

# “隐变量理论”是特设性假说吗

## ——兼论“可检验性”标准

张 卫<sup>1</sup>, 马晓天<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 哲学系, 辽宁 大连 116024; 2. 清华大学 物理系, 北京 100091)

**摘要:**从EPR佯谬理论的提出到贝尔不等式的实验检验,“隐变量理论”实现了从形而上学之争到可检验的科学理论的转变。“隐变量理论”的历史嬗变表明,假说的“可检验性”并非一成不变,而是随着历史条件的改变而发生变化。这意味着把“可检验性”当成一个纯粹的分析性概念是有问题的,“可检验性”也是一个兼具分析性和综合性的范畴。为了使“可检验性”标准能够更好地解释真实的科学历史,需要摆脱传统的分析性理解,以一种历史的眼光重新理解“可检验性”。

**关键词:**可检验性; 隐变量理论; 形而上学

[中图分类号]N02 [文献标识码]A [文章编号]1672-934X(2024)02-0026-07

DOI:10.16573/j.cnki.1672-934x.2024.02.004

### Is "Hidden Variable" Theory a Ad Hoc Hypothesis: On the Standard of "Testability"

Zhang Wei<sup>1</sup>, Ma Xiaotian<sup>2</sup>

(1. Department of Philosophy, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100091, China)

**Abstract:** From the proposal of EPR Paradox to the experimental testing of Bell's Inequality, Hidden Variable Theory has realized the transition from metaphysical dispute to testable scientific theory. The evolution of the Theory shows that the "testability" of hypothesis is not invariable, but keeps changing with historical conditions, which means that it is problematic to consider "testability" as a purely analytical concept as it is a category that is both analytical and synthetic. In order to better interpret the real science history, it is necessary to get rid of the traditional analytical understanding and to re-understand "testability" from a historical perspective.

**KeyWords:** testability; hidden variable theory; metaphysics

## 一、引言

“可检验性”(testability)是科学哲学的基础

概念,关涉形而上学的意义、特设性假说的判定、科学的划界、科学研究纲领的进退、中医的存废等重大理论和实践问题。具有“可检验性”

收稿日期:2023-11-26

基金项目:国家社会科学基金项目(22VRC030);大连理工大学基本科研业务费项目(DUT23RC(3)004)

作者简介:张 卫(1983—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事科学技术哲学、科技伦理研究;

马晓天(1999—),男,博士研究生,研究方向为核物理与粒子物理理论。

的综合命题被视为科学的本质属性,否则就被拒斥于科学之外。但是,这种看似逻辑清晰的标准并不能很好地解释现实科学真实发生的历史。在量子物理中“隐变量理论”的嬗变及实验检验的历史很好地印证了这种观点。“隐变量理论”在提出之初并不具有可检验性,甚至被视为“特设性假说”而被拒斥。经过几代物理学家的持续努力,该假说逐渐演变为可以被量化的数学表述,即贝尔不等式,并随着实验技术条件的进步,其具备了实验检验的可能性。2022年10月4日,瑞典皇家科学院宣布将本年度诺贝尔物理学奖授予阿兰·阿斯佩、约翰·弗朗西斯·克劳泽和安东·塞林格,以表彰他们在贝尔不等式的实验检验和量子信息技术中的突出贡献。本文基于“隐变量理论”的理论嬗变及实验检验过程,对“可检验性”概念进行重新考察,给出一个不同于传统理解的新阐释,并在此基础上对形而上学与科学的关系问题进行新的思考。

## 二、“隐变量理论”的嬗变:从“不可检验”到“可检验”

量子力学是近现代物理学的两大理论支柱之一,它成功描述了微观粒子的运动规律,理论预言的大量结果也被实验高精度地验证。尽管如此,由于微观量子世界的图景与经典物理的认知相差甚大,量子力学自建立之初就备受质疑,其中最为著名的是玻尔同爱因斯坦之间旷日持久的论战,论战双方就物理实在的本质、力学量的观测和量子系统的不确定性等问题展开论辩,前几轮交锋都以玻尔的胜出收场。1930年前后,在光子箱设想被玻尔否定后,爱因斯坦接受了量子力学的正确性,转而将矛头指向量子理论的完备性问题。

1935年初,爱因斯坦、波多尔斯基和罗森在《物理学评论》上发表论文(《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗?》),对量子力学理论的完备性表示质疑,提出了著名的EPR佯谬<sup>[1]</sup>理论。该论文认为,如果在物理系统不受

干扰的情况下,我们可以准确(即概率为1)地预言某个物理量的取值,即这个物理量一定对应着一个物理实在的要素。若每一个物理实在的要素在理论中都有一个对应物,则该理论是完备的;否则,该理论是不完备的。然而,量子力学中的两个不对易的物理量,对其中一个的观测会导致波函数以一定的概率坍缩为该力学量的本征态,从而让我们丢失了对另一个力学量的准确知识——即不能概率为1地得到该力学量的观测值。根据EPR佯谬理论,量子力学将陷入尴尬的境地:若量子理论是完备的,我们必然能够确定地预言粒子所有与实在要素对应的物理量,这就导致不对易的两个物理量当中必然至少有一个不具备物理实在与之对应,这显然违反物理直觉,是不可行的。既然实验上的可观测力学量都有实在的要素与之相对应,而量子力学又不能对这些物理量给出准确的预言,故而他们认为量子力学对物理实在的理论描述是不完备的。

EPR佯谬理论迫使物理学家只能在定域性原理和量子力学的完备性两者之中舍弃一个,但同时EPR佯谬理论也启示物理学家,或许存在一些没有观测到的参数,在粒子发生相互作用后依然支配着系统的演化,使得系统各部分的态之间预先存在着关联。这些被引进用来补充或修正量子理论的参数被称为“隐变量”(hidden variables)。早在1927年,在提出波函数概率诠释的著名论文中,玻恩就提出了存在更多坐标变量描述波函数的可能性<sup>[2]</sup>。随后,玻恩的助手弗仑贝尔进一步发展了隐变量理论,认为隐变量的存在并非与量子力学是不相容的。然而,冯·诺依曼证明,若隐变量只描述系统的态,则对系统的多次测量会使隐变量存在的空间变窄,以致于当测量次数足够多时,隐变量就不再存在,于是隐变量理论与量子力学是矛盾的<sup>[3]</sup>。虽然这一证明的正确性受到一定的质疑,但是在其后二十年的时间里,关于隐变量理论的讨论几乎销声匿迹。

1951年,玻姆重新对隐变量理论进行了更深入的研究,再一次引起物理学家对该学说的兴趣<sup>[4]</sup>。与玻恩不同的是,玻姆考虑了同时描述量子态和测量系统的隐变量,承认量子力学的概率诠释是自洽的,但他发现量子力学中“一个量子态可以由波函数完全描述”的假设并没有得到实验的验证,因此,如果能够引入某种隐变量,使得量子态被完全确定,量子态随时间的演化则遵循一组与经典运动方程相似的理论。玻姆的工作引起物理学界巨大的争论,包括隐变量诠释与概率诠释的关系、相对论狄拉克方程的推广、波函数的实际物理意义、力学量算符的表达形式等。1963年,姚赫和皮朗提出,当一个命题系统中所有命题都相容时,才有可能存在隐变量。他们认为,量子力学的命题并不相容,因此隐变量不可能存在。

由于阐述EPR佯谬理论的论文所给出的测量纠缠态位置和动量关联的实验条件在当时很难达到,在1964年之前,物理学家对隐变量理论的讨论基本上停留在理论层面,假说的正确性并不能通过实验进行验证。1964年,贝尔作出的划时代的工作才将讨论推进到实验层面<sup>[5]</sup>。他基于玻姆将EPR佯谬理论用自旋纠缠系统重新阐释的工作进行了深入的研究,从定域性原理和局域隐变量假设出发,得到了概率分布所满足的不等式,即著名的“贝尔不等式”<sup>[6]</sup>。若该不等式得到满足,则说明定域性原理是正确的,量子力学是不完备的,隐变量可能存在;反之,则说明量子力学是完备的,定域性原理值得怀疑,局域隐变量不可能存在。

这一判决性的理论很快得到了物理学家极大的关注,学者们从不同的角度进一步证明并推进了贝尔的理论。为了更加方便与实验对比,Clauser等给出了贝尔不等式的CHSH形式<sup>[7]</sup>。基于这些结果,贝尔的理论充分地揭示出,无论隐变量的性质如何,任何定域的隐变量理论预言的结果都与量子力学相冲突。1949年,吴健雄和萨克诺夫最早在实验上测量了正

反粒子湮灭后光子对的偏振关联<sup>[8]</sup>,尽管这一实验的目的并不是检验贝尔不等式,但却为后面的实验提供了基本的思路和方法。1976年,Lamehi-rachti等用纠缠的质子对进行了同样的实验,实验结果违背了贝尔不等式。然而,由于实验中无法保证两次测量类空,且使用了单通道偏振器,以及探测效率极低,导致实验结果存在很大争议<sup>[9]</sup>。随着激光技术和现代光学的进步,运用原子的级联辐射和非线性激光技术,实验上可以实现对高度纠缠的光子的精确测量,加之双通道偏振器也被普遍使用,使得探测效率进一步提升。利用上述技术,Aspect等首次实现了两次观测的因果分离(即类空),以10个标准差的置信度证实了实验结果违背贝尔不等式,即量子力学的完备性得到了证明<sup>[10]</sup>。1998年,Weihs等利用光纤捕获纠缠的光子对,将Aspect等实验中的观测距离从12米延长到400米,后来的实验也利用相似的方法延长到了10 000米,其结果都无可置疑地违背了贝尔不等式<sup>[11]</sup>。

然而,理论研究表明,若光子探测效率低于阈值0.83,总是可以建立某些局域隐变量理论来解释上述观测现象,只有探测效率高于0.83时,才会完全排除隐变量存在的可能性<sup>[12]</sup>。Weihs实验对光子的探测效率只有0.05,因此,这些实验无法排除隐变量存在的所有可能性。2001年,Rowe等利用离子阱提升了探测效率,但是未能实现类空测量<sup>[13]</sup>。2004年,U'Ren等将光子探测效率历史性地提升到了0.51<sup>[14]</sup>。紧接着,Polyakov等又将探测效率提高到0.6以上<sup>[15]</sup>,这些试验的结果都以极高的置信度违背了贝尔不等式。总之,实验上对贝尔不等式的违背充分证明了量子力学的完备性,使得理论上无法以隐变量为基础建立决定性的量子力学理论。至此,EPR佯谬理论和隐变量理论被理论和实验彻底否定,量子力学的完备性得到了物理学家的一致认同。

从EPR佯谬理论的提出到实验检验贝尔

不等式的八十多年间,隐变量理论经历了从提出时的备受质疑,到阐明概念和建立理论体系,再到理论的数学化、量化,最后到付诸实验精确检验的四个阶段。隐变量理论经历了从“不可检验”的形而上学争论到可精确定义、定量计算和精确验证的“可检验”的科学理论的嬗变,给我们历史地、辩证地理解“可检验性”概念提供了重要启示。

### 三、“隐变量理论”对理解“可检验性”的启示

EPR 佯谬理论和隐变量理论的嬗变及实验检验过程提供了一个“从形而上学的观念之争,到实验检验,再到技术应用”的典型案例<sup>[16]</sup>。这一历史事实让我们认识到,假说的“可检验性”并非一成不变,而是随着时间推移而变化的,这表明对“可检验性”的传统理解存在一定的局限性,它把“可检验性”当成一个纯粹的分析属性,即从逻辑上就可以判断一个命题是否具有可检验性,而忽略了其中所包含的综合和经验的成分。这种理解具有两个明显的形而上学特征:一是“可检验性”判定上的独断性;二是“特设性假说”界定上的非历史性。

首先是“可检验性”判定上的独断性。亨普尔对“可检验性”概念的解释是,“一个陈述或一组陈述,除非它至少‘原则上’经得起客观的经验检验,否则就不能有意义地被建议为一种科学的假说或理论。”<sup>[17](P46)</sup>但问题是,何谓“原则上”?他给出的答案是:“对于一个陈述,如果有可能描述出哪一类数据将会确认或否定它,就被称为是原则上可检验的。”<sup>[18](P3)</sup>但是,这个表述仍然是模糊的,并不具有现实的可操作性。就像分析命题的背后总是潜藏着经验的影子,“原则上”可检验也会受到经验的影响。由此,亨普尔又进一步给出了新的补充,检验条件“不一定在 T 被提出或被设想时被实现或在技术上可能被实现”<sup>[18](P3)</sup>。如此,判断一个假说是否是“原则上”可检验的唯一判据是看它有没有“检

验蕴涵”(test implication),换言之,判断一个命题是否具有“可检验性”与时间和技术等经验条件无关,只与逻辑相关,即“可检验性”是一个纯粹的分析属性,仅通过逻辑分析就可知一个假说是否是可检验的。但是隐变量理论的历史嬗变表明,“原则上”并不是一个严谨的表述,它会随着理论本身和技术条件的改变而发生改变,原来“原则上”不能检验的可以变成可检验的。

其次是“特设性假说”界定上的非历史性。由于单独一个假说往往不能产生“检验蕴涵”,需要“辅助性假说”的配合才能推导出“检验蕴涵”。因此,“在判定一个被提出的假说是否有经验含义时,我们必须自问,在给定的语境中,有哪些辅助性假说已被明确地或暗含地预设了,而给定的假说是否与后者相结合时产生检验蕴涵(而不是单单从辅助假定中导出这个检验蕴涵)。”<sup>[19](P48)</sup>“辅助性假说”在推动科学理论的进步上具有重要的作用,范式或科学研究纲领的发展和完善,都离不开“辅助性假说”的增加或修正。但是,有一种假说看似起到了辅助性的作用,但其性质与“辅助性假说”不同,“它唯一的目的是为了了解救一个受到不利证据严重威胁的假说,它不要求其他发现,大体上说,它并不导致任何附加的检验蕴涵”<sup>[19](P44)</sup>。这种假说被称为“特设性假说”,对于这种假说,“没有任何可以设想的经验发现能与之相符合或与之相冲突。在这种情况下,它对于任何经验的现象都毫无所述,或如我们所说的,它缺乏经验的含义”<sup>[19](P44)</sup>。比如,解释天体是完美的“不可见物质”假说、解释水泵工作的“自然界厌恶真空”假说、解释物体间相互吸引的“爱的欲念”假说等,因此,“特设性假说”又被称为“伪假说”。判断一个假说是否是“特设性假说”的一个重要标准就是看其是否具有“可检验性”。在隐变量理论刚提出之时,它受到物理学家的极大怀疑,其中一个重要原因就在于该假说具有很重的“特设性”色彩,但是后来隐变量理论的发展历史表明,原来具有“特设性”嫌疑的假说

经过发展,能够变成可以被实验检验的假说,因此“特设性假说”的判定也不是永恒不变的,而是随着时间而变化的。

关于“可检验性”的传统理解对于我们认识“可检验性”的内涵、科学与形而上学的区别、“特设性假说”的特质等具有不可忽视的积极意义,但这种独断的、非历史性的理解与科学的真实历史发生了冲突,隐变量理论的嬗变及实验检验历史,从一个侧面揭示了上述理解“可检验性”概念的局限性。正如蒯因指出,分析命题和综合命题的二分是不成立的,“可检验性”也不仅仅是一个纯粹的分析属性,而是包含经验的成分。为了使其能够更好地解释真实的科学历史,我们需要摆脱传统的分析性理解,以一种历史的眼光重新理解“可检验性”。

其一,“可检验性”的判定需要考虑技术因素。“可检验性”的判定看似在逻辑上就可以被确定,但在实际的科学历史中,其判定却极为复杂。纵观EPR佯谬理论和隐变量理论的提出、发展和检验历史,我们不难发现,其中有两个非常重要的转折点:一是贝尔不等式的提出,将EPR佯谬理论从哲学争论转变为可以定量研究的物理问题;二是激光、纠缠态制备等技术的发展,使得EPR佯谬理论在极高的精确度和极苛刻的条件下得到了实验检验。由此可见,除了理论本身的表述形式之外,技术条件在“可检验性”中发挥了关键作用。任何判断都要基于一定的经验和条件,比如,关于不可检验的命题,哲学家以前的标准例子是:月球的另一面有山脉。很明显,这已然成为一个可以检验的命题。技术的发展迫使哲学家们不得不改换例子:其他的银河系中存在着生命<sup>[20]</sup>。例子更换本身显示,不可检验性是随着技术条件的改变而不断向前推进的。鉴于此,亨普尔也承认,“不可能在原则上可检验的假说和理论与原则上不可检验的假说和理论之间画出一条明确的界线。”<sup>[20]</sup>爱因斯坦也曾表达过类似的观点,“为了使一个逻辑体系能被认为是物理理论,没有

必要要求它的全部论断都能被独立地解释,并且‘在操作上’是可‘检验’的;事实上,这种要求从来没有一个理论达到过。”<sup>[21]</sup>

其二,应该以动态视角看待“特设性假说”。由于“特设性假说”的性质可能会随着历史条件的变化而变化,因此在“特设性假说”的认定上要十分慎重,否则就可能把某个有前途的假说扼杀在摇篮之中。正如亨普尔所说的那样,“从后见之明来看,把过去的某些科学上的意见作为特设性假说来加以摒弃似乎是很容易的,可是对一个现代提出的假说做出判断却是相当困难的。事实上,对于特殊性假说并没有一个精确的标准。”<sup>[17](P45)</sup>这意味着,“特设性假说”的认定从来都是事后认定的,并且是因时而变的,“一个假说是否为特设性假说是与语境相关的”<sup>[22]</sup>。我们应该以历史当事人的眼光而不是“上帝之眼”来对待一个新假说,以一种更加审慎和开放的态度来看待它,不要过早或绝对地认定一个假说为“特设性假说”,从而把一个有希望的假说扼杀在摇篮之中,这对科学的发展和创新的创新是不利的。

#### 四、基于“可检验性”重估形而上学与科学的关系

“可检验性”概念与科学哲学中的诸多问题都存在内在的联系,其中形而上学的意义及其与科学的关系是其中的一个核心问题。正如蒯因指出,抛弃分析命题和综合命题的二分后果是“模糊了思辨形而上学与自然科学之间的分界线”<sup>[23]</sup>,同样,打破“可检验性”的分析属性,引入经验因素,将进一步模糊形而上学和科学的边界。

首先,形而上学是科学的有机组成部分。逻辑经验主义反对形而上学的理由是形而上学命题由于不具有“可检验性”而无法确定真假,因而是无意义的,是“语言的空转”<sup>[24]</sup>。这种观点有其合理性,但也存在一定的片面性。无论如何,作为“预设”意义上的形而上学是人类无

法摆脱的。“只要任何人用语言陈述思想,在他的头脑中的思想就比他表达出来的思想更多。其中有一些和他所陈述出来的思想有着特殊的关系:它们不只是它的语境,还是它的预设。”<sup>[25]</sup>不同的“预设”引发不同的问题,不同的问题决定理论的不同走向。海德格尔说,“笛卡尔不是因为他是怀疑论者才怀疑,而是说,他必须变成怀疑者,因为他把数学的东西确立为绝对的根据,并且为一切知识寻求与之相应的基础。”<sup>[26]</sup>也就是说,当把“我思”作为“预设”,那么“世界”的存在就是有待回答的问题,因而是可以被怀疑的。可见,“预设”的作用就像阿基米德点,支撑着整个理论大厦,并影响着大厦的结构。作为“预设”的形而上学就是科学大厦的阿基米德点,我们不能再追问“预设”的原因,也无从知晓它的真假。正因为如此,历史主义科学哲学不但不再像逻辑经验主义那样反形而上学,反而视形而上学为科学的有机组成部分。

其次,科学命题本身具有一定的形而上学性。根据观察渗透理论,从严格意义上来说,科学理论既不能被完全证实,也不能被完全证伪,只能以“确证度”或“证伪度”来衡量,在这个意义上,除了观察命题可以直接与现象进行比较确定真假之外,理论命题都具有一定的形而上学性,其中理论命题越基础、越抽象,其形而上学性就越明显。按照整体论的理解,科学理论实际是一个连续谱,并不能在形而上学性和科学性之间画出一条明显的界限。科学史上经常发生表述完全不同的理论却可以解释同一现象的情况,对此,“实在论”者认为科学理论描述的世界是真实存在的,而“非实在论”者则认为科学理论仅仅是一种好用的工具,并非真实世界的反映。双方都能找到有利的证据来证明自己的立场,但双方也都存在无法完全自圆其说的局限。既然科学理论本身不能完全确定其真假,那么现实科学的运行只能建立在以“确证度”为依据的“信念”之上。当基于某种形而上学“预设”建立起来的科学理论遇到危机之时,

只要科学家对该形而上学“预设”的信念还在,该理论就不会被推翻,而一旦信念丧失,就会发生理论范式的更替。

最后,形而上学具有转化为科学的可能性。隐变量理论的嬗变和实验检验历史显示,量子力学领域中的许多基础问题,在其提出之初往往具有非常浓厚的形而上学色彩,并不能找到合适的实验手段来进行验证,但经过努力,许多形而上学假说却可以转变为可检验的科学假说,这表明形而上学具有转化为科学的潜力。从这个意义上来说,形而上学像科学的开拓者和引路人,其观念可以作为推动科学发展的一种原始推动力量而发挥作用,而随着这些原来认为不可检验的陈述逐渐变为可检验的陈述,形而上学又把科学的边界继续往外推,推到当前实验条件达不到的地方,且这个边界会越推越远,但不论何时,科学都是有限的,总是存在边界之外的领域,而这或许就是形而上学的领地。鉴于此,美国科学哲学家和物理学家艾伯纳·希莫尼提出“实验的形而上学”(experimental metaphysics)概念,试图利用科学实验来研究形而上学问题,从而把形而上学转化为自然科学<sup>[27]</sup>。

## 五、结语

“隐变量理论”的嬗变和实验检验历史对于我们重新理解“可检验性”具有重要的启示意义,“可检验性”传统理解的局限在于它忽视了实际检验的复杂性和语境性,这导致对形而上学和“特设性假说”的判别存在简单化的倾向,故而对科学的发展产生不利影响。事实上,形而上学是科学无法摆脱的有机成分,在科学的起点,它作为“预设”为科学奠基;在科学的终点,它助推科学开拓新的疆域。“可检验性”传统理解的偏狭在于,它以科学大厦主体内部的标准来评判处于科学大厦两端的形而上学,本身就是标准的误置与僭越。需要强调的是,承认形而上学对科学的积极意义,仅仅是指出形而上学是科学事业的有机组成部分,是无法摆脱

的客观事实,并不是回到以往那种哲学高于科学、哲学指导科学的错误认识(这恰恰应该是尽力避免的)。

### [参考文献]

- [1] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?[J]. *Physical Review*, 1935, 47(10): 777-780.
- [2] Born M. Physical aspects of quantum mechanics[J]. *Nature*, 1927, 119(2992): 354-357.
- [3] Wigner E P. On hidden variables and quantum mechanical probabilities[J]. *American Journal of Physics*, 1970, 38(8): 1005-1009.
- [4] Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "Hidden" variables. II[J]. *Physical Review*, 1952, 85(2): 166-179.
- [5] Aspect A. Bell's inequality test: more ideal than ever[J]. *Nature*, 1999, 398(6724): 189-190.
- [6] Bell J S. On the problem of hidden variables in quantum mechanics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1966, 38(3): 447-452.
- [7] Clauser J F, Horne M A, Shimony A, et al. Proposed experiment to test local hidden-variable theories[J]. *Physical Review Letters*, 1969, 23(15): 880-884.
- [8] Wu C S, Shaknov I. The angular correlation of scattered annihilation radiation[J]. *Physical Review*, 1950, 77(01): 136.
- [9] Lamehi-rachti M, Mittig W. Quantum mechanics and hidden variables: a test of Bell's inequality by the measurement of the spin correlation in low-energy proton-proton scattering[J]. *Physical Review. D*, 1976, 14(10): 2543-2555.
- [10] Aspect A, Grangier P, Roger G. Experimental realization of einstein-podolsky-rosen-bohm gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities[J]. *Physical Review Letters*, 1982, 49(02): 91-94.
- [11] Weihs G, Jennewein T, Simon C, et al. Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(23): 5039-5043.
- [12] Larsson Jan-Åke. Modeling the singlet state with local variables[J]. *Physics Letters A*, 1999, 256(04): 245-252.
- [13] Rowe M A, Kielpinski D, Meyer V, et al. Experimental violation of a Bell's inequality with efficient detection[J]. *Nature*, 2001, 409(6822): 791-794.
- [14] U'Ren A B, Silberhorn C, Banaszek K, et al. Efficient conditional preparation of high-fidelity single photon states for fiber-optic quantum networks[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(09): 093601.
- [15] Polyakov S V, Migdall A L. High accuracy verification of a correlated-photon-based method for determining photoncounting detection efficiency[J]. *Optics Express*, 2007, 15(04): 1390-1407.
- [16] 成素梅. 改变观念: 量子纠缠引发的哲学革命[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 115.
- [17] [美] 卡尔·G. 亨普尔. 自然科学的哲学[M]. 张华夏, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2006.
- [18] Hempel C G. Aspects of scientific explanation, and other essays in the philosophy of science[M]. New York: Free Press, 1965.
- [19] [英] 卡尔·波普尔. 猜想与反驳: 科学知识的增长[M]. 傅季重, 纪树立, 周昌忠, 等, 译. 杭州: 中国美术学院出版社, 2003: 251.
- [20] [美] 威廉·阿尔斯顿. 语言哲学[M]. 牟博, 刘鸿辉, 译. 北京: 生活·读书·新知三联书店, 1988: 158.
- [21] [德] 爱因斯坦. 爱因斯坦文集(第一卷)[M]. 许良英, 范岱年, 编译. 北京: 商务印书馆, 1977: 475.
- [22] Grünbaum A. Ad hoc auxiliary hypotheses and falsificationism[J]. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 1976, 27(04): 329-362.
- [23] [美] W.V.O. 蒯因. 从逻辑的观点看[M]. 陈启伟, 江天骥, 张家龙, 等, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2007: 18.
- [24] [英] 路德维希·维特根斯坦. 哲学研究[M]. 陈嘉映, 译. 上海: 上海人民出版社, 2005: 60.
- [25] [英] 柯林武德. 形而上学论[M]. 宫睿, 译. 北京: 北京大学出版社, 2007: 17.
- [26] [德] 马丁·海德格尔. 物的追问: 康德关于先验原理的学说[M]. 赵卫国, 译. 上海: 上海译文出版社, 2010: 94.
- [27] Shimony A. Search for a naturalistic world view[M]. Cambridge[England]. Cambridge University Press, 1993: 115.