一个新兴的交叉学科：物理教育研究

涂 涛† 李传锋†† 郭光灿
（中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026）

2022－06－08收到
† email：tutao@ustc.edu.cn
†† email：cfli@ustc.edu.cn
DOI：10.7693/wl20220810

物理和教育是两个历史悠久、得到广泛关注的学科，而物理教育研究却是一个新兴的研究领域。在文章中，我们将介绍物理教育研究领域的概况和若干新进展。我们从三个角度来讨论物理教育研究的新成果，分别是唯象层次的调查研究、微观层次的神经科学研究和宏观层次的复杂性科学研究。这些新进展打开了物理教育研究的大门，展现给我们一个丰富多彩的未知世界。这些物理教育研究的成果将广泛应用于教学中，为提高教学质量和培养优秀人才做出贡献。

1 引言

物理教育是近百年来被诸多讨论的话题：教师如何传授知识，学生如何学习知识，这是伴随着物理教育从始至终的根本问题。而物理教育研究却是一个比较年轻的领域，在其发展历史上有几个标志性的事件。

(1) 1999 年，美国物理学会发布了《关于物理教育研究的声明》，正式宣布物理教育研究成为一个新兴的物理学领域，和传统的凝聚态物理、基本粒子物理等一样是物理学的一个分支。

(2) 为了支持物理教育研究的发展，享有很高学术声誉的 *Physical Review* 期刊于 2005 年创办了一本新期刊 *Physical Review Physics Education Research*。这本期刊和传统的 *Physical Review A* (侧重于原子物理和量子物理)、*Physical Review B* (侧重于凝聚态物理)等期刊平行，这是物理教育研究领域获得广泛认可的标志。

(3) C. Wieman 教授是国际著名物理学家，曾因在世界上首次实现玻色—爱因斯坦凝聚而获得 2001 年度诺贝尔物理学奖。他已经完全转向物理教育研究，并在世界一流的斯坦福大学物理系创立了物理教育研究专业。在该大学主页的介绍上，物理教育研究专业和传统的原子分子物理与光学、凝聚态物理、天体物理等专业并列，这也是物理教育研究的地位受到重视的体现。

物理教育研究，是利用科学的工具和方法来研究物理教育的结构、现象、机制与规律的领域。它包括三个主要的研究方向：一是从唯象的、认知科学的角度来研究；二是从微观的、神经科学的角度来研究；三是从宏观的、复杂系统的角度来研究(图 1)。下面我们将从这三个方面来概述物理教育研究的主要内容和若干新进展。

2 唯象层次的研究：从认知科学的角度

物理教育研究作为物理学的一个分支，也可以利用理论与实验相结合的方法来研究。就像物理学家研究原子，需要通过各种实验去探测原子的能级、光谱、磁性质等，在实验的基础上建立起关于原子的模型和理论，这种科学的研究方法可以得到原子的内在规律。类似的，研究物理教育，也可以通过对物理教育过程的现象和数据进行调查，进行归纳和分析，得到物理教育内在的模式和机制[1—7]。

具体而言，物理教育研究中，以下是常用的研究思路。

首先是开发测试工具。因为物理教育研究针对学生学习、理解和掌握具体物理知识的过程，所以首先应该针对具体物理知识开发相应的测试工具。现在科学家已经开发了多种测试工具，例如力学测试量表(force concept inventory)、电磁学概念测试量表(conceptual survey in

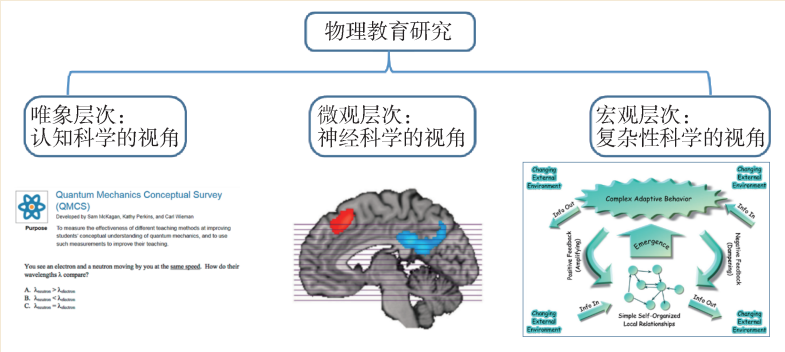

图 1 物理教育研究领域的概况

electricity and magnetism)、量子力学概念测试量表(quantum mechanics conceptual survey)等。这些测试工具为人们进行定量研究提供了必要的研究工具。

其次是进行调查研究、实验研究。使用测试工具，让学生们解答这些专门设计的测试量表，可以实现大样本的调查研究。因为参加测试的学生样本很大，所以研究结果能够反映学生学习过程的一些普遍性质。

最后是对调查数据进行评估研究。调查研究的结果，可以用各种统计数据表示，例如均值、方差、相关性、统计趋势等信息。在此基础上，研究人员就可以归纳出相应的学生学习过程的模式和规律，来解释调查数据结果。

同时，研究人员还可以开展相关的定性研究，例如深度访谈，让受访学生提供有关其思维过程的相关信息，并转录成文本信息。通过分析这些文本信息，可以对学生学习过程的内在机制提出相应的假设和见解。下面我们就给出物理教育研究的几个典型案例。

2.1 量子物理中概念的调查研究

量子物理对学生而言是一个比较困难的科目，往往是因为其中的概念和经典物理有很大的不同，学生们在掌握这些概念时存在着诸多的困难。

有一项研究专门探讨学生在量子测量方面存在哪些概念困难[2]。研究者首先开发了量子力学测试量表(quantum mechanics survey)，包含了若干专门设计的选择题，涉及波函数、力学量算符、量子测量、含时演化等多个基本概念。例如其中一道问题是：已知粒子的波函数是$\psi(x)$，问在区域(a，b)范围内找到粒子的几率。正确的答案应该是$\int_a^b|\psi(x)|^2\mathrm{d}x$，可是测试结果却发现有超过33%的学生选择了另外一个答案$\int_a^b x|\psi(x)|^2\mathrm{d}x$。尽管这两个答案的公式很类似，但是前者代表的是测量位置的几率，而后者代表的是测量位置的平均值。这一调查结果表明，学生们存在一个本质性的概念困难：他们难以区分测量的几率和测量的平均值。

研究还发现，尽管学生的学习背景、学习所采用的教材、教师的讲授方式等因素各不相同，但是学生遇到的概念困难却非常相似，具有一些普遍和共性之处。这些学习困难的主要原因在于：其一，学生无法对类似概念进行区分；其二，学生容易把一个概念过度推广到其他情况，而那些情况下，这个概念是根本不适用的。

2.2 量子隧穿中势垒的调查研究

量子隧穿可以说是量子物理中最引人入胜，而又与经典截然不同的概念。著名物理学家、诺贝尔物理奖得主C. Wieman教授专门研究了学生对于量子隧穿的学习困难[8]。

研究者首先开发了量子力学概念测试量表，特别是其中专门设计了不同形状的隧穿势垒，用于测试学生对量子隧穿核心概念的理解情况。测试结果发现，学生在量子隧穿过程上会出现普遍的概念困难：他们会错误地引入能量损失，认为不同的区域，波函数不同，能量也会不同。

研究结果表明，学生存在困难的真正原因是：他们无法建构关于波函数和能量的模型，并且也不知道如何将这些模型和实际物理情景联系起来。

2.3 学习逾渗阈值调查研究

量子物理对于学生来说是一门较难的课程。一方面，概念理解在量子物理教学中占有基础地位；另一方面，如何将物理概念与数学计算结合起来，具备解决问题的能力，也在量子物理教学中占有重要地位。因此，研究学生在解题过程中的能力与行为也是物理教育研究中一个热门研究方向。

笔者所在的团队对学生求解量子束缚态和散射态问题的过程进行了研究[9, 10]。我们首先设计了一个测试问题：粒子在一维的复杂势场中运动，这个势场在不同区域分别有不同的势阱和势垒结构。调查研究发现，学生的解题过程，可以分为四个阶段：激发相关知识资源、建立相关物理方程(即分区域建立定态薛定谔方程)、求解相关方程(即求解相应的常微分方程)、检查和解释最终结果。其中，在确定能量常数的取值范围这一关键点上，学生存在普遍的困难。主要原因是：他们无法正确区分束缚态和散射态，以及习惯于记忆一些特殊例子，并将这些特例推广到不适用的情况。

上述研究成果可以提供一些比较深入的分析和见解。形象地讲，如果一个复杂的电路网络有很多个节点，不同节点之间或者有连接，或者没有连接。只有当这些节点都能以一个路径串联起来时，才达到所谓的逾渗阈值，整个电路网络才导通。

类似的，一个学生的知识结构也包含不同的节点，这些节点代表了特定物理领域中的知识片段。学生需要将节点与其他节点之间通过这些概念之间的关系相连接。当所

有的知识节点都以适当的方式通过一个正确关系相互连接时，学生的思维流程将达到一个逾渗阈值，这时学生才能够正确地掌握相关物理知识，并处理相关物理问题。

上述这些唯象层次的物理教育研究，非常好地体现了本领域的特色：学生学习的关键，是他们可能在某个知识点上存在学习困难。为此，研究者们围绕不同的主题，通过专门设计的测试工具和数据分析，研究学生学习困难的各种类型及其成因，从而更加深入地了解学习的规律。

3　微观层次的研究：从神经学机制的角度

教育包括教与学两个主要方面，因此理解学生的学习过程非常重要。最早生物学提出各种本能的概念来解释人类的行为，包括学习行为。进一步，神经科学认为本能的概念是高度主观的，真正的关于学习行为的理论，应该建立在可以直接观察到的现象之上。因此，利用现代神经科学的方法，研究学习、思维和教学过程中的现象，将会有更好的见解。科学家通过将教育还原到一个大脑神经活动的层面来研究它，这样可以得到关于教育的微观机制的深刻理解，还产生了一个新的研究方向：教育神经科学[11—14]。

在教育神经科学中，主要采用功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging，fMRI)进行研究。fMRI提供了相对较高的空间分辨率和非侵入性的神经活动观察，包括脑区氧水平的变化、脑区容量、脑区连接等的观察。例如，fMRI可用来探索在学习过程中参与变化的核心脑区的反应图像。这些神经影像学的观察有助于科学家了解大脑中特定区域的运作如何与某些认知功能相联系。

在学习过程中，学生将大部分时间用于学习新知识，并为这些新知识提出因果解释(图2(a))。首先，学生会有预先存在的因果模型；其次，学生在学习新知识时，会根据预先存在的因果模型来评估新知识。之后存在两种情况：(1)如果新知识与他的因果模型一致，他会认为这个新知识是可信的，或者是可预期的；(2)如果新知识与他的因果模型不一致，他会认为这个新知识是不可信的，或者是意外的。

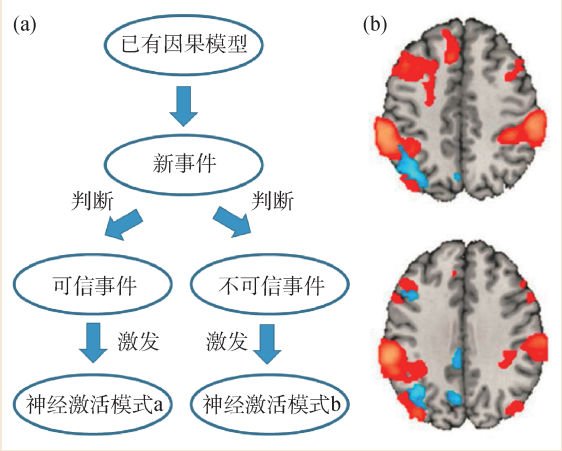

图2　功能性磁共振图像显示在不同学习任务时(a)激活的不同脑区(b)

科学家建立了一个学习实验室，通过创造学习的场景来研究学习的神经机制(图2(b))。在这个实验室里，学生们获得了与他们预先存在的因果模型一致或不一致的新知识。因此在这些场景中，学生认为新知识要么是预期的、可信的，要么是意外的、不可信的。科学家利用fMRI来研究这些不同的学习行为对应怎样的大脑活动模式。下面我们就举几个典型的研究案例[11]。

3.1　物理模型的神经学实验研究

在一组实验中，参与者是物理类的学生和非物理类学生。物理类的学生已经掌握了牛顿物理学，将牛顿物理学的因果模型作为推理基础。而非物理类的学生并未掌握牛顿物理学，仍然将他们日常生活中的运动经验作为因果模型。

学习的场景是让学生观看两段视频：第一段视频是大球和小球以相同的速度下落，这个现象是符合牛顿物理学的因果模型的。第二段视频是大球比小球下落得更快，这一现象不符合牛顿物理学的因果模型。

当物理类的学生观看第一段视频，即大球和小球以同样的速度下落时，因为他们以牛顿物理学作为因果模型，所以观察到的现象与因果模型一致，他们认为这些现象是正确的。fMRI显示大脑尾状回和海马旁回的神经组织被激活。

当物理类的学生观看第二段视频，即大球比小球下落得更快时，他们认为这些现象是奇怪的、错误的。fMRI显示大脑前扣带回的神经组织被激活。

相反，当非物理类的学生观看第一段视频时，fMRI显示大脑的前扣带回表现出更多的激活。而当非物理类的学生观看第二段视频时，fMRI则显示大脑的尾状回和海马旁回的神经区域表现更活跃。

因为非物理类学生并不知道牛顿物理学，而是以日常生活经验作为因果模型，例如他们从直观上认

为大球应该比小球下落得更快。当他们观察到的现象与他们的因果模型不一致时，他们认为这些现象是错误的，反之，则认为是正确的。

这一组关于物理概念的神经学实验表明，大脑不同区域的选择性激活可以作为有关物理概念理解和教育的一个功能指标。当新现象与因果模型的评估一致时，会激活尾状回和海马旁回的神经组织。而新现象与因果模型的评估不一致时，则激活了前扣带回的神经组织。

3.2 因果关系推理的实验研究

在一组实验中，参与者都是物理类的学生，并且已经学习过电磁学。

学习场景是让学生观看一段视频：有两个小球，第二个小球在没有被第一个小球碰触的情况下发生移动。然后告诉或者不告诉学生这两个小球是两个带电粒子。

当学生没有被告知这是带电粒子时，他们会认为这个现象是不可信的。fMRI显示，对于不可信事件的推理，右额内侧回的区域被选择性地激活。

然而当播放同样的视频，但告诉学生这是两个带正电的粒子时，他们会认为这个现象是可信的。fMRI显示，对于可信事件的推理，左额中侧回的区域被选择性地激活。

尽管学生们观察到的视频在两种情况下都是相同的，但在不同的知识背景下，大脑的激活模式却非常不同。这一组实验支持了这样的假设：学生对因果关系的推理是多维的，而且每个问题不同的背景信息也会激活神经网络完成任务的不同模式。

3.3 感知分类与语义/概念分类的实验研究

在一组实验中，参与者是物理类的低年级学生(即新手)和物理类的高年级学生(即专家)。学习的场景是判断从液体到气体的相变。

物理新手和专家对液体被加热后所发生的变化显示出非常不同的说法：新手说分子之间的间距增加，而专家则说当状态发生变化时，发生了相变。

fMRI的成像数据与此密切联系。物理专家与新手相比，在这项任务中表现出相对高水平的左下额叶活动，而物理新手与专家相比，表现出相对高水平的颞下和枕下活动。

这两种不同的fMRI模式表明，物理新手将该任务作为感知分类的一种形式，而物理专家则将该任务作为语义/概念分类的一种形式。因此，这种类型的研究表明，高年级学生激活了相关的大脑神经网络，表明他们以不同的方式对信息进行了分类。

上述这些神经学实验中，学习的场景包括球的碰撞和下落等，这都是物理教育中的普遍场景。科学家使用fMRI来研究学生个体进行因果推理的神经根源。这些实验提供了物理现象和因果理论在大脑中推理和整合的一些机制。科学家发现，当学生对理论和现象进行推理时，一些不同的神经网络被激活(图2)。这里需要注意的是，神经影像学研究显示了不同背景和知识改变大脑激活的方式，而不是揭示一个特定大脑部位的硬件功能。

4 宏观层次的研究：从复杂系统的角度

20世纪80年代复杂系统的概念开始兴起。复杂系统可谓无处不在，涉及的范围从原子尺度到行星尺度，从微观的细胞系统、流体系统，到宏观的生态系统、气候系统，再到人类社会的组织、经济、文化、网络等系统。复杂性科学试图研究复杂系统的内在结构、外在功能、相互作用和演化的机制与规律等，已经取得了许多令人瞩目的重要成果[15—18]。因此，2021年诺贝尔物理学奖授予了Parisi等三位科学家，表彰他们对于理解复杂系统所做的开创性贡献。

复杂系统一般包括如下几个概念(图3)：(1)个体元素，这是系统的组成部分；(2)个体元素之间的相互作用和关联，通常可以用简单的规则来描述；(3)系统是由这些元素组成的，但会表现出个体元素所没有的新现象，这称之为涌现。

在一个复杂系统的宏观层面

	实际复杂系统1	实际复杂系统2	实际复杂系统3
个体元素	每只小鸟	每个神经元	每个学生
规则	避免碰撞 速度同步	条件性触发	协作学习和讨论
系统层面 (涌现)	高度有序的集体飞行运动	针对不同学习任务的大脑激活模式 (并行性) 理解概念时的顿悟(突变性)	小组协作导致最终解题方案趋同 (自组织性) 早期讨论的影响更加显著 (初值敏感性)

图3 复杂系统的分析框架和举例

上，从个体元素的简单规则中形成集体行为，这些集体行为经常在个体行为中找不到。例如，在诺贝尔奖颁奖词中专门提到了Parisi对鸟群行为的研究。鸟群这个复杂系统包括：(1)鸟群是由大量鸟儿个体组成；(2)每只鸟的飞行行为有着简单的规则：与邻近个体避免碰撞，与邻近个体保持速度同步；(3)整个鸟群的集体行为，可以展现出各种各样复杂的运动模式。这个典型例子充分说明：复杂系统的整体不仅仅是部分的总和，而且还经常以令人惊讶的方式与这些部分不同，即每只鸟的运动是无序的，尽管鸟群没有统一的指挥，却能如同一个整体自由地变换形状，呈现高度有序的集体运动。

教育从本质上讲，也是一种复杂系统(图3)。甚至可以说，教育系统是最复杂和最具挑战性的系统之一。我们可以举两个例子来看待教育这个复杂系统。

第一个例子：大脑的学习系统。这个复杂系统包括：(1)大脑是由大量神经元组成的；(2)大脑的神经元在处理任务时，满足简单的规则，即在邻近神经元作用下发生有条件的激活；(3)整个大脑的学习行为，会表现出各种模式，例如理解概念含义时的顿悟。

第二个例子：学生的合作小组。这个复杂系统包括：(1)系统的个体元素是小组内的每位学生；(2)个体元素之间的规则也很简单，即每位学生分别提出自己的理解和思路，然后相互讨论；(3)合作小组呈现复杂的聚合和分化的行为。例如，一开始，学生有着各自的解题方案，随着时间的推移，最终的解题方案将趋于一致。

从上述两个教育复杂系统的例子可以看出，简单的个体规则和许多个体同时根据这些规则行事相结合，可以导致非常复杂和动态变化的行为。因此，从复杂系统的角度来研究教育，能够提供一种全新的视角，成为教育研究者有用的分析工具。下面，我们举两个典型的研究案例。

4.1 三人学习小组复杂系统

在一项研究中，讨论了学生以三人为一组，一起学习牛顿运动学，并一起合作解决牛顿运动学的问题的行为[19]。在这个复杂系统中：

(1)个体层面是每一个学生。

(2)个体之间的交互和协同的规则是：每一个学生对于解决问题的方案提出自己的看法，如果提出正确的解题思路，则定义其协作的贡献为正值。反之，如果提出错误的解题思路，则定义其协作的贡献为负值。

这样可以基于代理人的模型(agent based model，ABM)来模拟这个复杂系统。在该模型中，代理人是每一个学生，而规则编码为小组中学生之间的讨论与合作行为。代理人的行为规则通常是接收到特定信号，则做出对应的执行，可以使用“如果……，那么……”的算法结构(即计算机程序中的If/Then语句结构)表示。

上述模型类似于一个粒子的有条件行走。正确的讨论贡献使得粒子沿正向行走，而错误的讨论贡献使得粒子沿负向行走，这样粒子的行走轨迹会呈现出非常复杂的行为。可以通过计算机模拟上述模型的行为。

(3) 在小组这个层面上，小组将给出关于求解牛顿运动学问题的解题方案。这个方案出现了很多有趣的集体行为。例如，在讨论初期，正确的讨论贡献比后来的贡献有更大的正面作用。类似的，在讨论早期，错误的讨论贡献也比后来的贡献有更大的负面作用。这就是所谓初值敏感性。也就是说，小组协作学习过程中对小组成员之间的早期相互讨论非常敏感。如果小组早期的讨论有超过30%的正向贡献，那么最终提交的解题方案往往是正确的。

这项研究从复杂系统的角度研究协作式学习和协作式解决问题。研究发现，个体层面上的动态行为，如相互讨论，深刻地影响了小组层面上的集体行为，即合作得到的解题方案。

4.2 学生选择学校复杂系统

在一个宏观层面的研究中，讨论了学生选择学校的行为[20]。对这个复杂系统可以做如下分析：

(1)该系统中的个体元素包括学校和学生两类。学校的质量和建设能力方面有所不同，学生的能力和背景也各不相同。

(2)该系统的规则有两种情况：一种情况是允许学生自由选择学校，另一种情况是不允许学生自由选择学校。

(3)在宏观层面上，该系统的集体行为可以用学校总成绩的排名来衡量。

这个系统也可以基于代理人模型来模拟。在该模型中，代理人是学校和学生，用有条件性选择学校或无条件性选择学校作为算法规则，通过计算机可以模拟该系统的演化行为。

模型的运行表明，这个教育系统表现出很有趣的行为。例如，通常人们认为，允许学生自由选择学

校，这种自由竞争将导致更好的学校教育和对教育质量的激励。然而，模型的运行结果却发现，高质量的学校(即其学生的总成绩排名较高)是一个不稳定的状态。高质量的学校吸引了许多新学生，其中一些学生的成绩并不高，反而会导致学校的总成绩排名下降。因此整个系统的教育水平并不会上升。

这项研究通过建模和计算机模拟，得到了对这个教育复杂系统的令人惊讶的见解，而且这些分析结果与实证的数据是符合的[20]。

上述这些教育研究，说明结合复杂性的概念观点，特别是基于代理人的模型，并使用计算机模拟，可以提供有用的，有时是独特的关于教育复杂系统的见解(图3)。当然，基于复杂性的计算机建模方法是传统的定量和定性的教育研究方法的补充和扩展，而不是取代它们。现在需要进一步开发和实证检验复杂性建模方法，以满足教育研究人员的需求。

5 更广泛的研究：其他的角度

物理教育研究是一个新兴的交叉学科。除了和物理学、教育学、神经科学、复杂性科学有深入的交叉，还和社会学、文化学、经济学等学科有交叉。例如，不同专业、不同年级、不同类别的学生，在学习物理知识时有什么样的偏好、期望、困难和差异，这是一个相当有趣的话题。关于这方面的研究最近几年有较多成果，并和μ子的反常磁矩、时间晶体等成果一样并列入选美国物理学会的年度十大进展[21—24]。这也是物理教育研究重要性的体现。

6 新的机遇

在科学技术日益发展、国际竞争日益激烈的新时代，物理学教育和物理学人才培养显得尤为关键和重要。物理教育研究作为一门新兴的交叉学科，对于“学生如何学习物理知识”这一教育工作者长期探讨的基本问题给出科学的见解。利用这些新的研究成果，教学工作者可以根据不同的学习规律和机制，有针对性地设计全新的教学方式和方法，从而提高物理课程的教学质量，促进物理学高质量人才的培养。

在本文中，我们只介绍了物理教育研究领域的一些概况和若干新进展。物理教育研究是一个方兴未艾的领域，还有很多问题值得我们去研究，去探索。例如，调查研究发现的学生学习困难是否有更普遍的模式和规律？大脑对物理知识的推理过程有哪些激发模式和路径？各种教育复杂系统还会涌现出哪些全新的行为和现象？正如C. Wieman所说，现在的物理教育研究“只不过是揭开了冰山一角”，这个新兴领域也给我们提供了新的机遇，去探索更多的未知世界！

参考文献

[1] Mckagan S B, Perkins K K, Wieman C E. Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 2010, 6: 17

[2] Singh C, Marshman E. Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 2015, 11: 020117

[3] Loverude M E, Ambrose B S. Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 2015, 11: 020002

[4] Bao L *et al*. Science, 2009, 323: 586

[5] 张萍，丁林. 物理，2019，48：610

[6] 刘兆龙，罗莹，胡海云. 物理，2014，43：478

[7] 丁林，张萍. 物理与工程，2018，28：29

[8] McKagan S B, Perkins K K, Wieman C E. Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 2008, 4: 020103

[9] Tu T, Li C F, Zhou Z Q *et al*. Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 2020, 16: 020163

[10] Tu T, Li C F, Xu J S *et al*. Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 2021, 17: 020142

[11] Howard-Jones P A. Nature Reviews Neuroscience, 2014, 15: 817

[12] Jones E G, Mendell L M. Science, 1999, 284: 739

[13] Draganski B *et al*. Nature, 2004, 427: 311

[14] Dehaene S *et al*. Science, 2010, 330: 1359

[15] Nobel Prize: Complexity, from Atoms to Atmospheres. Physics, 2021, 14: 141

[16] Watts D J, Strogatz S H. Nature, 1998, 393: 440

[17] Grimm V *et al*. Science, 2005, 310: 987

[18] Palla G. Nature, 2005, 435: 814

[19] Jacobson M J, Kapur M, Reimann P. Educational Psychologist, 2016, 51: 210

[20] Maroulis S *et al*. Science, 2010, 330: 38

[21] Highlights of the Year 2016. Physics, 2016, 9: 151

[22] Highlights of the Year 2019. Physics, 2019, 12: 145

[23] Highlights of the Year 2020. Physics, 2020, 13: 198

[24] Highlights of the Year 2021. Physics, 2021, 14: 179