而获得诺贝尔奖，他被授予 1921 年诺贝尔物理奖的原因是与量子力学有关的光电效应。通常，人们在评论这点时总将原因归结于“相对论太理论”、“没有充分的实验验证”之类的理由。根据近年来科学史家们研究的结果，其原因可能与一位哲学家有关，是与出生于瑞士的法国哲学家亨利·柏格森（1859 年—1941 年）有关。

更为具体地说，爱因斯坦正是在他的革命性的“时间”概念的问题上，与柏格森有关时间的哲学思想产生了冲突。也很可能是因为这个原因，相对论没有获得诺贝尔奖^[11]。

柏格森并非等闲之辈，他比爱因斯坦早生 20 年，当年爱氏最开始建立相对论时，不过是个无名之辈，而柏格森已经是颇为著名的哲学家。并且，柏格森思想深邃、文笔优美，对公众具有强烈的吸引力和感染力。正因为如此，他后来获得了 1927 年度的诺贝尔文学奖。

柏格森哲学研究的专题之一，就是探索时间的本质。早在 1889 年，柏格森就发表了他有关时间的第一本著作：《时间与自由意志》，那时的爱因斯坦还是个 10 岁孩童，正在做着他的追光之梦。

这种年龄和背景的巨大差异，使得柏格森一开始并不把爱因斯坦放在眼里。不过，他没想到这个专利局的小职员，居然提出了两个相对论，并且在时间的概念上与他针锋相对，一颗物理明星正在冉冉升起。

爱因斯坦是从物理学的角度研究时间，尽管他的观念新颖而具革命性，但在哲学上仍然属于将“主观”和“客观”截然分开的二元论。那时候的量子力学也只是刚刚开头，还没有如我们今天感受到的如此多的哲学问题从物理中冒出来。所以，爱因斯坦的相对论与柏格森的哲学观念格格不入。

柏格森不是将时间看成是主观之外的抽象概念来关注，而是感兴趣于所谓“生活时间”，即探讨对作为生物的我们人类的主观世界而言，时间意味着什么？柏格森坚持认为，要想认识时间，不能只诉诸科学这一个视角，而必须有哲学视角。因此，柏格森在巴黎时就对相对论提出了质疑，这一点并非秘密，诺贝尔委员会的成员们也都知道。柏格森认为，时间与人们的生活经验及主观感受有关，如果不提及人类的意识和感知，就无法谈论时间。柏格森认为爱因斯坦用时钟来定义时间是荒谬的，因为如果我们没有主观的时间感觉，我们就不会去建造时钟，更不会使用它们。柏格森不理解，为什么要用“火车到达”之类重要事件的记时描述来确定同时性，柏格森追求的同时性是当事人的基本感觉。

总而言之，柏格森重视的是存在于人类主观意识中的时间概念，而爱因斯坦是从物体的运动状态来定义时间。1921 年 4 月 6 日，爱因斯坦应邀参加在巴黎由法国哲学学会组织的一次学术活动，与柏格森不期而遇。两个当年最聪明的人有了观点交锋，在时间问题上采取了完全相反的立场。半年后，爱因斯坦获得了诺贝尔物理学奖，但颁奖理由是光电效应，而不是呼声颇高的相对论！这个结果是否真与那场辩论有关呢？需要留给后人去做进一步的研究和考证了。

爱因斯坦少年气盛，辩论中难免口出狂言，比如他说：“哲学家所说的时间根本不存在。”之类的断言，一定将当时已经 60 来岁的哲学大牛柏格森气得吹胡子瞪眼。为了更好地反击爱因斯坦，宣扬自己的时间观，柏格森接着出版了一本书《绵延性和时间性》，他在书中说：“钟的指针的运动对应着钟摆的摆动，但我们并没有像人们以为的那样测量了时间之绵延，而只是测量了同时性，那是另一种东西。要想理解时间，就要把钟表以外的一些新颖的、重要的东西纳入。”这儿他指的新颖而重要的东西便是人类感觉一类的主观因素。

事实上，两个人当时都得到了不少领先的物理学家，哲学家，思想家的支持。然而，随着时间流逝，科技发展，时代变迁，爱因斯坦的时间观占据了主导地位，柏格森的主观观点开始逐渐被人们淡化。似乎是象征着“理性”战胜了“直觉”，客观实在性打败了主观性。

然而，正当爱因斯坦认为他已经解决了时间的问题时，随之而来的是量子理论发现，以及不确定性原理等等。正如本文所介绍的，量子物理与经典物理之迥然不同，使我们重新思考对时间的理解。柏格森当年所坚持的主观时间概念，是否也有一定的正确性？是否有可能解决量子论中引发的若干困惑？对这些问题，也许我们还需要继续等待，时间本身会证明这一点。

参考文献：

【1】 The Trouble with Quantum Mechanics, Steven Weinberg, The New York Review of Books, January 19, 2017 Issue。

<http://www.nybooks.com/articles/2017/01/19/trouble-with-quantum-mechanics/>

【2】 张天蓉. 走近量子纠缠系列之三: 量子纠缠态[J]. 物理, 2014, 43(09): 627-630.

<http://www.wuli.ac.cn/CN/abstract/abstract61515.shtml>

【3】 Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. (1935). "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?". *Physical Review*. 47 (10): 777–780.

【4】 C. M. Caves, C. A. Fuchs and R. Schack, "Quantum Probabilities as Bayesian Probabilities," *Phys. Rev. A* 65, 022305 (2002).

【5】 Hans Christian Von Baeyer, *QBism: The Future of Quantum Physics*, Harvard University Press, 10/3/2016。

【6】 概率之本质—从主观概率到量子贝叶斯 | 张天蓉专栏, 《知识分子》微信公众号: The-Intellectual, 2017年7月

【7】 Conway, John; Simon Kochen (2006). "The Free Will Theorem". *Foundations of Physics*. 36 (10): 1441.

【8】 Conway, John H.; Simon Kochen (2009). "The strong free will theorem" (PDF). *Notices of the AMS*. 56 (2): 226–232.

【9】 S. Kochen; E. P. Specker (1967). "The problem of hidden variables in quantum mechanics". *Journal of Mathematics and Mechanics*. 17 (1): 59–87.

【10】 惠勒, 《物理学和质朴性》, 方励之编. 安徽科学技术出版社, 1982。

【11】 Jimena Canales, *The Physicist and the Philosopher: Einstein, Bergson, and the Debate that Changed Our Understanding of Time*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2015, 488pp.