

基于 5E 学习模型的沉浸式 VR 学习方法在物理实验课堂中的应用

The Application of an Immersive VR Learning Method Based on the 5E Learning Model in Physics Laboratory Classes

刘晨伟^{1*}, 乔仪凡¹, 肖林朔¹, 杨启凡¹
¹ 福建师范大学 教育学院, 福建福州 350000
 liuchenwei2002@163.com

【摘要】 物理学作为自然科学的核心学科, 在培养学生的逻辑思维和实践能力方面具有重要意义。然而, 传统的物理实验课程存在一定的局限性, 如受实验资源和条件的限制, 无法满足学生的个性化需求。为解决该问题, 本研究开发了一款基于沉浸式虚拟现实的物理实验学习系统, 并在系统基础上, 设计了一项基于 5E 学习模型的沉浸式 VR 学习方法。为了验证该方法的有效性, 本研究在中学开展了一项准实验研究, 比较 5E-based immersive VR、一般 immersive VR 和传统教学三种方式。研究结果显示: 5E-based immersive VR 能显著提升学生学习成绩, 并增强自我效能感、问题解决能力和沉浸体验。

【关键词】 5E 学习模型; 物理实验课程; 沉浸式虚拟现实

Abstract: As a core discipline of the natural sciences, physics plays a crucial role in cultivating students' logical thinking and practical skills. However, traditional physics laboratory courses have certain limitations; for example, constraints on experimental resources and conditions often prevent them from meeting students' individualized needs. To address this issue, this study developed a physics laboratory learning system based on immersive virtual reality and, building upon this system, designed an immersive VR learning method based on the 5E learning model. To validate the effectiveness of this method, this study conducted a quasi-experimental study in secondary schools, comparing three approaches: 5E-based immersive VR, general immersive VR, and traditional instruction. The results indicate that 5E-based immersive VR significantly improves students' academic performance, self-efficacy, problem-solving skills, and sense of immersion.

Keywords: 5E learning model, physics laboratory course, immersive virtual reality

1. 引言

在中学阶段, 物理是一门需要发现、假设、设计、实验、验证的课程, 对于培养学生的逻辑思维有着非常重要的作用(Istiqamah et al., 2017)。然而, 物理一直以来都被认为是比较困难的学科之一, 其中有许多抽象的概念与实验步骤需要学习者去理解, 这是学习者学习过程中的阻碍(Zulkifli et al., 2022)。同时, 许多教师还是通过传统的教学方式授课, 例如: 在物理教学过程中仅通过口头讲述传授知识。但是, 物理课程实验需要学习者亲自动手, 而很多学校无法给学生提供动手做实验的设备条件, 同时也担忧学生做实验过程中的安全问题(Basbug et al., 2022), 使得学生较少参与实验, 导致学生对所学概念理解不够深入(Khaerunnisak, 2018)。因此, 在物理课堂中加入数字化技术给学生提供亲自动手实验的条件是必要的。当前物理实验课程中, 学生在情意与认知两个层面均存在一定不足: 一方面, 学生对自己设计、实施和解释实验的能力信心较弱, 自我效能感有待提升(Canright&White, 2024); 另一方面, 学生在解决物理问题时仍较多停留于公式匹配和机械计

算层面, 缺乏基于概念理解的原理判断与解题规划能力 (Araiza-Alba et al., 2021)。由此, 学生虽能完成部分实验任务, 但对实验探究的真实意义、科学思维过程及问题解决机制的理解仍较为有限

过去许多研究发现, 将 Immersive Virtual Reality (IVR) 技术融入教学课堂将极大地促进学习效果 (Huang et al., 2020), 因为虚拟环境中许多抽象的概念将被具体化, 这有助于学生的理解, 同时提高学生学习效果 (Araiza-Alba et al., 2021)。然而, 并不是将 IVR 技术简单融入教学课堂都能促进学习效果。将 IVR 应用于课堂虽然可以让学生更有兴趣参与学习, 但对学生的学习效果没有提升 (Dubovi, 2022), 还会出现个人学习时间降低从而影响学习的问题 (Baniyadi et al., 2020)。因此, 将 IVR 应用于教学课堂中时, 需要结合适当的教学策略来引导学生探索, 从而避免产生负面的影响 (Chang et al., 2020)。

5E 学习模型主要应用在科学学科, 由 Engage、Explore、Explain、Elaborate、Evaluate 五个阶段组成, 每一个阶段都有其特定的作用, 并且有助于学习者更好地理解知识与学习 (Bybee et al., 2006)。在过去的研究中, 基于 5E 学习模型的教学方法被认为是一种高效地促进教师教学以及学生理解的教学方法 (Bybee et al., 2006), 因为它是一种以学生为主体的模型, 旨在让学生主动探索知识。将 5E 学习模型融于课堂有助于学生在学习过程中进行自主探索, 并发展更高水平的思考能力 (Abdusselam et al., 2018), 也能够提高教学的效率, 给予给学生提示和机会进行自主的探究, 有助于学生将已知内容与学习内容建立联系 (Ruiz-Martín & Bybee, 2022)。由此可见, 将 5E 学习模型融于课堂将会对学生学习产生许多积极的影响。

过去许多研究者将 5E 学习模型应用于各个学科中, 如化学 (Salyani et al., 2020)、数学 (Bahtaji, 2021)、科学 (Güven et al., 2022) 等, 研究结论也表明了该模型的有效性。但很少有研究将 5E 学习模型与 IVR 相结合, 也很少关注 IVR 教学课堂的策略与教学方法。为了填补这一空白, 本研究设计了基于 5E 学习模型的 IVR 学习方法, 以帮助学生在物理课堂中进行主动实践。为评价该方法的有效性, 选取一所中学进行准实验研究, 以回答以下研究问题:

(1) 相比于传统学习方法和一般沉浸式 VR 学习方法, 基于 5E 学习模型的沉浸式 VR 学习方法是否能够促进学生的学习成绩?

(2) 相比于传统学习方法和一般沉浸式 VR 学习方法, 基于 5E 学习模型的沉浸式 VR 学习方法是否能够促进学生的问题解决能力?

(3) 相比于传统学习方法和一般沉浸式 VR 学习方法, 基于 5E 学习模型的沉浸式 VR 学习方法是否能够促进学生的自我效能?

2. 文献综述

2.1. 物理学中的沉浸式虚拟现实

物理学是自然科学的一部分, 也是一门包含着许多抽象知识和抽象概念, 且需要学生亲自动手实验来获得知识的学科 (Sobari, 2016)。然而学生在物理课堂中面临着许多的困难, 研究表明, 学生在物理学习中普遍面临理解抽象概念和实验参与不足等问题 (Zulkifli et al., 2022)。而传统的口头讲解教学会让学习者处于被动的地位, 不利于学生真正明白物理实验的意义和背后的知识 (Zohar & Trumper, 2020)。此外, 许多学校因实验设备的危险性, 没有为学生提供更多的亲自动手实验的机会与条件 (Basbug et al., 2022), 这使得学生只会死记硬背书的知识以应对考试。近年来, 许多研究者开始将各种技术应用于物理课程中, 以克服实验客观条件的限制, 早期研究表明, 计算机演示和多媒体课件能够通过动态呈现实验过程与现象, 提高教学的可视性, 并帮助学生理解抽象的物理概念 (Jian-hua & Hong, 2011)。

有研究表明, IVR 不仅能够通过三维可视化帮助学生理解抽象概念, 还能提供更真实的学习环境, 并在一定程度上提高学习成绩、降低认知负荷 (Liu et al., 2022)。同时, IVR 技术还能克服物理实验器材不足和实验安全隐患等问题。

虚拟现实 (VR) 是结合计算机图像系统、显示设备和接口技术构建三维互动环境的技术, 能够为用户提供较强的沉浸感与交互体验 (Krassmann et al., 2020)。Estes et al. (2016) 将其区分为沉浸式与非沉浸式两类, 其中沉浸式虚拟现实通常借助头戴式设备实现, 更具交互性和沉浸感。近年来, 沉浸式虚拟现实被越来越多地应用于教学中 (Meyer et al., 2019)。例如, Hu and Lee (2017) 指出, 虚拟现实应用于课堂能够创设现实中难以实现的情境, 提高学生的课堂参与度, 促进有意义学习, 并培养其思考与创造能力。然而, 除了沉浸式教学媒体会影响教学过程和学生学习外, 教学策略的选择也同样重要 (Meyer et al., 2019)。例如, Chang et al. (2020) 的研究表明, 在 VR 学习中融入同伴互评策略, 有助于提升学生的自我效能感和批判性思维倾向。Yang et al. (2022) 的研究发现, 基于探究式的 VR 学习策略能够促进学生主动学习, 并提高学习成绩。因此, 在 IVR 教学中, 选择合适的教学策略同样十分重要。

2.2. 5E 教学模式

建构主义学习理论在教育领域被广泛地认可与接受。Narayan et al. (2013) 指出建构主义是一种学习者基于先前经验主动完成对新知识意义建构的学习理论。基于这一理论, Bybee 提出了 5E 学习模型, 并将学习过程分为参与、探索、解释、细化和评估五个阶段, 强调学生在学习中的主体作用 (Bybee, 1997)。

5E 学习模型被认为是一种引导式探究的教学模型, 在引导式探究的过程中教师往往只须提供必要的学习材料, 而学生作为学习的主体动手探究解决问题 (Martin-Hansen, 2002)。Liu (2009) 发现 5E 学习模型是一种有效的实践和学科探究的模型, 将其应用于科学教学当中可以有效促进学生对知识的理解, 帮助学生达到更好的成绩。同时, 将技术融合于 5E 学习模型的各个阶段将有利于使得各个阶段更加丰富 (Çepni & Şahin, 2012)。但是却少有研究将 5E 学习模型与 IVR 相结合。

3. 基于 5E 模型的沉浸式 VR 方法

3.1. 基于 5E 模型的 IVR 学习方法

在“参与”阶段, 学生通过 VR 设定的故事情境进入实验室, 从而激发好奇心和探索欲, 并帮助其更好地融入学习情境。随后, 学生根据虚拟实验室提供的与先前知识相关的问题进行思考, 以建立新旧学习经验之间的联系。例如, 学生需要思考“生活中水有多少种形态”以及“物体状态如何变化”等问题, 从而回顾已有经验并形成初步想法。在“探索”阶段, 学生通过虚拟实验设备和操作流程建立实验体验。学生可通过点击系统中的器材学习其使用方法与实验原理, 并在搭建区域按照正确顺序完成实验装置搭建, 观察不同温度下的实验现象。该过程有助于学生直观获取学习经验, 理解物理概念, 并在安全的虚拟环境中完成实验操作, 如图 1 所示。



图 1:“参与”阶段与“探索”阶段的 IVR 场景

在“解释”阶段，学生需要根据“探索”阶段观察到的实验现象完成系统表格，并解释其中蕴含的物理原理。同时，学生还需口头向教师说明相关原理及其在实验中的解决方式。随后，学生通过观看系统中的教学视频进一步建构知识框架，加深对抽象概念的理解。在“细化”与“评估”阶段，学生需要运用所学知识完成系统练习，以进一步理解并应用知识；教师则根据评价表对学生的课堂学习表现进行评价，以支持其后续学习，如图 2 所示。

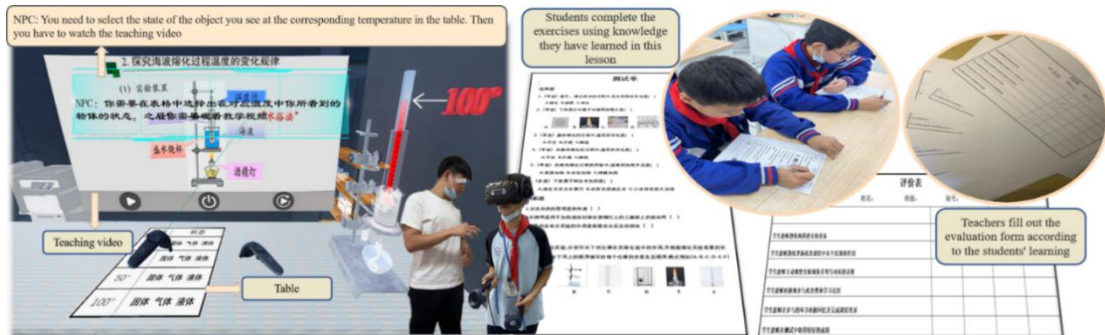


图 2:“解释”阶段“细化”阶段与“评估”阶段

3.2. 研究工具

本研究采用的工具包括学习前和学习后成绩测试、个人自我效能问卷、问题解决倾向问卷。

学习成绩测试由教师设计，用于测量三组学生现有的物理知识水平。前测和后测各包括 6 道选择题，3 道判断题，1 道大题填空，满分 100 分。

问题解决倾向问卷引用 Lai & Hwang (2014) 复杂问题解决倾向测量问卷，采用李克特五点量表，Cronbach's α 值为 0.78，题目共计 6 题。

自我效能问卷引用 Pintrich et al. (1991) 自我效能测量问卷。采用李克特五点量表，其 Cronbach's α 值为 0.93，题目共计 5 题。

4. 实验结果

在学习成绩、自我效能感和问题解决能力三个变量上，三组学生的前测均无显著差异，且数据满足正态分布和回归斜率同质性假设，因此均采用单因素协方差分析 (ANCOVA) 比较三组后测差异。

4.1. 学习成绩

学习成绩的 ANCOVA 结果见表 1。结果显示，三组在学习成绩后测上存在显著差异 ($F_{(2,41)}=11.63, p<0.01$)。LSD 事后比较结果显示，实验组显著高于控制组 I 和控制组 II，且控制组 I 显著高于控制组 II，表明基于 5E 学习模型的 IVR 学习方法在提升学生学习成绩方

面效果最佳。

表 1:三个组别学习成果后测问卷的协方差分析结果

Group	N	Mean	S.D.	Adjusted Mean	F	Post Hoc
Experimental group	14	78.86	11.4	76.98	11.63**	(1)>(2)
Control group I	16	65.25	16.8	65.45		(2)>(3)
Control group II	15	53.00	10.9	52.64		(1)>(3)

***p < .001

4.2. 自我效能感

自我效能感的 ANCOVA 结果见表 2。结果显示,三组在自我效能感后测上存在显著差异 ($F_{(2,41)}=11.93$, $p<0.05$)。LSD 事后比较结果显示,实验组显著高于控制组 I 和控制组 II,且控制组 I 显著高于控制组 II,表明基于 5E 学习模型的 IVR 学习方法在促进学生自我效能感方面效果最佳。

表 2:三个组别自我效能感事后问卷的协方差分析结果

Group	N	Mean	S.D.	Adjusted Mean	F	Post Hoc
Experimental group	14	4.44	0.28	4.38	11.93*	(1)>(2)
Control group I	16	4.01	0.43	4.02		(2)>(3)
Control group II	15	3.56	0.57	3.59		(1)>(3)

***p < .001

4.3. 问题解决能力

问题解决能力的 ANCOVA 结果见表 3。结果显示,三组在问题解决能力后测上存在显著差异 ($F_{(2,41)}=16.89$, $p<0.05$)。LSD 事后比较结果显示,实验组显著高于控制组 I 和控制组 II,且控制组 I 显著高于控制组 II,表明基于 5E 学习模型的 IVR 学习方法在提升学生问题解决能力方面效果最佳。

表 3:三个组别在问题解决能力后测问卷中的协方差分析结果

Group	N	Mean	S.D.	Adjusted Mean	F	Post Hoc
Experimental group	14	4.48	0.23	4.45	16.8*	(1)>(2)
Control group I	16	4.06	0.41	4.09		(2)>(3)
Control group II	15	3.60	0.51	3.59		(1)>(3)

***p < .001

5. 讨论

本次研究将物理学科与基于 5E 学习模型的 IVR 学习方法相结合,设计了一款基于 5E 学习模型的 IVR 学习方法并应用于物理课程,以了解此种学习方法在促进学生学习成绩、问题解决能力、自我效能的作用。

5.1. 研究问题 1:

研究结果表明,在提升学生学习成绩方面,IVR 学习方法优于传统学习方法,而基于 5E 学习模型的 IVR 学习方法效果最为显著。这一结果与 Liu et al. (2020) 的研究结果一致,说明 IVR 和 5E 学习模型均有助于促进学生学习成绩的提升。这可能是因为 5E 学习模型通过探索、解释和细化等阶段促进了学生的主动参与、知识建构与知识应用,而沉浸式学习环境中的互动也进一步增强了学习效果 (Mystakidis et al., 2014)。

5.2. 研究问题2:

研究结果表明,在提升学生问题解决能力方面,IVR学习方法优于传统学习方法,而基于5E学习模型的IVR学习方法效果更为显著。这一结果与Araiza-Alba et al. (2021)的研究结果一致,表明IVR环境能够增强学生的学习兴趣与主动探索意愿,从而促进问题解决能力的发展。同时,5E学习模型中的探索活动进一步强化了学生与学习内容环境的互动,这可能是实验组表现更优的重要原因(Allcoat & von Mühlenen, 2018)。在实验组的访谈结果中,有学生提到“我很愿意使用这种学习方式学习,因为我可以主动的搭建设备、观察实验现象,是非常新奇的体验。”其访谈结果也表明,学生认可该学习方式的互动性与新颖性。

5.3. 研究问题3:

研究结果表明,在提升学生自我效能感方面,IVR学习方法优于传统学习方法,而基于5E学习模型的IVR学习方法效果最为显著。这一结果与Lin et al. (2022)的研究结果一致,说明虚拟情境学习有助于提升学生的自我效能感。这可能是因为基于5E学习模型的IVR设计支持学生在虚拟环境中反复学习与应用知识,并通过系统提示和反馈减少错误,从而增强学习信心。同时,安全的虚拟实验环境以及探索、解释和细化等阶段的连续学习过程,也有助于学生建立运用知识解决问题的信心。

6. 结论与建议

本研究开发了一种基于5E学习模型的IVR学习方法,并将其应用于初中物理课程中,通过实证研究验证了该方法对物理学习的积极作用。研究结果表明,基于5E学习模型的IVR学习方法能够有效促进学生的物理学习。该方法不仅有助于学生通过动手实验和直接观察实验现象提高学习兴趣、学习效率、自我效能和学习成绩,还能借助IVR技术在保障安全的基础上创设沉浸式实验情境,将抽象的物理概念可视化,帮助学生更好地理解知识。

与现有研究相比,本研究将IVR与5E学习模型结合并应用于物理学科,验证了该学习方法的有效性。这表明,在IVR中融入合适的教学模型,有助于促进学生的知识建构,提高学习效率,并推动课堂以学生为中心。从实践角度看,IVR技术能够为实验课程提供更安全、可视化的学习条件,并在一定程度上突破时间、空间和物理条件的限制。

本研究也存在一定局限,包括样本量较小、实验周期较短,以及研究情境仅限于特定物理课程。因此,未来研究可开展大样本、长期实验,并将该学习方法应用于不同年级和不同学科,以进一步验证其有效性和适用性。同时,探讨IVR与其他教学策略或教学模型的结合,也具有进一步研究的价值。

参考文献

- Abdusselam, M. S., Kilis, S., Cakir, C. S., & Abdusselam, Z. (2018). Examining Microscopic Organisms under Augmented Reality Microscope: A 5E Learning Model Lesson. *Science Activities*, 55(1–2), 68–74. <https://doi.org/10.1080/00368121.2018.1517717>
- Allcoat, D., & von Mühlenen, A. (2018). Learning in virtual reality: Effects on performance, emotion and engagement. *Research in Learning Technology*, 26.
- Araiza-Alba, P., Keane, T., Chen, W. S., & Kaufman, J. (2021). Immersive virtual reality as a tool to learn problem-solving skills. *Computers & Education*, 164, 104121.
- Araiza-Alba, P., Keane, T., Matthews, B., Simpson, K., Strugnell, G., Chen, W. S., & Kaufman, J. (2021). The potential of 360-degree virtual reality videos to teach water-safety skills to

- children. *Computers and Education*, 163, 104096.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104096>
- Bahtaji, M. A. A. . (2021). The role of math and science exposure on the effect of 5e instructional model in physics conceptions. *Journal of Baltic Science Education*, 20, 10-20.
- Baniasadi, T., Ayyoubzadeh, S. M., & Mohammadzadeh, N. (2020). Challenges and Practical Considerations in Applying Virtual Reality in Medical Education and Treatment. *Oman Medical Journal*, 35(3), e125–e125. <https://doi.org/10.5001/omj.2020.43>
- Basbug, G., Cavicchi, A., & Silbey, S. S. (2022). Rank Has Its Privileges: Explaining Why Laboratory Safety Is a Persistent Challenge. *Journal of Business Ethics*, 0123456789.
<https://doi.org/10.1007/s10551-022-05169-z>
- Bybee, R. W. (1997). Achieving scientific literacy: From purposes to practices. Heinemann, 88 Post Road West, PO Box 5007, Westport, CT 06881.
- Bybee, R. W., Taylor, J. A., Gardner, A., Van, P., Powell, J. C., Westbrook, A., Landes, N., Spiegel, S., Stuhlsatz, M. M., Ellis, A., Thomas, H., Bloom, M., Moran, R., Getty, S., & Knapp, N. (2006). The BSCS 5E Instructional Model : Origins and Effectiveness by 5415 Mark Dabbling Boulevard. Science, June.
- Canright, J. P., & White Brahmia, S. (2024). Modeling novel physics in virtual reality labs: An affective analysis of student learning. *Physical Review Physics Education Research*, 20(1), 010146.
- Çepni, S., & Şahin, Ç. (2012). Effect of Different Teaching Methods and Techniques Embedded in the 5E Instructional Model on Students' Learning about Buoyancy Force. *Eurasian J. Phys. & Chem. Educ*, 4(2), 97–127. <http://www.eurasianjournals.com/index.php/ejpce>
- Chang, S. C., Hsu, T. C., & Jong, M. S. Y. (2020). Integration of the peer assessment approach with a virtual reality design system for learning earth science. *Computers and Education*, 146, 103758. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103758>
- Dubovi, I. (2022). Learning with virtual reality simulations: Direct versus vicarious instructional experience. *Interactive Learning Environments*, 0(0), 1–13.
<https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2042313>
- Estes, J. S., Dailey-Hebert, A., & Choi, D. H. (2016). Integrating technological innovations to enhance the teaching-learning process. In *Emerging tools and applications of virtual reality in education* (pp. 277–304). Pennsylvania: IGI Global
- Güven, G., Kozcu Cakir, N., Sulun, Y., Cetin, G., & Güven, E. (2022). Arduino-assisted robotics coding applications integrated into the 5E learning model in science teaching. *Journal of Research on Technology in Education*, 54(1), 108–126.
<https://doi.org/10.1080/15391523.2020.1812136>
- Hu Au, E., & Lee, J. J. (2017). Virtual reality in education: a tool for learning in the experience age. *International Journal of Innovation in Education*, 4(4), 215.
<https://doi.org/10.1504/ijiie.2017.10012691>
- Huang, H. L., Hwang, G. J., & Chang, C. Y. (2020). Learning to be a writer: A spherical video-based virtual reality approach to supporting descriptive article writing in high school Chinese courses. *British Journal of Educational Technology*, 51(4), 1386–1405.
<https://doi.org/10.1111/bjet.12893>

- Istiqamah, N., Doyan, A., & Taufik, M. (2017). PENGARUH MODEL PEMBELAJARAN DISCOVERY DAN INKUIRI TERBIMBING BERBASIS EKSPERIMEN TERHADAP HASIL BELAJAR FISIKA DAN SIKAP ILMIAH SISWA. 4(2), 2–7.
- Jian-hua, S., & Hong, L. (2011). Explore the effective use of multimedia technology in college physics teaching. In H. H. Tan (Ed.), *Icfese 2011: 2011 International Conference on Future Computer Supported Education, Vol 1* (pp. 496–498). Information Engineering Research Inst, Usa. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000391344700136>
- Khaerunnisak, K. (2018). Peningkatan pemahaman konsep dan motivasi belajar siswa melalui simulasi physic education technology (PhET). *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 4(2).
- Krassmann, A. L., da Rocha Mazzuco, A. E., Melo, M., Bessa, M., & Bercht, M. (2020). Usability and sense of presence in virtual worlds for distance education: A case study with virtual reality experts. *CSEDU 2020 - Proceedings of the 12th International Conference on Computer Supported Education*, 1(January), 155–162. <https://doi.org/10.5220/0009350401550162>
- Lin, H.-C., Hwang, G.-J., Chou, K., & Tsai, C.-K. (2022). Fostering complex professional skills with interactive simulation technology: A virtual reality-based flipped learning approach. *British Journal of Educational Technology*. <https://doi.org/10.1111/bjet.13268>
- Liu, R., Wang, L., Koszalka, T. A., & Wan, K. (2022). Effects of immersive virtual reality classrooms on students' academic achievement, motivation and cognitive load in science lessons. *Journal of Computer Assisted Learning*, 38(5), 1422–1433. <https://doi.org/10.1111/jcal.12688>
- Liu, R., Wang, L., Lei, J., & Wang, Q. (2020). Effects of an immersive virtual reality-based classroom on students' learning performance in science lessons. November. <https://doi.org/10.1111/bjet.13028>
- Liu, T. C., Peng, H., Wu, W. H., & Lin, M. S. (2009). The effects of mobile natural-science learning based on the 5E learning cycle: A case study. *Journal of Educational Technology & Society*, 12(4), 344–358.
- Martin-Hansen, L. (2002). Defining Inquiry. *The Science Teacher*, 69, 34–37.
- Meyer, O. A., Omdahl, M. K., & Makransky, G. (2019). Investigating the effect of pre-training when learning through immersive virtual reality and video: A media and methods experiment. *Computers and Education*, 140, 103603. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103603>
- Mystakidis, S., Lambropoulos, N., Fardoun, H. M., & Alghazzawi, D. M. (2014). Playful Blended Digital Storytelling in 3D Immersive eLearning Environments: A Cost Effective Early Literacy Motivation Method. *Proceedings of the 2014 Workshop on Interaction Design in Educational Environments*, 97–101. <https://doi.org/10.1145/2643604.2643632>
- Narayan, R., Rodriguez, C., Araujo, J., Shaqlaih, A., & Moss, G. (2013). Constructivism—Constructivist learning theory.
- Ruiz-Martín, H., & Bybee, R. W. (2022). The cognitive principles of learning underlying the 5E Model of Instruction. *International Journal of STEM Education*, 9(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s40594-022-00337-z>
- Salyani, R., Nurmaliah, C., & Mahidin, M. (2020). Application of the 5E learning cycle model to overcome misconception and increase student learning activities in learning chemical bonding. *Journal of Physics: Conference Series*, 1460(1), 012102. <https://doi.org/10.1088/1742->

6596/1460/1/012102

- Sobari, A., Sucahyo, I., Fisika, J., & Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, U. N. S. (2016). PENGEMBANGAN ALAT PERAGA TICKER TIMER SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN FISIKA POKOK BAHASAN GERAK LURUS. *Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika (JIPF)*, 05(03), 154–160.
- Yang, Q.-F., Lin, H., Hwang, G.-J., Su, P.-Y., & Zhao, J.-H. (2022). An exploration-based SVVR approach to promote students' chemistry learning effectiveness. *Interactive Learning Environments*, 0(0), 1–25. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2135106>
- Zohar, B. R., & Trumper, R. (2020). The Influence of Inquiry-Based Remote Observations via Powerful Optic Robotic Telescopes on High School Students' Conceptions of Physics and of Learning Physics. *Journal of Science Education and Technology*, 29(5), 635–645. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09842-8>
- Zulkifli, Z., Azhar, A., & Syaflita, D. (2022). Application Effect of PhET Virtual Laboratory and Real Laboratory on the Learning Outcomes of Class XI Students on Elasticity and Hooke's Law. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 8(1), 401–407. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i1.1274>