

现代物理学的学科核心素养蕴涵

蔡铁权 (浙江师范大学课程与教学研究所 浙江 321004)

杨亚芳 (浙江省诸暨市第二高级中学 浙江 311800)

摘要 爱因斯坦提出的狭义相对论和广义相对论,统一了时间、空间和引力,改变了牛顿的绝对时空观念。量子力学真正开启了现代科学之门,其全新的观念、概念体系和思维方式,猛烈地冲击了经典物理学的观念、概念体系和思维方式,尤其是近几十年来的飞速发展,出现了第二次量子革命。粒子物理学近十几年的发展,特别是中微子振荡、希格斯玻色子的发现,呈现出一片欣欣向荣的气象。宇宙学中的一黑、二暗、三演化,随着黑洞和暗物质、暗能量研究的进展,宇宙与天体演化成果的接连获得诺贝尔物理学奖,也都进入了公众的视野。这些成果对基础物理教育学科核心素养蕴涵的揭示,期待现代物理学内容在基础物理教育中能引起重视、关注和研究。

关键词 现代物理学 基础物理教育 学科核心素养 相对论 量子力学 粒子物理学 宇宙学

文章编号 1002-0748(2023)6-0002

中图分类号 G633·7

文献标识码 B

现代物理学进入基础物理教育阶段的课程内容之中,已是由来已久的事了。国际物理学权威杂志《Physics Review》的“物理教育研究”分卷上的论文中指出:许多国家在高中阶段给学生介绍量子物理学,而且认为概念性(不涉及复杂数学)量子物理的学习对所有学生都有价值。在教学中,产生了越来越多的关于中学量子物理学教学创新方法的补充^[1]。我国从新课改以来,在中学物理教科书中,现代物理学的内容也日益受到了关注和重视。这些内容涉及相对论、量子力学、粒子物理学和宇宙学等方面的知识。但是,在作者长期参加国家课程高中物理教材的编写、国家级教师培训、中学物理教学及研究和对中学物理教师广泛的调研、交流的过程中,深感从课程标准到教科书及教师理念,最后到课堂实践,层层产生落差,对现代物理学教学目标的达成并不理想。在本文中,作者拟在物理学学科核心素养的视域中,论述现代物理学深刻的学科核心素养蕴涵,试图提高中学物理教师对现代物理学教学价值的认识,引起更多的中学物理教师对实施现代物理学教学创新方法的研究,促进中学物理教师专业的发展,推进物理教育改革的步伐。

1 相对论物理学

牛顿(Issac Newton)的物理学理论基于绝对时

间和绝对空间的形而上学假设。这种假设与人们的日常经验相符合,在宏观低速的世界中可以很好地对物理现象做出解释和预言,并且取得了极大的成功,这使牛顿的声望如日中天。正如拉普拉斯(Pierre Simon Laplace)所说的:一旦给出了某一瞬间宇宙所有星星的位置和动量,那么,宇宙过去与未来的状态都将完全被决定。拉普拉斯的《宇宙体系论》就是这种观念支配下的杰作。而且,在牛顿力学中,时间和空间是无关的概念,与测量也无关,时间均匀和连续地流动,空间具有欧几里得几何学平直的几何性质而且稳定不变。相对于绝对空间运动的事物才是真正在运动着,绝对空间是所有运动的基准。

马赫(Ernst Mach)对经典力学提出了系统的批判,对时空观的批判是其中的精彩华章。马赫认为:我们不应该忘记,世界上的一切事物都是互相联系、互相依赖的,而且我们本身和我们所有的思想也是自然界的一部分。他认为“时间是一种抽象”“利用和通过事物的相互联系,我们达到我们的时间观念,这个观念,是我们描述事物的最深刻最普遍的观念。”他批判绝对时间是“既无实践价值,也无科学价值,没有一个人能提出证据说他知道关于绝对时间的任何东西,绝对时间是一种无用的形而上学概念。”^[2]马赫对经典力学的批判,对于当时物理学理论的发展,起到了积极的作用。

爱因斯坦(Albert Einstein)的狭义相对论建立在两条基本原理之上,即相对性原理和光速不变原理。这就导致了物体的长度和运动的时间,与测量者所处的参考系联系在一起,不同参考系中的时间和空间并非绝对相同,运动参考系中的时钟会变慢、物体会缩短,这样的时间和空间观念,与牛顿的绝对时间和绝对空间的概念具有根本性的不同。广义相对论的等效原理指出,惯性质量与引力质量是等价的,引力或者加速度效果正是时空结构弯曲的结果,物质和能量的分布决定了时空弯曲的形状和大小。爱因斯坦的引力理论是一种几何化的理论,完全脱离了欧几里得的平直的几何而进入了微分流形的黎曼几何体系。广义相对论描述的是物体在弯曲时空中的自由运动。借助于狭义相对论和广义相对论,爱因斯坦统一了时间、空间和引力^[3]。

爱因斯坦提出狭义相对论并不是为了得到质能方程从而导致核能的利用,提出广义相对论的出发点,也不是为了解决水星轨道的进动问题,甚至不是为了解决旧理论同实验的矛盾。

21 世纪的物理学变革,向我们展示了一种超越经验论与理性论之争,超越实在论与实证论的对立的新型认识论。相对论所引起的物理观念的变革,对事物固有的思维方式的突破,对物理学价值观的冲击,无疑是十分巨大的,的确是石破天惊。关于时空的本体论问题,量子力学给出了更奇妙的描述。量子力学对于实在性、因果性这些古老的哲学问题的革命性的冲击,其影响程度远大于相对论所带来的时空观的变革。

2 量子物理学

可以认为自然界最基本的层次是一个量子宇宙,正在进行的量子引力、退相干和量子纠缠的第二次量子革命将彻底地革新我们关于自然的观念。量子力学是描述微观世界最有效的工具,而宏观物质的性质是由其微观结构决定的,不仅研究原子、分子、激光等微观现象必须运用量子力学,研究宏观物质的导电性、导热性、硬度、晶体结构、相变等性质也非量子力学莫属。尤其是当前风靡全球,受到各国大力支持而迅速发展的量子信息科学。如被称作“雾里看花”的高新技术——单光子相机系统,只需一个光子就可以成像,相对于传统光电探测器成像需要 10 亿个光子才能形成一个像素点,简直是匪夷所思。

量子精密测量可以精准地确定时间,解决了 GPS 和北斗等卫星导航系统中的核心技术——原子钟的定时问题,精准地确定距离就有了保障。到 2019 年 5 月 20 日,物理学中对千克、米、秒这些基本单位都可以根据物理学原理来定标了,实现了国际单位制量子化。还有量子雷达、非视域成像、零磁场核磁共振成像等新型科学技术成果。今天,离开了量子力学原理,电视开不了机,手机通不了话,计算机无法开启使用,灯管发不了光,冰箱不会工作,洗衣机不能启动,量子力学原理的应用遍及了我们身边所有的事物。

量子计算机能快速解决传统计算机无法有效解决的问题,中国的“九章”量子计算机实现了无可争议的量子优越性。

量子隐形传态是非定域地把一个体系的未知状态通过量子纠缠传递给另一个体系。

量子通信中的量子密钥分发从小规模走向大规模,并且覆盖了广大的区域。中国远距离量子通信的实现,“墨子号”量子通信卫星发射成功,一个基于卫星星座的全球量子网络的实现使人们看到了曙光^[4,5]。

量子力学颠覆了人们的自然观、理论观和科学观,要接受量子力学的基础假设,就必须放弃建立在常识和经典物理学基础上的一系列哲学观念。当今量子纠缠引发的哲学问题比过去任何时候都更加尖锐与深刻。在本质上,不是对传统哲学观念的细枝末节的修正与补充,而是从传统的根深蒂固的哲学观念中脱胎换骨,是一场彻底的哲学革命。

曹则贤从大量原始论文的研读出发,详细地研究了黑体辐射,认为黑体辐射是一只下金蛋的鹅。在黑体辐射的研究历史上,许多大物理学家都作出了贡献,从中产生了不少物理学思想及伟大的成果。普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck)在理论解释黑体辐射现象的过程中,提出了具有革命意义的能量子假设,但这个假设无论如何不可能从当时已有的观念中推导出来,更不能纳入已有的理论框架之中。这一假设对当时的理论认识提出了前所未有的观念挑战或是观念革命,没有这种颠覆性的观念革命,物理学不会前进,现代物理学的时代不可能到来。无怪乎索末菲(Arnold Sommerfeld)在他的《原子构造和光谱线》一书中,将普朗克提出量子论的 1900 年 12 月 14 日确定为“量子理论的誕生日”,这一天,也是自然科学新纪元

的开端。

量子理论的提出带来了一系列物理观念的变革:①在语言与概念的意义,一旦物理学家所使用的每一个概念,不再像在经典物理学中那样以连续性观念为基础,它们就会成为意义不明确的概念;②在本体论意义上,作用量子把在物理学中分别用来描述粒子运动的能量和动量与描述波传播的波长和频率这两对互不相关的概念联系起来,即将粒子和波统一在同一个微观对象上,从而使量子世界的本体论图像变得难以理解;③在认识论意义上,量子世界中“自然界是不连续的”,传统的因果性和必然性、物质是无限可分的观念被放弃了;④在方法论意义上,量子理论是物理学家基于实验事实进行概念创造的结果。

纠缠(entanglement)是薛定谔(Erwin Schrödinger)创造的术语。量子纠缠表现出的非定域性,是一种非分离的整体性,与经典物理学系统中的定域性与分离性的概念是格格不入的。而薛定谔方程所具有的统计因果性的性质,也完全不同于以往任何形式的因果性。量子物理学的发展表明,科学家的认知是通过自身的亲历而获得的,是身心整合的产物。这种认知过程把认识论研究的视域从重视知识来源问题的抽象研究,转向重视科学家如何获得其认知能力的过程研究;从只重视命题性知识的理论研究,转向重视技能性知识的实践研究;从只限于辩护语境的逻辑研究,转向重视科学家如何做出认知判断的现象学研究。这为彰显出众多量子科学家的直觉判断和富有创造性预见方面,提供了一个全新的视角^[6,7]。量子物理学给人们带来观念上的突变,费恩曼(Richard Phillips Feynman)曾说过:“大自然不是经典的,所以如果你想模拟它的话,那你最好用量子力学。”并进一步阐发认为:要领悟在原子水平上发生的事情,人们必须抛弃常识。在1926年,用来解释电子在物质中的“新型行为”的一种“非常识性”理论建立起来了,这个理论看来好像荒诞不经,但事实上当然绝非如此,它就叫做量子力学^[8]。

观念的变革势必引起思维的跃迁。量子力学发展到今天这样的深邃和宏大,在这过程中展现了众多物理学大师奇妙思维的色彩斑斓的画卷。普朗克提出量子概念,是最好的批判性思维和创造性思维的典范。爱因斯坦提出光量子的概念,从而成功地解释了光电效应现象。光子是一种全新的物理模型,而爱因斯坦由此推演出光子的能量、动量公式,

运用高度的抽象思维,想像光子如何发射并在空间传播。1924年,德布罗意(Louis de Broglie)脑洞大开地提出“物质波”假说,认为一切物体都具有波粒二象性。事隔三年,物理学家就利用晶体衍射看到了电子的衍射花纹。此后,原子以及质量更重的分子都成功地通过实验观察到了干涉和衍射现象。这里当然不只是有类比思维,重要的是别出心裁的创造性思维。1926年,薛定谔在此理论架构上建立了波动力学,为一种物理学理论构建了牢固的数学理论基础。薛定谔是从波的视角去思考量子力学的数学表达方式,而海森堡(Werner Karl Heisenberg)从粒子的视角思考量子力学的数学表达方式,提出了著名的矩阵力学。狄拉克(Paul Adrie Maurice Dirac)在1927年首先将电磁场量子化,另辟蹊径,提出了量子力学的符号法,1928年提出Dirac方程,反粒子概念问世。1929年,海森堡和泡利(Wolfgang Pauli)建立了量子场论的普遍形式。费恩曼从作用量的角度着力于路径积分的理论。特别是爱因斯坦与以玻尔(Niels Henrik David Bohr)为代表的哥本哈根学派对量子理论诠释的长期争论,导致了纠缠态理论的发展,直至引发了量子信息科学的诞生^[9]。2012年,中国科学技术大学李传锋团队巧妙地设计了量子分束器,应用于马赫—曾德干涉仪,这是一种“在与不在”的叠加态分束器,实验结果表明,光子可以同时展现其波动性和粒子性,实质是处在纯粹波动态和纯粹粒子态的叠加态,波和粒子可以共存^[10]。薛定谔方程和海森堡的理论在数学上是完全等价的,即波动方程和矩阵表示是等价的,这已由诺依曼(John von Neumann)做出了严格的证明^[11]。而我国科学家的实验则实证了波动性和粒子性也是等价的,是一种叠加态。量子态的叠加原理是由狄拉克作出了完整的理论阐述^[12]。

玻姆(David Bohm)在出版了他的名著《量子理论》后,又在《物理学评论》杂志上发表了关于隐变量理论的论文,这导致贝尔(John Bell)提出了著名的不等式。贝尔基于玻姆的定域隐变量理论,针对爱因斯坦等人提出的EPR佯谬,在1964年推导出了特定纠缠态上关联测量满足的基本不等式,今天称之为“贝尔原理”。贝尔发现,量子力学关于这种变换的计算结果违背贝尔不等式,这展示了量子力学中必定存在非定域性问题,从而断定定域实在论不成立。2022年诺贝尔物理学奖获得者阿斯佩(Alain Aspect)、克劳泽(John F. Clauser)和塞林格(Anton Zeilinger)先后成功地进行了关于贝尔不等

式违背的判断性实验,大大地推进了量子信息科学在当代突飞猛进的发展^[13,14]。当然量子力学仍然有许多待揭之谜。正如雅默(Max Jammer)所说:建立完全协调一致的和胜任的量子测量问题,同达到整个量子力学的满意诠释,归根结底是一回事。只要它们之中还有一个没有解决,另一个也就解决了。然而,“争论一个问题而没有解决,要比决定一个问题而不经争论为好。”^[15]

量子力学发展的第一个百年中,科学家逐步建立了一套完整的理论体系,改变了人们理解和描述微观世界的方式,并导致了激光、晶体管、核能等技术的产生,这是第一次量子革命的辉煌成果。当前的第二次量子革命是直接开发量子特性本身的应用,量子信息以量子比特为单元,信息的产生、传输、处理、探测等全部要遵从量子力学规律,是真正的量子器件,这种崭新的技术将给人类社会带来翻天覆地的变化^[16]。

3 粒子物理学

粒子物理学是研究基本粒子之间相互作用、相互转化规律的科学,是研究物质微观结构及其规律的最前沿学科。对粒子物理学的研究,量子力学做出了巨大的贡献,1954年提出的 Yang-Mills 非阿贝尔规范场理论可以说是一个转折点或是一个里程碑。这是一个划时代的理论创新,它是在微分几何和纤维丛这样的抽象世界中提取出来的数学表达,描述像磁、电、强核力等由中介粒子传递的相互作用。同时,从某种意义上讲,这一理论是以美为前提的一种思维的自由创造,是对称性支配相互作用的重要体现。20世纪60年代后期,温伯格(Steven Weinberg)、萨拉姆(Abdus Salam)和格拉肖(Sheldon Lee Glashow)在 Yang-Mills 场和对称自发破缺的基础上,建立了弱电统一理论。这一在规范场基础上推广得到的模型与强相互作用的量子色动力学理论组合,被物理学家称之为基本粒子理论的“标准模型”。

20世纪80年代,相继建立了超弦理论和膜理论。但是,时至今日,人们还没有找到一个基本理论可以统一描述所有粒子的各种现象。虽然超弦理论(10维空间)和膜理论(11维空间)可以把四种相互作用都统一起来,但是两种理论在紧致到4维(3+1维)现实空间时都遇到了严重困难^[17]。

2012年7月4日,欧洲核子研究中心宣布发现了希格斯粒子,这一发现,再次表明标准模型的正

确性。

标准模型理论所描述的所有基本粒子都是无质量的,这样,这些粒子都将以光速运动,宇宙也将不复存在,这显然是有问题的。为了解释基本粒子的质量起源,弗朗索瓦·恩格勒(Francois Englert)与彼特·希格斯(Peter Higgs)等科学家在20世纪60年代初提出了“希格斯机制”。根据这一理论,宇宙中充满着希格斯场,基本粒子通过与希格斯场相互作用来获得质量。欧洲核子研究中心的 ATLAS 与 CMS 实验对希格斯玻色子的发现,表明了希格斯场的存在,完成了粒子物理标准模型的最后一块拼图,标志着人类对物质世界的认识迈入了一个新的时代——希格斯粒子物理学时代^[18,19]。

4 宇宙学

开普勒(Johannes Kepler)提出的关于天体引力的猜想,启发了牛顿对万有引力定律的探索。爱因斯坦的广义相对论关于引力波的假设,百年之后被 LIGO 所证实,人类探索的脚步越来越迈向宇宙的深处。

宇宙学(cosmology)是一门研究宇宙大尺度结构及其演化的科学。自1915年爱因斯坦提出广义相对论之后,现代宇宙学就诞生了。20世纪末,宇宙学已发展成为一门成熟的学科,宇宙学在整个物理学领域中的重要性大大增强,宇宙学研究成果获取诺贝尔物理学奖也接踵而至。目前,天文学家把关于宇宙的核心难题归结为“一黑、二暗、三起源”,即黑洞、暗物质与暗能量、宇宙起源、天体起源与生命起源。

黑洞是由质量足够大的恒星在核聚变反应的燃料耗尽后发生引力坍缩而形成的。黑洞的质量无比巨大,密度非常高。人们通过观测物体被吸入黑洞之前因高热而放射出的紫外线和 X 射线,可以发现黑洞的存在;通过观测恒星或星际云气团围绕黑洞运行的轨迹,可以推测黑洞的位置及质量。人们已拍摄到了黑洞的照片,也测到了黑洞合并发出的引力波,但是,对黑洞的研究仍方兴未艾。

在宇宙学中,暗物质是指无法利用电磁波观测进行研究,也就是不发生电磁相互作用的物质,人们已经发现宇宙中存在大量的暗物质。根据现有的探测数据,在整个宇宙的构成中重子物质占 4.91%,暗物质占 26.8%,还有 68.3%的暗能量。当前,对

暗物质和暗能量的研究是现代宇宙学和粒子物理学的重要课题。我国在暗物质空间探测领域处于国际先进水平,暗物质粒子探测卫星“悟空”号于 2015 年 12 月 17 日升空,所安装的各种探测器,是现今观测能段范围最宽、能量分辨率最优的暗物质粒子探测设施。当然,对暗物质的研究也处于“路漫漫其修远兮”的状态。

20 世纪 90 年代末,珀尔马特(Saul Perlmutter)等,通过对超新星的观测发现,我们的宇宙正处于加速膨胀之中。而万有引力定律表明物质之间存在引力,这会使宇宙膨胀速度减慢,宇宙中只有存在一种斥力的能量才行,这种能量称为暗能量。目前的观测已表明宇宙中确实存在暗能量,但暗能量的构成及特性等方面都有待科学家的发现。

大爆炸宇宙起源的理论得到很多科学家的接受,尽管还不完善,但已获得众多科学观测的支持。关于大爆炸理论,温伯格的《宇宙的最初三分钟》描述得详尽而生动。宇宙诞生的同时,天体也渐次形成,此后就开始了漫长的演化过程^[20]。对宇宙和天体的起源、演化和发展的前景的研究,存在着无限的发展空间,对物理学的发展起着巨大的推动作用。

5 基础物理教育得到的启示

现代物理学是一个庞大的体系,我们这里只是窥其一斑,但已是十分耀眼炫目了。现代物理学所反映的与经典物理学十分悬殊的观念,是物理观念不可或缺的组成部分,缺省了现代物理观念,对物理学的理解是偏颇的,甚而是扭曲的。众多物理学家在创立现代物理学的过程中,展示了杰出的、独特的思维方式,是物理学科学思维的典范,是思维教育无尽的宝藏。现代物理学的发展过程就是物理学家探究自然的辉煌历程,其中的探究思想、探究精神、探究方法都是值得效仿和学习的突出范例和理想榜样。物理学大师对待科学的态度与责任心,对科学的价值认知,对科学事业的专注与献身精神,无与伦比的崇高的科学思想,在科学研究中处处显现出来的超乎常人的智慧和好奇心,不畏权威、不迷信已有结论的创造精神,不屈服于权势、不挫败于困难的大无畏勇气,都是激励后人的宝贵财富。与物理学科核心素养的内涵如出一辙,是完全融合一致的,学科核心素养的培育舍此则别无良策。

对于在基础物理教学中融入现代物理学,一种

误解认为中学生的经验有限,不利于理解现代物理学。而事实却是物理学不是来自于经验。爱因斯坦说过:“物理学的公理基础……不能从经验中抽取出来,而必须自由发明出来。”“要从逻辑上从基本经验推出力学的基本概念和基本假设的任何企图,都是注定要失败的。”^[21]现代物理学的观念与人们的日常经验与直觉认识是完全不一致的,而且根本没有经典对应物的符号可以用来思考,也并不需要受到经典物理学概念的束缚。日常经验和直觉认识往往是现代物理学需要悬隔的对象,一旦混入,只会使我们的理解陷入迷惘,因为,这两者是两种截然不同的思维方式和概念体系,是格格不入的。正如费恩曼所说:重要的是这个理论所给出的预言是否与实验符合。而一个理论是否容易理解,或者是否是从常识的观点看来完全合乎逻辑,所有这些都是无所谓的,以致断言:“我想我可以放心地说,没有谁理解量子力学。”

现代物理学进入基础物理教育,有人认为:“好是好,就是不适宜。”今天,在基础物理教育中没有人会觉得牛顿力学不适宜,光电效应不适宜,或者力的概念从小学科学就接触是不适宜的。从历史上看,牛顿力学从一开始提出,就有许多学者拒绝接受“力”的概念,并且认为力的概念是不必要的。牛顿万有引力概念遭到更加强烈的反对,特别是太阳系要靠引力维持运动是荒唐可笑的。力的概念、万有引力的概念进入教科书是经过几代人研究、宣传和教育的,才成为大家认同适宜在基础物理教育中实施的内容^[22]。可见,什么知识适宜在基础教育阶段学习,不只是取决于这种知识自身,而且取决于人们对这种知识的认识,对这种知识的研究、宣传和教育的态度,取决于人们对这种知识的态度和观念的转变。不是要致力于繁复深奥的数学表达的理解,而是要聚焦于观念的转变和思维的启迪,探究的示范,态度的影响。

有人理直气壮地反驳:“学生连经典物理都没有学会,学什么现代物理。”现代物理并不是从经典物理自然地过渡得到的,如果认为只有与经典物理对应或自然地过渡,才可能理解现代物理,常常只会对现代物理学的理解造成障碍。不恰当的类比,反而会歪曲和误解,变得非驴非马。作者曾对一位初二的同学讲解过现代物理学的内容,发现能无障碍接受,这使我们深受启发。科学史上屡次发生过这样的事件,当年德布罗意阐述过物质粒子和一定频率的波之间有相似之处,普朗克听到后摇头兴叹,洛伦

兹(Hendrik Antoon Lorentz)却说道:“这些年轻人认为抛弃物理学中老的概念简直易如反掌。”新一代年轻的物理学家,物理学中老的概念在他们的头脑中还不是根深蒂固,老一辈的物理学家,物理学中老的概念在他们的头脑中不只是根深蒂固,而且有一种难以割舍的情结。新一代的年轻学子所受经典概念的束缚比他们的老师要少,这就有利于一开始就比较自然地接受现代物理学新颖的观念、原理和思维方式。

作者多次参与国家级物理教材与教参资料的编写,有多年的基础教育经历,对现代物理学如何进入基础物理教育之中有较深刻的认识。目前,国家课标已有明确的要求,教材的呈现方式是值得研究的。同时课程的内容中适当纳入,提供多样的课程资源,推荐丰富的优秀的相关读物,课程实施的方式要灵活多样,课内、课外、校内、校外多渠道多方面综合,课堂讲解、课外阅读、项目式学习等组成有机一体。现代物理学内容应纳入评价体系,评价方式可以不拘一格等。

现代物理学的内容是否可以落实于基础物理教育之中,并不受制于儿童是否能接受,而关键在于物理教师甚至部分专业工作者能不能承受,取决于他们的态度和观念,而这种态度和观念的改变并不是容易的。因此,亟需提升基础物理教育教师的现代物理学专业学术素养,亟待转变他们的观念、意识,提高他们现代物理学教学的水平。目前各级基础教育教师的专业培训中,都应现代物理学的内容纳入物理教师的培训课程之中,列入教师晋级晋升的考核内容之中。有了一支高素质的基础教育教师队伍,基础教育课程改革才可能达到目标,我国基础教育的水平才会提高,新一代创新型人才才会脱颖而出,社会主义强国的伟大中国梦才会成为现实。

6 结 语

现代物理学是分支广阔的多学科学术领域,我们仅选择了相对论、量子物理学、粒子物理学和宇宙学的内容,虽然只是管窥蠡测,但也可以窥一斑而知全豹了。特别是基于物理学科核心素养的视角来审视,凸显出现代物理学内容对基础物理教育课程改革的意义和育人价值。现代物理学对基础物理教育产生的多方面启示,可以引发对这一议题的重视。我们热切地期待广大中学物理教师对此多加关注、

研究以及教学创新方法的涌现。

参考文献

- [1] H. K. E. Stadermann, M. J. Goedhart. Why and how teachers use nature of science in teaching quantum physics: Research on the use of an ecological teaching intervention in upper secondary school [J]. *Physical Review: Physics Education Research*, 2021, 17(020132): 1-17.
- [2] 恩斯特·马赫. 力学及其发展的批判历史概念[M]. 李醒民, 译. 北京: 商务印书馆, 2014: 271-290.
- [3] 刘大椿. 分殊科学哲学史[M]. 北京: 中央编译出版社, 2017: 81-86.
- [4] 袁岚峰. 量子信息简话[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2021: 22-204.
- [5] 陈宇翱, 潘建伟. 量子飞跃: 从量子基础到量子信息技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2019: 28-257.
- [6] 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, 2021: 24-220.
- [7] 李宏芳. 量子理论的观念之争和认识论发展[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 20-146.
- [8] 理查德·费曼. QED: 光和物质的奇妙理论[M]. 张钟静, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2019: 4.
- [9] Laurie Brown, Abraham Pais, Brian Pippard. 20 世纪物理学(第 1 卷)[M]. 刘寄星, 译. 北京: 科学出版社, 2014: 122-192.
- [10] 郭光灿. 颠覆: 迎接第二次量子革命[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 24.
- [11] 约翰·冯·诺依曼. 量子力学的数学基础[M]. 凌复华, 译. 北京: 科学出版社, 2022: 9-18.
- [12] 保罗·狄拉克. 狄拉克量子力学原理[M]. 凌东波, 译. 北京: 机械工业出版社, 2021: 1-16.
- [13] Alain Aspect. 贝尔定理: 一位实验学家的朴素观点[J]. *物理*, 2022(12): 827-843.
- [14] 崔廉相, 许康, 张芄, 孙昌璞. 贝尔不等式的量子违背及其实验检验——兼议 2022 年诺贝尔物理学奖[J]. *物理*, 2023(1): 1-17.
- [15] 马克思·雅默. 量子力学的哲学[M]. 秦克诚, 译. 北京: 商务印书馆, 2020: 724-725.
- [16] 薛鹏. 量子力学佯谬及第二次量子革命[J]. *物理*, 2022(12): 811-820.
- [17] 杜东生, 杨茂志. 粒子物理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-5.
- [18] Dan Caristo. 希格斯粒子物理学时代[J]. *物理*, 2022(10): 721.
- [19] 杨洪涛, 赵政国. 希格斯玻色子发展简史[J]. *物理*, 2022(11): 741-746.
- [20] 叶培建, 曲少杰, 马继楠, 征程: 人类探索太空的故事[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 277-285.
- [21] 爱因斯坦. 爱因斯坦文集(第一卷)[G]. 许良英, 范岱年, 译. 北京: 商务印书馆, 1976: 314-315.
- [22] 关洪. 对 20 世纪物理学理论两大变革的反思[J]. *科学技术与辩证法*, 2002(1): 19-24.