

埃弗里特和他的多世界理论*

吴 飙[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

2020-05-19收到

† email: wubiao@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20201107

根据多世界理论,宇宙是由无数个平行世界构成的,宇宙中的所有物体无论大小都由波函数描述。如果我们用 Ψ_U 表示描述整个宇宙的波函数,那么根据多世界理论,这个波函数可以写成

$$\Psi_U = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n + \dots \quad (1)$$

这里的每一个波函数 Φ_n 表示一个平行世界,它们各自独立演化互不干扰,偶尔发生干涉。

在我们这个平行世界,多世界理论的提出者埃弗里特(Hugh Everett III, 图1)出生于1930年11月11日。他父亲是一位工程师和军官,上过大学最后获得了博士学位。他的母亲凯瑟琳(Katharine Lucille Kennedy)是她那个时代的新女性。厌倦了家庭主妇生活的她在1935年放弃了自己的教师职业和家庭,成为一位单身职业作家。1953年,凯



图1 埃弗里特(1930—1982)

瑟琳在《纽约时报》发表了一首献给爱因斯坦的诗(参见附录)。作为一位职业作家,凯瑟琳是成功的但还是无力单独抚养小埃弗里特。所以埃弗里特从小和父亲与富有爱心的继母长大。埃弗里特继承了母亲的反抗精神,喜欢挑战权威。他小时候喜欢作弄大人,开父亲和他同事的玩笑。上的虽然是教会学校,埃弗里特却是坚定的无神论者,并试图证明上帝是不存在的。

埃弗里特非常聪慧,小时候喜欢读科幻小说,玩弄各种工具。他12岁时曾经给爱因斯坦写信,声称自己解决了一个难题,当不可抗拒的力碰到不可移动的物体时会发生什么。埃弗里特的信已经找不到了,但爱因斯坦的回信留下来了。爱因斯坦在信中写道,

世界上虽然没有不可抗拒的力和不可移动的物体,但却有一个固执的男孩。他故意为自己制造了一个奇怪的难题,然后费力地把它解决了。(There is no such thing like an irresistible force and immovable body. But there seems to be a very stubborn boy who has forced his way victoriously through strange difficulties created by himself for this purpose.)

埃弗里特就读的高中叫圣约翰学院(St. John's College),是一所为军队培养后备军人的私立教会学校。除了军事训练,埃弗里特各科成绩都非常优秀。1948年,埃弗里特进入天主教大学(Catholic Univer-

sity)学习化学工程。在大学,埃弗里特不但出色完成了本专业的课程还完成了数学系的课程。

1953年,在大学教授的强力推荐下,埃弗里特被普林斯顿大学物理系录取,开始攻读博士学位。埃弗里特一开始的兴趣在博弈论,他经常参加普林斯顿每周一次的博弈论研讨会,并且在1953年发表了一篇博弈论方面的论文。1954年秋天,伟大的玻尔访问了普林斯顿,埃弗里特有幸和玻尔近距离接触和交谈。通过进一步和同学以及玻尔的助手讨论,埃弗里特发现当时以玻尔为代表的描述量子测量的波包塌缩理论实在太荒谬了。自小就喜欢挑战权威的埃弗里特决定将量子测量作为自己的博士研究课题,并找了惠勒(John Archibald Wheeler, 1911—2008)做导师。几个月之后,1954年的圣诞节前,埃弗里特已经完成了他的新理论,并把它叫做普适波函数理论(the theory of universal wave function)。这就是后来为人熟知的多世界理论(many-worlds theory)。多世界理论这个名字是德威特(Bryce DeWitt, 1923—2004)在20世纪70年代取的^[2]。

1 多世界理论

我们现在以薛定谔猫为例来介绍多世界理论。薛定谔猫是一个关于量子测量的思想实验。在薛定谔的最初设想中,被测量的是正在衰变的放射性元素,这里用光子的偏

* 本文所有的历史资料来自文献[1]

振代替。为此，我们回顾一下光子的偏振态和对它的测量。每一个光子有两个可能的偏振态，水平偏振和垂直偏振。一般情况下，光子既不是水平偏振也不是垂直偏振，而是处于它们的叠加态，即

$$|\psi\rangle = \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle. \quad (2)$$

这里 $|H\rangle$ 表示水平偏振态， $|V\rangle$ 表示垂直偏振态。我们可以用方解石来测量光子的偏振态：当光子处于水平偏振时，它不受方解石影响；当光子处于垂直偏振时，由于方解石的影响，它会向下偏移(图2)^[3]。对于一个处于叠加态 $|\psi\rangle$ 的光子，它会有 $|\alpha|^2$ 的概率不偏移， $|\beta|^2$ 的概率向下偏移。

现在假设有一个封闭的实验室，里面有一只猫和光子偏振的测量设备(图3)。实验开始，一个处于偏振叠加态的光子入射到方解石上。从方解石出来后，光子有可能继续保持原来的路径落在检测屏的上方，也可能向下偏移最后落在检测屏的下方。如果落在检测屏上方，什么也不会发生，猫依然是活的；如果落在下方，光子会触发一个机关并进一步打开一只毒气瓶，猫被毒死。

现在让我们用量子力学来描述这个实验。实验开始前，实验室的波函数可以写成

$$|\Psi_0\rangle = (\alpha|H\rangle + \beta|V\rangle) \otimes |\text{live cat}\rangle. \quad (3)$$

这时猫和光子没有任何关联。实验结束后，实验室的波函数变成了

$$|\Psi_1\rangle = \alpha|H\rangle \otimes |\text{live cat}\rangle + \beta|V\rangle \otimes |\text{dead cat}\rangle. \quad (4)$$

现在猫和光子发生了纠缠：如果测得光子处于水平偏振，猫还是活的；如果测得光子处于垂直偏振，猫是死的。现在的问题是，上面的波函数有两部分：在第一部分里，猫是活的；在第二部分里，猫是死

的。那这猫究竟是活的还是死的呢？如果你重复这个实验1000次，每次实验结束后打开实验室查看猫的死活，那么你会发现大约有1000 $|\alpha|^2$ 次猫是活的，大约1000 $|\beta|^2$ 次猫是死的。你不会看到一只既活又死的猫。这个结果已经被实验证实。当然物理学家没有真的用猫做实验，猫并不是这个实验最重要的部分。薛定谔当初只是想借用猫的死活让这个实验结果更戏剧化，更吸引人眼球。我们完全可以把猫从实验中拿走，这时实验结束后，实验室的波函数可以写成

$$|\Psi_2\rangle = \alpha|H\rangle \otimes |\text{closed flask}\rangle + \beta|V\rangle \otimes |\text{open flask}\rangle. \quad (5)$$

如果你重复这个没有猫的实验1000次，那么你会发现大约有1000 $|\alpha|^2$ 次烧瓶是盖上的，大约1000 $|\beta|^2$ 次烧瓶是打开的。

这个实验的本质是，波函数里明明有两个实验结果，当我们去观察时，却只能看到一个。为什么会这样？

通常的波包塌缩理论是这样解释的。当我们打开实验室去观察时，波函数发生了塌缩。它有 $|\alpha|^2$

的几率发生如下塌缩：

$$|\Psi_1\rangle \rightarrow |H\rangle \otimes |\text{live cat}\rangle, \quad (6)$$

$|\beta|^2$ 的几率发生如下塌缩：

$$|\Psi_1\rangle \rightarrow |V\rangle \otimes |\text{dead cat}\rangle. \quad (7)$$

也就是说，有一部分波函数会神秘的消失。虽然波包塌缩理论能解释实验结果，但有很多缺点，比如没有描述塌缩究竟怎样发生的，持续了多长时间。我们后面会详细讨论。

按照多世界理论，波函数 $|\Psi_1\rangle$ 中的两个分量分别代表两种不同的

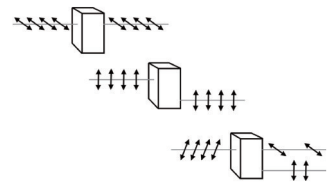


图2 光子的偏振态及其实验测量。具有确定偏振态的光子从左入射到一块方解石晶体上：(1)如果偏振方向是水平的，光子将不受方解石影响，从右边出射保持水平偏振；(2)如果偏振方向是垂直的，光子的轨迹将被方解石向下平移，从右边出射但仍然保持垂直偏振；(3)如果偏振方向是45°，那么光子有一半的几率像水平偏振的光子一样通过方解石，有一半的几率像垂直偏振的光子一样通过方解石

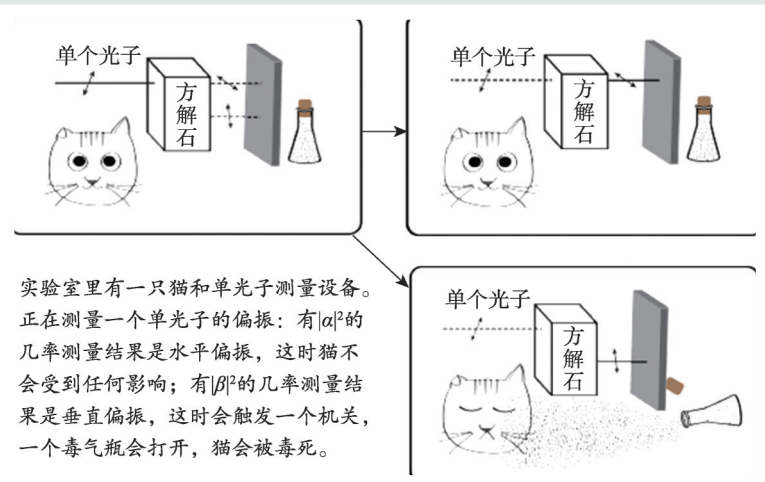


图3 按多世界理论，测量完成后，世界一分为二：一种世界里猫是活的；另一种世界里猫是死的

世界：一种世界里猫是活的，另一种世界里猫是死的。这两种世界一样真实，并行存在。由于量子力学的演化是线性的，这两种世界会独立演化，互不影响：活猫世界里的观察者感觉不到死猫世界的变化；死猫世界里的观察者感觉不到活猫世界的变化。当观察者打开实验室的门，在一种世界里，他会看到一只活猫，感觉不到死猫的存在，这时波函数似乎发生了如公式(6)描述的塌缩；在另外一种世界里，他会看到一只死猫，感觉不到活猫的存在，这时波函数似乎发生了如公式(7)描述的塌缩。这样，多世界理论就解释了前面的实验结果。从这个角度看，波包塌缩其实是多世界理论的推论。迄今没有任何实验可以否定多世界理论。相反，多世界理论有很多其他理论不可比拟的优点，我们后面将详细阐述。

很多人觉得多世界理论有些难以接受：当世界一分为二时，一只猫似乎变成了两只，物质和能量好像不守恒了？如果系数 $\alpha=3/5$ 、 $\beta=4/5$ ，我们或许可以想象总共有25个世界，其中9个世界里猫是活的，另外16个世界里猫是死的。如果 α 、 β 是无理数怎么办？这些问题很自然，埃弗里特当然不会没有考虑过。先看一下大家更为熟悉的公式(2)中的波函数 $|\psi\rangle$ ，它表示一个光子，这个光子具有可能的两种状态：水平偏振 $|H\rangle$ 和垂直偏振 $|V\rangle$ 。它并不表示这里有两个光子或更多的光子，其中一部分光子是水平偏振 $|H\rangle$ ，另外的光子是垂直偏振 $|V\rangle$ 。公式(3)中的波函数 $|\Psi_0\rangle$ 的意义类似，它表示了一个实验室有两种状态，一种状态里光子是水平偏振和猫是活的；另一种状态里光子是垂直偏振和猫也是活的。这里波函数也有两个分量，但不表示有两个

或更多光子、两只或更多只猫。最后我们来看看那个表示“世界一分为二”的公式(4)。和波函数 $|\Psi_0\rangle$ 一样， $|\Psi_1\rangle$ 表示了一个实验室有两种状态，一种状态里光子是水平偏振和猫是活的；另一种状态里光子是垂直偏振和猫却死了，这时依然只有一个光子和一只猫，只是猫现在有两种状态了。测量让实验室波函数从 $|\Psi_0\rangle$ 变成 $|\Psi_1\rangle$ ，让光子的状态和猫的状态发生了纠缠，但并没有增加光子数和猫的数量。这里没有物质和能量不守恒。

按照这个思路，在多世界理论里，系数 α 、 β 的意义和我们通常的理解没有什么区别，它们分别表示了两种状态的几率幅。你如何理解它们在公式(2)中的意义，那你就应该按同样的方式来理解它们在公式(4)中的意义。 $|\alpha|^2$ 和 $|\beta|^2$ 给出了两种世界的几率权重(或测度)， α 和 β 的相位则会在可能的干涉现象中起作用。由于篇幅原因，本文不讨论不同世界之间的干涉，有兴趣的读者请参见[4]。

量子图灵机的提出者多亦奇(David Deutsch)非常推崇多世界理论。按照他的理解，这个宇宙有无穷个世界，与0和1之间的实数一样多。对于前面的薛定谔猫实验，一开始有无穷多个世界，它们都完全相同，由波函数 $|\Psi_0\rangle$ 描述。光子偏振测量结束后，这无穷多个世界分成了两组，分别由 $|\Psi_1\rangle$ 中的两个分量描述。两组所占比重分别是 $|\alpha|^2$ 和 $|\beta|^2$ [5, 6]。

无论怎样理解，多世界理论的核心都是一样的。整个宇宙都是有微观粒子构成的，宏观物体和微观粒子没有本质区别，它们也由波函数描述，进行么正演化。一个波函数的不同分量代表不同的世界，每

一个分量都同样真实，它们并行存在。相对于其他量子力学的解释，多世界理论不需要在量子力学的基本框架之外做任何额外假设。

2 导师惠勒、博士论文和五角大楼

埃弗里特的导师惠勒是物理学界的一个传奇人物，他似乎总是能在两个看似非常不同的事情或想法间找到平衡点。比如，他热爱纯粹的学术思想和研究，是量子引力的开创者之一；他同时花费了大量时间和精力为政府和军火商提供咨询，亲自参与氢弹的研制和发展。关于埃弗里特的多世界理论，惠勒同样是在支持和反对之间寻求平衡点。当埃弗里特第一时间把自己的结果告诉了惠勒时，惠勒立刻意识到了这个想法的重要性和创意，鼓励埃弗里特继续发展。除了埃弗里特的想法本身很吸引人以外，惠勒喜欢的另外一个原因是他正在研究量子引力。量子引力的一个前提是，即使宇宙这么大的体系也是可以用波函数来描述。在这之前，物理学家普遍认为波函数只能描述原子和分子等微观粒子。同时，惠勒又清楚地知道，埃弗里特的想法完全推翻了自己导师玻尔的波包塌缩理论。惠勒非常尊敬玻尔，不愿反对他的观点。

埃弗里特开始基于自己最初的想法撰写博士论文。一方面，他尽量把自己的想法发展成一套严谨而系统的理论；另一方面，由于惠勒的压力下，他不得不精心挑选词句做到尽量少冒犯哥本哈根学派。比如，惠勒非常反对埃弗里特用“分裂(split)”来描述前面介绍的世界一分为二。但是无论如何遣词造句也无法掩盖埃弗里特的多世界理论和哥本哈根学派间的冲突。在惠勒的指

导下，几经大的修改后，埃弗里特在1956年1月完成了自己130多页长的博士论文。当年5月，惠勒访问了哥本哈根，向玻尔和他的同事介绍了埃弗里特的多世界理论，遭到了玻尔和他门徒的强烈反对。惠勒只好暂缓埃弗里特的博士答辩，要求埃弗里特大幅修改论文。这时埃弗里特已经在五角大楼找了一份薪资优厚的工作，并且在6月份正式开始工作了。直到1957年2月，他和惠勒才找到时间删改论文。最后被普林斯顿接受的博士论文只有原始论文的四分之一长。

1957年1月在美国举行了一个量子引力方面的会议。美国物理学会的期刊《现代物理综述》(*Review of Modern Physics*)决定录用和发表这个会议上宣读的论文。德威特是这期《现代物理综述》的客座主编，在惠勒的强力推荐下，他决定发表埃弗里特删改后的博士论文，虽然埃弗里特并没有参加这个会议。这是埃弗里特一生正式发表的唯一一篇物理论文^[7]。埃弗里特的论文给德威特留下了非常深刻的印象，十几年后，正是德威特将埃弗里特的理论命名为多世界理论，让物理学界重新关注这个几乎被遗忘的理论^[8]。

惠勒非常赏识埃弗里特，希望他能留在学术圈，普林斯顿也给了埃弗里特一个讲师的位置。但是埃弗里特拒绝了，义无反顾地开始了在五角大楼的工作。主要的原因并不是他的多世界理论受到了冷遇，而是他不喜欢学术生活。后来惠勒通过自己的影响，又为埃弗里特找了几个学术位置，都被他拒绝了。埃弗里特生性喜欢享乐，喝酒是他的一大嗜好。他需要优厚的工资和收入来维持这样的生活。埃弗里特自小喜欢挑战权威：小时候喜欢作

弄大人；作为一个天主教大学的学生，他乐于证明上帝的不存在；读研究生时，他选择挑战当时量子力学的权威，玻尔和他的哥本哈根学派。对他来说，挑战本身就像喝下一杯酒，他只在意喝酒获得的即时快乐，而不在意它的长远影响。埃弗里特一生都没有主动宣传过自己的多世界理论。

埃弗里特在美国国防部的工作是武器系统评估组(Weapons Systems Evaluation Group)的分析员。在这里，凭着自己的天才，埃弗里特很快学会了计算机编程，并成为一位高手，后来即使开了公司依然亲自编程。他以前学过的博弈论也派上了用场。埃弗里特因此很快脱颖而出受到重用，他开始参与领导一个小组评估美国在可能的核战争中的攻击策略。完成这个任务之前，在1959年，埃弗里特终于在惠勒的督促下访问了哥本哈根，亲自向玻尔和他的同事解释自己的多世界理论。埃弗里特同样遇到了强烈的反对。但对哥本哈根的访问并不是一无所获。在喝下几杯啤酒之后，埃弗里特想出了一个新的最优化方法，广义拉格朗日乘子法。这个方法直到1963年才正式发表，但埃弗里特立刻开始用它计算如何让武器系统取得最大杀伤力，还用它来评估美国的核策略。1961年，埃弗里特和他的同事们完成了核策略的评估，形成了50号报告(Report 50)。这份报告认为美国无法避免苏联的毁灭性核打击。基于这份报告，美国在1963年制定了“相互确保摧毁”的核战略。1964年，埃弗里特离开了国防部，和朋友们成立了一家公司，专业进行各种武器系统的评估。利用过去建立的联系，埃弗里特的公司能长期获得美国国防部的优厚合同。埃弗里特后来有

些和国防无关的投资，不是特别成功。无论怎样，他一直能舒服地维持自己享乐的生活方式。

埃弗里特在普林斯顿读书时认识了自己的妻子，南希。他们有两个孩子，老大是女儿，老二是儿子。埃弗里特和妻子在子女教育上非常一致：孩子们应该不受任何管束，自由成长。他们的女儿丽莎成了问题女孩，养成了吸毒等各种坏习惯。丽莎在1996年自杀，在遗言中，她希望能在另外一个平行世界遇到父亲。儿子马克完全没有继承埃弗里特的数学才能，初中数学就已经让他感到很吃力。同样没有父母的管束，马克没有成为问题男孩，他最后成了一位小有名气的摇滚歌星，是乐队Eels的主唱。埃弗里特由于长期保持不良的生活习惯，特别是嗜酒和抽烟，身体健康状况不是很好。1982年，不满52岁的埃弗里特死于心脏病突发。他妻子南希1998年死于癌症。

3 多世界理论的重生

埃弗里特的多世界理论诞生后遭到了玻尔和他门徒的强烈反对，同时也被大多数物理学家忽视。但还是引起了一些物理学家的注意。泽维尔(Xavier)大学的教授波多尔斯基(Boris Podolsky, EPR中的P)就是其中一位，他甚至向埃弗里特索要了那份最初的长论文。1962年，波多尔斯基在泽维尔大学组织了一个小型闭门会议，讨论量子力学的基本问题。参加这个会议的有很多重量级人物，比如狄拉克、维格纳(Eugene Wigner)、阿哈拉诺夫(Yakir Aharonov, AB效应的A)、罗森(Nathan Rosen, EPR中的R)。埃弗里特也应邀参加了，他终于有机会在一个学术会议上亲自介绍自己的理论。与会者的反映比玻尔和他的

门徒好了很多，他们都承认在逻辑上找不出埃弗里特理论的任何问题，但是他们实在难以接受还有其他世界存在。埃弗里特事后评论说，这其实不是物理问题，而是心理问题。多世界理论告诉我们有多个世界存在，习惯了一个世界的人确实在心理上很难立刻接受还有其他世界存在。站在现在回头看，阿哈拉诺夫在会上的评论可能是最深刻的，他指出埃弗里特的理论似乎预示着宇宙没有时间反演对称性。确实是这样，这正好和我们的现实吻合。这种不对称性似乎和热力学第二定律无关，它们间的关系依然值得深入讨论和研究。狄拉克和以往一样没有参与讨论，只是在会议上给了一个相对论量子力学的报告。这个会议的详细记录直到40年后，2002年才公诸于世^[1]。

库珀(Leon N Cooper, BCS的C)在60年代末也对量子测量问题产生了兴趣，和他的学生一起得到了类似埃弗里特多世界理论的结果^[8]。但是论文发表前他完全不知道埃弗里特的理论，他非常失望自己的结果晚于埃弗里特。

埃弗里特的多世界理论继续被主流物理界忽视。有一位物理学家却对它念念不忘，那就是德威特。前面提到，作为《现代物理综述》的客座编辑，德威特第一时间读了埃弗里特的多世界理论。事后他这样回忆自己第一次阅读埃弗里特论文的感受：

首先我特别兴奋，关于量子力学的解释，这么多年和这么多篇乏味的论文之后，终于有人提出了一个新的令人爽心悦目的观点。其次，我深深的震惊了。

但德威特并没有立刻去发展和宣传埃弗里特的理论，那时他正全身心研究量子引力。60年代中期的

时候，德威特组里来了一位叫格拉汉姆(Neil Graham)的研究生，他坚持要研究量子力学的基本问题。这重新燃起了德威特的兴趣，他不但指导格拉汉姆仔细研读埃弗里特的论文，而且从1967年开始在专业论文和学术会议上宣传埃弗里特的理论。其中最有名的是德威特1970年在《今日物理》(Physics Today)发表的文章^[9]。在这些文章里，德威特把埃弗里特的理论命名为多世界理论。1973年，德威特和格拉汉姆编辑出版了一本书《量子力学的多世界解释》(The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics)^[2]。这本书收集了当时关于多世界理论的重要论文，包括埃弗里特早在1956年就完成的130多页长的博士论文。

多世界理论从此不再被忽视。多世界开始成为很多科幻小说的主题。现在牛津大学有一个基于多世界理论的哲学门派，埃弗里特主义(Everettian)^[1]。

1977年4月埃弗里特完成了他一生中最后一次学术之旅。这时惠勒和德威特都已经成为德克萨斯大学奥斯汀分校的教授，他们邀请埃弗里特去奥斯汀做学术报告，介绍他的多世界理论。报告厅挤满了好奇的学生和教授。多亦奇就是听众之一，他当时正与惠勒和德威特一起研究量子引力。多亦奇和埃弗里特还在会后的午餐上进行了交流。现在他是多世界理论的最大支持者之一。回忆起当年的会面，多亦奇说，最令他惊讶的是，尽管离开学术界这么多年，埃弗里特对量子力学没有一点生疏感。

2007年7月，《自然》以多世界理论为封面纪念它正式发表50周年；BBC则在同年制作了关于多世界理论的特别节目《Parallel worlds, Parallel Lives》。遗憾的

是，多世界理论仍然没有得到大多数物理学家的认同。

4 谁对谁错

前面以薛定谔猫为例介绍了波包塌缩理论和多世界理论，它们都能解释现有实验结果。而且迄今为止没有人能设计一个实验来区别这两种理论，比如直接观测到另外一个世界或波包塌缩过程。那么究竟哪一个理论是正确的呢？实验是科学理论的试金石，现在这块试金石失效了，我们该如何判断这两种理论的对错？埃弗里特在他长论文的最后附录里谈到了物理理论的对错优劣问题，他认为除了寻求实验的验证，我们还应该考查理论的逻辑性、有用性、简单性等。下面我们就从这些方面详细对比波包塌缩理论和多世界理论。

逻辑性：在他的长论文里^[2]，埃弗里特一开始就指出了波包塌缩理论的逻辑缺陷：当存在两个或两个以上观察者的时候，观察者们会给出不同的波包塌缩时间。埃弗里特用了一个例子来说明这个逻辑缺陷，他的例子和维格纳朋友佯谬类似。在图3描述的实验中，我们把猫换成观察者爱丽丝，同时移走毒气瓶。如果光子落在检测屏上方，她就记录“上”；如果光子落在检测屏下方，她就记录“下”。对于爱丽丝来说，波包塌缩在光子和检测屏碰撞的一刻就已经发生了，因为她每次都明确地观察到了光子落在了上方或下方。现在假设实验室外面还有一个观察者鲍勃，在实验完成前，他和实验室没有任何相互作用。对于鲍勃来说，在他打开实验室以前，实验室由如下波函数描述

$$|\Psi_3\rangle = \alpha|H\rangle \otimes |\text{Up}\rangle + \beta|V\rangle \otimes |\text{Down}\rangle. \quad (8)$$

波包还没塌缩。假设鲍勃在实验结

束后一周打开了实验室，这时波包塌缩了。他对爱丽丝的记录没有任何异议，但他坚持说波包塌缩是在他进入实验室的一刻发生的，爱丽丝当然不同意。于是矛盾产生了。这就是波包塌缩理论的逻辑缺陷。文献[10]对这个逻辑问题有更详细的描述。

简单性：这里指的是概念和理论框架的简单。多世界理论显然在概念上更简单，除了量子力学的基本框架，它不需要任何额外的假设。而波包塌缩是量子力学基本框架之外的一个额外假设。在量子力学里，量子态都是随时间进行连续和么正的演化；而波包塌缩是不连续和非么正的。因此，波包塌缩必须是一个独立的假设，不可能从量子力学的基本框架推出来。这个假设非常的不物理：塌缩是怎样的物理过程？经历了多长时间？如何界定外部观察者？这些问题迄今没有令人满意的答案。当我们考虑整个宇宙时，波包塌缩假说显得更是不合理。一方面，宇宙的外部没有观察者，所以整个宇宙的波函数应该连续地随时间么正演化，不会经历随机的波包塌缩；另一方面，我们人类又时时刻刻在进行类似图3的实验，波包在随机的塌缩。这样宇宙的波函数由于我们的观察不再随时间么正演化。多世界理论则不会导致这样矛盾的结果。

刚性：如果一个理论不能随意改动，我们就说这个理论具有刚性。多世界理论在概念上更简单，因为它不需要任何额外的假设。这也使它具有了刚性。量子力学已经被大量实验证实，它的基本理论框架是不能随意改动的。如果你能改动量子力学的基本框架，那你一定在引导一场新的物理革命。与之相反，波包塌缩理论显然是可以随意

改动的。比如，我可以假设波包塌缩有一个中间过程：任何波函数都先塌缩为一个等权重量子态然后再塌缩到目标态。根据这个假设，公式(6)描述的塌缩应该改写为

$$|\Psi_1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle \otimes |\text{live cat}\rangle + |V\rangle \otimes |\text{dead cat}\rangle) \rightarrow |H\rangle \otimes |\text{live cat}\rangle. \quad (9)$$

这个修改后的波包塌缩理论同样能解释图3中的实验结果和其他量子测量结果。更糟糕的是，我们可以对波包塌缩理论做任意类似的改动。所以波包塌缩理论刚性非常差，完全是一团可以被随意揉捏的面。笔者认为任何真理和美都具有类似的刚性。一首动听的乐曲具有刚性：它的每一个音符都不能随意改动；一首美的诗具有刚性：它的每一个字都不能随意改动；一朵漂亮的鲜花具有刚性：花瓣的颜色、形状等都不能随意变动，所以花店老板总是对她店里的鲜花小心呵护。由于篇幅限制，这里不展开讨论了。

有用性：波包塌缩理论似乎只能用来解释类似图3中的量子测量实验，笔者不清楚它还有什么其他用处。多世界理论则帮助笔者解开了一些长久的困惑。按照进化论，我们人类是由非常初级的化学分子一步一步进化而来。每一步进化都是一个概率事件，所以最后一步一步进化成具有智慧的人，概率是非常、非常小的。即使整个进化过程的时间很长，依然让人觉得不好接受：这么小概率的事件居然发生了。按照多世界理论，这种进化则是必然的，因为在多世界理论中任何小概率事件都会实现。波函数 $|\Psi_1\rangle$ 中有两个分量：无论 α 多小，活猫的世界都存在；无论 β 多小，死猫的世界都存在。也就是说，宇宙从来都不做选择，它只是按照比重

不停地分裂为更多的世界。基于这个认识，让我们再来看生物进化。每一步进化其实都是一个化学反应过程：早期的进化是小分子组合成大分子，后来则是基因突变。而任何化学反应都是一个量子演化过程。按照多世界理论，无论事件发生的概率多小它都会发生。概率小只是说明在众多的世界里只有很少一部分生活着我们这样的智慧生物，绝大多数世界里地球上没有生命或者生命处于极其初始的状态。

多世界理论还帮助笔者理解了自由意志。按照经典物理，一旦初始条件给定，系统随后的演化就是唯一确定的。形象点说就是你所做的一切都是命中注定的，你的一生在你出生的那个时刻就已经确定了，自由意志只是一种假象。从经典物理理论出发，这个观点真是难以辩驳。后来有了量子力学，理论框架里含有内禀的几率，自由意志似乎不再是假象。但仔细一想，即使有了量子力学，自由意志似乎依然是假象。按照波包塌缩理论，几率只发生在外部观察者进行观察时。整个宇宙并没有外部观察者，宇宙的波函数依然按照量子力学进行确定的演化，所以自由意志依然是假象。但是按照多世界理论，整个宇宙的波函数虽然在确定地演化，但是它却在不停地分裂成不同的世界，观察者究竟感受和经历哪一个特定的世界是随机的，他不确定自己的未来是属于哪一个世界。这样，对于每一个世界来说，人是具有自由意志的。于是我们有了一个非常美妙的结论：在一个确定演化的宇宙里存在真正的自由意志。

关于量子力学的解释还有很多理论，我们这里就不一一比较了。有一点可以肯定的是，这些理论的简单性肯定不如多世界理论，因为

多世界理论在量子力学基本框架外不再需要任何其他假设。

5 世界是量子的

量子力学是一场颠覆性的物理革命，彻底推翻了很多经典的概念。但是非常有意思的是，几乎所有的量子力学的创立者都始终没有彻底摆脱经典物理的枷锁。这个问题的根源是波函数。波函数是抽象的希尔伯特空间中的一个向量，它和我们感知的世界没有直接的联系。为了建立波函数和现实世界的联系，这些伟大的物理学家开始回头在经典物理中寻求答案。爱因斯坦认为波函数根本就不能完整地描述自然，最终的理论一定是一个经典的理论，即所谓的隐变量理论。以玻尔和海森伯为代表的哥本哈根学派虽然认为波函数完整地描述了自然，但波函数和现实世界的联系需要通过经典仪器来完成。但最令人迷惑的事情是，没有一篇文章或一本书清晰明确阐明哥本哈根学派，他们的观点弥散在玻尔和他门徒无穷的文章和讲话里，每次他们似乎在谈论同一个观点，仔细一读似乎又总是有些变化。朗道在他的《量子力学》第一节中写了这样一段话，量子力学在物理理论中占有一个很不平常的地位；它把经典力学作为一种极限情形而包含之，但在它的自身表述中，同时又需要这一极限情形。

这或许能概括哥本哈根学派关于量子力学和经典力学之间关系的模棱两可的态度吧。哥本哈根学派无论怎么表述他们的观点，有一点很明确，他们没有彻底摆脱经典力学的枷锁。德布罗意试图将波函数解释成一种经典波，发展了导波理

论，后来玻姆独立发展这个理论。这个理论认为粒子本质上是经典的。薛定谔似乎是这些量子先贤中唯一一位不回头路的。他曾经在1952年的一次演讲中批评了当时流行的哥本哈根学派，指出波函数中的每一个分量都可能同时存在^[11]。这当然就是多世界理论的本质。但是很遗憾，薛定谔并没有进一步发展这个想法。

在我看来，埃弗里特是第一位彻底摆脱经典概念枷锁的物理学家。他的多世界理论向我们展示了量子力学基本框架是完善的，完全不需要借助任何经典概念。埃弗里特在他的长论文中还详细描述了如何从量子力学出发理解我们感受到的经典世界。哈佛大学教授科尔曼(Sidney Coleman)在一个著名的演讲(*Quantum Mechanics in your face*)中曾说，“大家都弄反了，需要解释的是经典力学不是量子力学。”^[12]如果你已经学过专业的量子力学课程，你应该经常尝试一下从量子力学出发来解释发生在你周围的物理现象，比如，“为什么这个足球是按经典轨迹运动？”，“为什么电子可以同时原子核的左边和右边，但是我们从来没有看到太阳同时从东边升起和西边落下？”你不一定要做具体的计算，但至少清楚在原则上应该去如何回答这些问题。如果你做不到，那说明你对量子力学的理解还有盲点。

如果你对多世界理论感兴趣，建议你阅读多亦奇的书。在文献[5]的第二章，文献[6]的第11章，他在没有用任何数学公式的情况下精彩介绍了多世界理论。如果你对更专业的资料感兴趣，那我推荐你读埃弗里特的长论文^[2]或者它的缩减版^[4]。

参考文献

- [1] Byrne P. The Many Worlds of Hugh Everett III. New York: Oxford University Press, 2010
- [2] DeWitt B S, Graham N(eds). The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. New Jersey: Princeton University Press, 1973
- [3] Bennett C, Brassard G, Ekert A K. Scientific American, 1992, 267: 50
- [4] Wu B. arXiv:2005.04812
- [5] Deutsch D. The Fabric of Reality. New York: Penguin Books, 1997
- [6] Deutsch D. The Beginning of Infinity. New York: Penguin Books, 2011
- [7] Everett H. Rev. Mod. Phys., 1957, 29: 454
- [8] Cooper L N, van Vechten D. American Journal of Physics, 1969, 37: 1212
- [9] DeWitt B S. Physics Today, 1970, 23: 30
- [10] 吴飙. 简明量子力学. 北京大学出版社, 2020
- [11] Gribbin J. Erwin Schrödinger and the Quantum Revolution. New Jersey: Wiley, 2013
- [12] <https://www.bilibili.com/video/BV17E411c77L?from=search&seid=15898764507117096362>

附录

UNIFIED FIELD (FOR A.E.)

Katharine Kennedy Everett

Pure fields of space,
O flowing fields of light,
who shall gauge
these lightning flights
of mind, ...only Mind
arching from sun to sun
beyond the blind
groping of scattered minds
who cannot see
the Great Reality
whispers its ultimate Secret
to this mind;
the atom and the universe are One.