arXiv:2304.14814v1 [physics.ed-ph] 28 Apr 2023

非传统物理实验课的教学：响应学生认识论框架

Meagan Sundstrom,[1] Rebeckah K. Fussell,[1] Anna McLean Phillips,[2] Mark Akubo,[1]Scott E. Allen,[3] David Hammer,[4,5] Rachel E. Scherr,[6] 和 N. G. Holmes[1]

[1]原子与固态物理实验室，康奈尔大学，美国纽约州伊萨卡，邮编 *14853*[2]物理与天文学学院，莫纳什大学，澳大利亚维多利亚州克莱顿，邮编 *3800*[3]物理系，康奈尔大学，东大道 *245* 号，美国[4]纽约州伊萨卡，邮编 *14853*；教育系，塔夫茨大学，上校区路 *12* 号，美国马萨诸塞州梅德福，邮编 *02155*[5]物理与天文学系，塔夫茨大学，波士顿大道 *574* 号，*304* 室，美国马萨诸塞州梅德福，邮编 *02155*[6]物理科学部，*STEM* 学院，华盛顿大学博塞尔分校，美国华盛顿州博塞尔，邮编 *98011*(日期：2023年5月1日)

物理学非传统实验室（实验室）活动的研究表明，学生往往期望验证预先设定的结果，就像传统实验活动中那样。他们对正在发生之事的理解，即认识论框架，可能会对他们在实验室中的行为产生积极或消极的影响。本文分析了学生在非传统实验室中的认识论框架，以了解教学情境，尤其是教师行为，如何塑造学生的框定。我们呈现了一名经验丰富的助教（TA）所教授的一个实验班的视频数据，其中19名学生分成七个小组进行学习。我们认为，学生是否阐述实验预测，以及他们在多大程度上把握构建知识（认识论能动性）的机会，可以体现他们在该实验室中的框定。我们表明，助教试图转变学生认知框架的做法，在促使学生作出实验预测方面通常有效，但在促进认识论能动性方面效果较差。我们认为，部分而言，助教尝试的成效取决于他们是否以及如何回应学生当前的框定。这项研究提供了证据，表明教师能够转变学生在非传统实验课中的认知框架，同时也揭示了学生框定的复杂性，以及在这一情境下教师在转变框定过程中所发挥作用的复杂性。

一、引言

物理实验室（实验课）的教学正逐渐摆脱传统的、旨在巩固课程内容的模型验证活动，转向开放式探究，让学生参与科学实验实践 [1, 2]。这些实践包括运用适当的数据收集方法检验物理模型、完善并迭代实验设计，以及决定如何利用实验数据评估模型。先前研究表明，学生能够在非传统实验课中参与这些实践 [3, 4], , 然而，许多学生的认识论框架——即他们对自己在实验课中应当产出何种知识以及如何产出这些知识的预期——与教学设计大相径庭。具体而言，学生进入非传统实验课时，往往持有确认框架，期望自己的实验能够验证他们在课堂上学过的已知理论或模型 [5–10]。其他研究则指出，学生可能持有障碍框架（如“闯过重重关卡”），在这种框架下，学生的首要目标是完成作业并尽快离开实验室 [11]。

研究表明，在确认和障碍框架下的学生往往会采用可疑研究实践 [9, 10, 12, 13], , 其中也包括他们处理意外实验结果的方式 [11]。因此，有人可能会认为，实验室的教学情境，包括教师在实验课中的行为，应尝试让学生摆脱这些框架。先前研究表明，教师能够在问题求解情境中实时转换学生框架 [14–17], , 然而教师试图在非传统实验课中转换学生框架并不总是成功 [11]。因此，本研究的首要目标是to 描述非传统实验课的教师可能影响学生框定的方式。

我们对同一实验情境中的七个学生小组进行了视频分析：这是一项在学期初开展的非传统实验活动，其实验指导经过有意设计，旨在引导学生的框定摆脱确认框架。本次课程的教师也明确挑战了确认框架，通过介绍证伪这一概念来实现；证伪是波普尔式探究中的一个概念，指实验者检验一个假设或主张，而该假设或主张应当能够被反驳（即被证伪） [18–21]。因此，教学情境对学生框定的关注，使这次课程特别适合进行分析。在本研究中，我们旨在了解学生如何框定实验活动，以及教师如何塑造并提示这种框定，尤其关注学生框架发生转变的时刻。

我们对一组学生认识论框架进行了刻画，这些框架由两个维度界定：学生是否预先预测实验结果，以及学生在多大程度上利用实验来建构知识（认识论能动性）。我们发现，尽管教师使七个实验小组中的五个转而采用与证伪相关的框架，但学生并未接受教师提示，未将活动框定为自己有权主导知识建构的活动。我们认为，当教师提示学生调整框定方式和行为时，如果这些提示能对学生当前的框定方式作出响应 , 往往更容易奏效。然而与此同时，即使是响应性的提示，也可能无意中削弱学生的能动性。

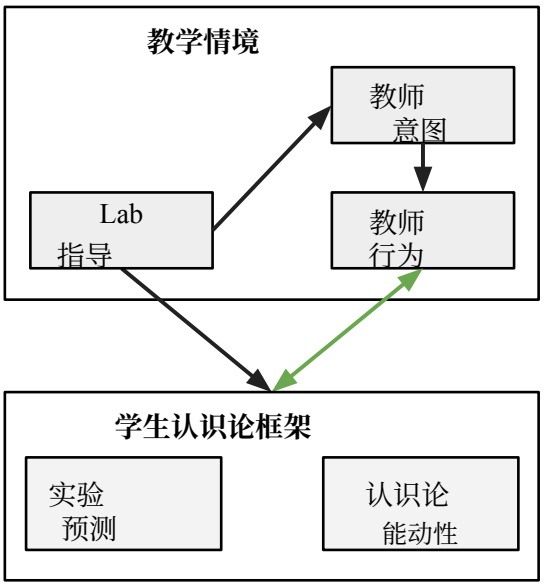


图 1：本研究的理论框架。教学情境涵盖实验学习环境的组成部分，包括书面实验指导、教师开展实验教学的意图，以及教师在实验过程中的行为。教学情境与学生认识论框架相互作用，即学生对知识建构过程中正在发生之事的预期。这种框定体现在学生对实验结果的预测，以及他们在多大程度上利用机会建构知识（认识论能动性）。我们的主要目标是描述教师行为与学生框定之间的关系（绿色箭头）。

II. 理论框架

我们采用一种将教学情境的各个组成部分与学生认识论框定联系起来的理论框架开展研究（图 1）。我们的分析主要旨在刻画教师行为如何既能提示学生进行框定，又能响应学生的框定（图 1 中的绿色箭头）。我们还将在下文分别说明图中各项关系。

A. 学生认识论框架

我们的理论框架的核心组成部分是学生认识论框架（图1底部的方框）。框定指个人或群体对正在发生的事情的解读，或对“这里发生了什么？”这一问题的回答方式 [22–24]。因此，认识论框定是指个人或群体对自己要构建何种知识以及如何构建知识的预期 [25–28]。学生如何框定一项活动，会影响他们在该活动中的行为和参与方式。

研究人员已经调查了学生的认识论框架在一系列教学科学情境中，例如 K-12模型构建活动 [29–34]，本科化学实验 [35, 36]，和本科物理讨论 [14, 26,37–39] 及实验课 [7–13, 40, 41]。针对后一情境中学生框定方式的研究表明，学生常常将基础物理实验框定为确认练习，认为自己能通过实验验证已知理论或模型。在对学生实验物理观的调查 [5, 6, 42, 43]，、对实验课学生的视频分析 [7, 10, 11]，以及对学生书面实验记录的定性分析 [9, 10, 12, 40]中，均发现了确认性预期。确认框架通常会导致实验室中的问题行为。例如，抱有确认性预期的学生往往依赖教师或实验手册来构建知识，因为他们认为实验结果已由权威预先决定 [7, 10]。此外，旨在确认某个模型的学生可能会采取可疑研究实践——“使实验结果的客观性受到质疑的决策或行为” [10, 第 3] 页。这类实践通常旨在使结果与模型的预测相符，例如操纵数据、夸大或缩小不确定度数值、曲解数据以获得特定结果，以及定性判断结果 [9, 10, 12, 13]. [1]

在实验教学背景下，研究表明，学生的框定可能体现在他们对实验预测的表述以及认识论能动性的表现上。实验预测指学生是否会表述实验的预期结果。认识论能动性关乎学生在多大程度上预期从实验中构建知识 [4, 45, 46]。例如，处于确认框架中的学生可能会表述一项实验预测，例如预测实验会得出与他们在课堂上学到的物理模型相符的结果 [10]。这类学生也可能表现出较低的认识论能动性，例如不去寻找证伪证据 [10]，或忽视与其预测不一致的数据 [11]。

在我们的理论框架中，学生的实验预测与认识论能动性之间可能有关联，也可能无关（图1中实验预测与认识论能动性之间没有箭头），因为学生对认识论能动性的践行，并不一定取决于他们是否预期会出现某个特定的实验结果。例如，持有某种预测的学生可能只表现出很少的认识论能动性，采取的行为会使其预测得到证实 [4, 7, 10, 11]。另一方面，认识论能动性较强的学生可能认为，面对相矛盾的证据时，他们的预测可以改变，这表明他们采用了不同的框定 [47–49]。此外，没有预先设定预测的学生，如果完全不参与知识建构（例如，采用障碍框定 [11]），可能表现出较少的认识论能动性；也可能通过实验生成新知识，从而表现出较强的认识论能动性 [47]。

[1] 在某些情况下，确认框架可能会富有成效 [44]。

B. 教学情境的动态作用

教学情境的各个组成部分——包括实验指导、教师意图和教师行为——都可能直接或间接地提示学生采用某种框定。

实验课教师是实验室教学情境中的关键组成部分。教师会利用多种资源来构建自己对实验教学的意图，包括书面实验指导（图 1 中从实验指导指向教师意图的箭头），以及其他因素，例如以往的教学与学习经历和专业发展。在教学过程中，教师可能会根据自己对学生参与情况的观察来构建或修正自己的意图。事实上，研究表明，不同教师实施相同教学材料的方式可能大不相同 [50–54], 他们会将不同的预期或认知框架带入所教授的科学课程 [33, 55] 并注意到学生的作业和参与情况中的不同方面 [56]。

教师通过在实验室中的行为来践行这一意图（图 1 中从教师意图指向教师行为的箭头），其中包括与学生的互动。这些行为可能会直接提示学生形成某种认识论框架 [14–17] （图 1 中从教师行为指向学生框定的箭头）；然而，教师提示学生转换认知框架未必总能奏效 [11]。这一过程还形成了一条间接路径：实验指导通过教师的意图和行为间接影响学生的认识论框架。

教师可能通过其开展实验室教学的一般方式（例如，在介绍一项活动时）影响学生框定，也可能通过其在与学生互动时对所观察到情况的具体回应方式产生影响（图1中从学生框定指向教师行为的箭头）。例如，如果教师发现学生处于某种认知框架中，教师可能会调整与学生的互动，将他们引导至另一种认知框架 [17, 57]。我们指出，这种识别并不要求教师理解作为一种构念的“框定”或“认知框架”——即使没有接受过涉及学生框定的正式培训，教师也可能识别并回应学生对当前活动的理解方式。

尽管我们的分析重点在于实验课教师与学生框定之间的关系，实验指导（见图2）也可能直接提示学生的认识论框架（图1中从实验指导指向学生认识论框架的箭头）。例如，若指导内容明确告诉学生如何开展实验，以及应当得到何种结果，就可能提示一种确认框架；在这种框架下，学生不会自行作出实验决策 [58]。

C. 总结

我们首先将这一理论框架作为基础，用于识别并刻画非传统物理实验课中更广泛的学生认识论认知框架。其次，我们运用这一框架来理解教师行为与学生认识论框定之间的复杂关系。下文将针对图 1 中的每个方框，描述本研究所分析的数据。这些数据包括对提供给学生和教师的实验课指导材料的分析、对教师的访谈（以阐明其意图），以及非传统物理实验课中学生和教师行为的视频数据。

III. 教学情境

本研究的数据来自康奈尔大学一门基于微积分的入门力学课程中的一个实验班。该班共有19名学生，其中11名男生和8名女生。大多数学生自我认同为白人和/或亚裔或亚裔美国人，且多数是有意主修工程学的一、二年级学生。该实验班的助教（TA）是一名熟悉物理教育研究的研究生（为保护其匿名性，我们省略了该助教的人口统计信息）。

这门物理学课程的学生每周参加一次为时2小时的实验课。实验课旨在让学生参与科学实验实践 [1, 3, 59]。实验活动提供背景情境（例如，某种物理现象及用于描述它的模型），但许多决定都由学生自行做出（例如，如何搭建装置、收集多少个数据点，以及如何评估所提供模型的有效性）。学生以每组两至四人的形式组成实验小组，并以小组为单位提交实验记录，再由助教评分。

实验课程包含四个主要实验单元，每个单元持续两周。在第一个单元中，学生检验摆的周期是否取决于释放时的角度。在第二个单元中，学生分析自由落体物体的加速度，以确定作用在物体上的力。在第三个单元中，学生使用可拉伸物体设计实验，以检验胡克定律的假设和局限性。最后一个单元是项目实验室，学生将在其中拓展前面某个单元中的探究。所有单元的实验指导均可在 PhysPort.org [60] 上获取。

我们将分析重点放在第一个单元最后的活动——摆实验上。我们选择了学期初的一次实验，因为此时学生很可能持有确认框架 [10]，而且教学材料明确关注学生框定，下面将对此进行介绍。

在摆实验单元的第一周，学生测量并比较摆从10° 和 20°释放时的周期。大部分时间都用于识别并减少测量过程中的不确定性来源。教师介绍了一种称为*t-prime*(t') [61]的统计量：$t' = \frac{A-B}{\sqrt{\sigma_A^2+\sigma_B^2}}$，其中 A 和 B 是测量值，σ_A 和 σ_B 是不确定性。学生使用*t'* 来确定两组数据集（每个角度一组）的可区分性。该统计量类似于学生t检验，可能出现以下结果及相应解释：

- $t' < 1$: 数据集无法区分，摆从 10° 和 20° 释放时的周期可能

要真正检验模型，我们必须将它们推到极限。提醒一下，我们正在检验摆的周期是否取决于振幅角。有些小组发现，10°和20°时的周期可以区分。**教师将主持讨论**，探讨为什么有些小组可能会发现周期可以区分。每个小组都会被分配一种解释来检验。你们将利用剩余的实验课时间设计并开展实验，以检验你们的解释。设计实验时需要考虑的重要事项：

● 要提出令人信服的论证来支持其中一种观点，你需要哪些证据？
● 如果这种效应确实存在，需要达到怎样的精度才能观察到它？
● 你可以对数据进行哪些比较？和上一个活动一样，先提出并测试一个初步计划，然后评估数据，并根据数据找出改进探究的方法。**请在线记录你的实验记录和决策**。改进不一定要对实验进行“大改造”。反复进行比较并改进测量过程，直到你对结果有信心为止。**在你的在线实验记录中**，描述所有迭代，并说明在实验过程中，你关于周期是否取决于振幅的想法如何发生变化或逐步形成，同时提供证据支持你的结论。**实验结束时，目标是有充分把握地解释振幅角是否会影响摆的周期，并以证据支持这一解释**。这也可以包括表明某种解释不正确的证据；与支持某种解释的证据相比，这类证据往往更有说服力。

图2：w　　向学生和教师提供的机制测试活动书面实验指导　　.

相同；

- $1 < t' < 3$：无法得出结论；我们的统计检验力不足，无法判断摆从 10° 和 20° 释放时的周期是相同还是不同；

- $t' > 3$：数据集可以区分，摆从 10° 和 20° 释放时的周期很可能不同。

我们的研究聚焦于实验活动的第二周。学生在课程前半段继续减少上一周的不确定性来源，并比较 10° 和 20°的周期。在许多情况下，学生的精确测量使他们发现了一个差异： 10° 和 20° 的周期测量结果变得可以区分。这一结果与入门教材中通常给出的摆的模型相矛盾，即 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$；该模型认为周期不依赖于释放角。通常，在某个实验班中，至少有一组学生会发现两个角度对应的周期存在显著差异（$t' > 3$）。

在我们研究的这一部分中，一个小组发现了这一差异，助教据此引出后续的“机制测试”活动（约 1 小时），我们将对该活动进行分析（见图 2）。在这项活动中，学生们集思广益并设计实验，以检验可能解释该小组为何观察到这一差异的机制（例如，与测量过程或物理模型本身有关的机制）。例如，一个小组可能会开展实验，以确定这一差异是否是由阻碍摆运动的空气阻力造成的。

A. 实验指导

整个实验室课程的预定流程假设，大多数学生预期实验室活动会确认周期不依赖于振幅，而学生的数据却显示周期依赖于振幅。后续的机制测试活动（图 2）引导学生审视这一与他们预期相冲突的结果。因此，鉴于先前的研究 [5–7, 9–11, 42, 43], , 这些指导说明假设学生以确认框架参与这项活动，且旨在挑战这一框定。例如，指导说明直接指出“有些小组发现，在 10° 和 20° 处的周期可以区分开来”，并要求学生处理这一发现与预期之间的不一致。我们注意到，这可能会带来认识论张力：如果学生在自己的数据中没有看到这一差异，他们可能就没有动力在后续活动中审视其他小组发现的差异。

机制测试活动说明提示学生设计实验，以检验某个给定机制是否能合理解释观察到的差异：“实验室活动结束时的目标是，对振幅角是否会影响摆的周期这一问题形成有证据支持的解释，并对此充满信心。”这些说明让学生做好准备，接受任何实验结果，只要该结果有数据支持。然而，说明还强调，应寻找能够推翻而非证实其指定机制可合理解释角度依赖性的证据：“这也可以包括表明某种解释不正确的证据，而这类证据往往比支持某种解释的证据更有力。”这句话或许反映了说明中存在的一种张力：一方面将实验框定为开放式——

结束，并旨在寻找证伪证据（即能够证伪关于摆的周期为何可能取决于释放角的解释的证据）。

这种张力与认识论能动性有关，因为这些指示既限制了这种能动性，也为其提供支持。尽管大多数课程设计既限制又支持学生能动性，但此处前后不一致的指示可能会引发不同的学生行为。一方面，这些指示通过强调证伪证据而非其他证据，并剥夺学生选择他们认为最适合检验的机制的自由，限制了学生能动性："每个小组都会被分配一种解释来检验。"另一方面，这些指示鼓励学生自行做出实验决策，并反复改进他们的设计："提出并检验初步方案后，请评估你的数据，并根据数据找出改进探究的方法。"同样，这些指示也没有明确说明实验结果 [，例如："确信某种解释能够说明角度的振幅是否影响周期....."（着重号为原文所加）]。

总之，这些指示体现了打破确认框架、支持学生发挥认识论能动性的教学目标。与此同时，指示中的不同部分可能会引导学生形成不同的学生框架，影响他们如何看待自己如何借助实验建构知识。这些指示也可能反映教师的意图，我们将在下文讨论这一点。

B. 教师意图

如前所述，该实验班的教师熟悉物理教育研究以及与教学实验中学生框定相关的文献。他们还拥有多年大学物理教学经验。因此，教师很可能利用这些经验和知识，并结合实验指导，形成了开展该实验教学的意图。

为更好地理解教师意图，第一作者对所分析实验课的助教进行了半结构式虚拟访谈。访谈在所分析的实验课结束数年后进行。虽然助教可能不记得这次具体实验课的细节，但他们很可能还记得更广泛的实验课教学情况。在我们分析的学期之后，这位教师也没有再教授这些实验课的完全线下版本，因此，他们最近一次相关经历就是本研究数据收集所在的学期。

访谈的目标是了解助教是否以及如何有意在机制测试活动中提示学生框定。访谈提纲（见附录）要求助教描述其以往的教学经历、对机制测试活动教学目标的理解，以及在教授该活动时如何关注学生框定。

在访谈中，助教表示，在更广泛地教授这门实验课程时，他们会有意识地关注并引导学生的认识论框架：

> *[学生]* 会想："如果我不该想出正确答案，也不该向你证明我的想法是个好主意，那我到底该做什么？"然后你会以某种方式帮助他们发现自己应该做什么，这相当困难，对吧？ *[要呈现]*一幅连贯一致的图景，让他们明白"我到底该做什么？我应该产出什么？"

助教描述说，学生在这项活动中通常持有一种确认框架：他们一开始就预期要找到并给出一个"正确答案"。因此，在进行这项实验教学时，助教试图通过重新塑造学生对自己"应该做什么"和"应该产出什么"的理解，直接应对这种确认框架，也就是重新塑造他们的认识论框架。

助教还描述说，为了进行这种重塑，他们引入了证伪 这一概念——使用实验来检验一个能够被推翻或证伪的主张：

> 我记得有一处我把它写在了板书上：结合这个模型，对模型进行证伪，找出模型失效的地方。但后来某个时候，我把它概括成了这样一句话："找出实验的哪个部分没有奏效，然后进行修改。"

助教将证伪介绍为一种更广泛的科学实践认识论，既将其作为模型检验的一种方式——试图找出"模型何时以及是否会失效"，而不是展示有限证据来证明模型正确；也将其作为实验设计的一种手段——识别哪些实验选择需要改进。这些意图可能直接源于实验指导，其目标是应对学生想要找到正确实验结果的愿望，并让学生专注于减少实验设计中的不确定性。

我们还在访谈中询问助教，他们希望学生如何在实验室实验中将证伪的理念付诸实践。助教描述说，他们希望学生设计一个能够发现模型局限性的实验，但不一定要证伪模型（省略号表示省略的发言）：

> "有些实验之所以能说明'哦，是的，我们证明了这个理论'，唯一的原因是它本来就有能力证明该理论是错的.....所以，帮自己一个忙，设计一个有能力做到这一点的实验；但这并不意味着你有义务——或者我期待你——去解读数据，仿佛你得眯起眼睛、歪着头，硬是让数据说出它本来没说的东西。"

因此，助教认为实验结果具有开放性：他们希望学生设计一个能够证伪模型的实验，但也希望学生恰当地解读数据，而不是去寻找某个特定的结果。

总而言之，助教利用实验指导、先前的知识和过往的经验，构建了应对学生初始确认预期的意图。他们通过引入一种新的证伪框架来实现这一点，旨在鼓励学生尝试探究某个给定模型或待探究主张的局限性，

（但不一定要找到其局限性），并反复反思和改进自己的实验设计。

IV. 方法

A. 数据收集

我们收集了该实验班在机制测试活动期间的视频和音频数据，因为我们可以从个人的言语、手势和行为中推断其框定方式 [31, 37, 62]。我们在教室的两个对角角落安装了两台壁挂式摄像机，以捕捉该实验班全部七个小组的身体行为。我们还在每张桌子上放置了一台录音机，以清晰录制各实验小组的音频。助教佩戴了一台独立的录音机，因此我们获得了其完整的音轨。为同步录音，我们将助教和各小组的音轨分别与最清晰捕捉到各小组情况的视频录像配对。

B. 分析

与我们先前分析实验课中学生话语的研究类似 [11], ，一位作者完整观看了该场次中七个实验小组的录像，没有暂停，也没有做任何记录。第二次观看时，该作者每隔五分钟做笔记，概述小组的行动。在这些摘要中，他们还记录并部分转录了学生讨论对实验的预期的片段（即存在认识论框架证据的时刻）。所有录像均被完整转录，因为要充分理解和分析这些片段，往往需要结合活动其他部分的背景。

随后，第一作者和第二作者选取了视频中的短片段，这些片段被他们认定为与学生认识论框架相关的重要时刻，并将其带入研究团队的大组讨论。在讨论中，我们探讨了学生和教师的认识论框架，以及学生话语中其他引起我们注意的方面。研究团队从这些事件中通过归纳和反复迭代，整理出一系列学生言语和行为的类别。我们将这些类别与特定的学生认识论框架联系起来（见图 3），并依据我们的理论框架，根据学生的实验预测和认识论能动性对这些框架进行分类（见图 1）。

确定这些认知框架后，第一作者和第二作者分别对每个实验小组的视频进行编码，包括学生的框定，以及助教与小组互动时的框定；编码范围从小组开始讨论活动时起，直到他们离开房间为止。视频依据认识论框架清单，按照交流事件进行编码：即对话主题和总体活动保持不变的部分 [63, 64]。当学生的活动似乎与某个特定框架无关，或两位作者都无法确定某个框架时，这些片段被标记为“unclear”（不明确）。这些片段通常出现在学生开始或转换活动、且没有足够证据表明其采用了某种特定框定方式时。教师向学生介绍可用设备、在学生离开时于活动结束后进行回顾，以及参与无关话题讨论的片段，则被标记为“not related to framing”（与框定无关）。完成初步编码后，两位作者会面讨论了所有视频，并就编码结果达成一致。

由于小组成员大多通过言语和非言语方式传达认知框架， [23], 我们通常为整个学生小组编码一个框架。有一例中，我们发现证据表明，同一小组的两名成员始终持有不同的框架，这与相关文献的描述一致：认识论框架既可能体现在个人的行动和行为中，也可能体现在小组的行动和行为中 [37]。因此，我们将此例编码为两个不同的框架。

我们还识别并对助教与学生互动发生前、进行中和结束后的时刻进行了更详细的互动分析 [64, 65] 。下文呈现我们的编码结果，展示学生和教师认知框架以及互动分析中的总体模式。

V. 结果

如授课教师访谈中所述（见 IIIB 节），助教向全班介绍证伪。在机制测试活动开始时，教师在黑板上列出可能解释周期为何取决于释放角的机制，并说明作业：

> “好，那么现在我要做的是，你们每个人都要研究其中不同的一项。你们要想想，这些选项中哪些是可以量化和检验的。再说一次，‘可检验’的另一个说法是‘可证伪’。没错，所以你们不是要证明——而且你们也不是要证明这个方程是正确的。你们要找出它在哪些情况下会失效。研究一件事的唯一方法，就是试着证明它是错的。因此，在设计实验时，不要试图证明你选的那一项为什么是正确的，而应该试着证伪它。”

这一说法试图直接应对学生的确认式框定：助教将“证明”待检验主张正确与“找出它何处不成立”作了对比。这里被检验的主张是，某种机制能够解释为什么其中一个小组观察到摆的周期取决于振幅。助教还明确提示学生尝试证明这一主张是错误的（例如：“你不应该试图证明你选的那个解释是正确的，而应该尝试证伪它。”）。

在以下各节中，我们将描述学生在这一证伪提议之后的认识论框架，以及教师在活动期间与各实验小组互动时的行为。

	较低的认识论能动性 学生进行实验，但不构建知识	**较高的认识论能动性** 学生利用自己的实验构建知识
Prediction Having a particular result in mind	**低能动性—证伪：** 预期证伪一个主张，且不愿意修正这一结果 **低能动性—确证：** 预期证明一个主张，且不愿意修正这一结果 观察到的行为： ● 设计实验以寻找预期结果 ● 用主观判断回应数据或结果 ● 篡改数据或不确定性数值 ● 朝着期望的结果弱化结论	**高能动性—证伪：** 预期证伪某项主张，但愿意修正这一结果 **高能动性—确认：** 预期证实某项主张，但愿意修正这一结果 观察到的行为： ● 设计能够检验该主张的实验 ● 针对数据或结果提出问题 ● 通过迭代探索实验结果 ● 得出有数据支持的结论
No prediction Not having a particular result in mind	**障碍：** 预期报告任何结果以满足 task 观察到的行为： ● 设计能够得出结果的实验 ● 对任务的负面情绪 ● 力求满足任务要求 ● 几乎没有讨论或完全没有讨论地得出结论	**发现：** 预期检验一个研究问题，并且愿意考虑多种结果 观察到的行为： ● 设计能够检验该主张的实验 假设的行为： ● 对数据或结果提出疑问 ● 通过迭代探索实验结果 ● 得出有数据支持的结论

图3：根据视频分析识别出的学生认识论框架的定义及相应的观察到的行为。根据我们的理论框架（见图1），这些框架沿预测和认识论能动性两个维度呈现。学生很少处于发现框架中（见图4），因此我们没有观察到许多与该框架相对应的行为。相反，我们根据对高能动性—确认和高能动性—证伪框架的观察，提出了假设的 行为。

A. 学生认识论框架

我们识别出六种不同的认识论框架（图3），并观察到各实验小组在整个活动过程中对这些认识论框架的采用和切换方式各不相同（图4）。在此，我们将介绍这些框架以及学生框定的总体趋势。

基于我们的理论框架（见图1），我们从两个维度界定学生的认识论框架（图3）：学生是否对实验结果有所预测，以及学生在多大程度上发挥认识论能动性、从实验中建构知识。我们还区分预测本身，即预测是确认还是证伪。

对实验持有预测的学生（即口头表达了证伪或确认其机制的预期），但几乎没有或完全没有认识论能动性，会采用**低能动性—证伪** 框架或**低能动性—确认** 框架。处于这两种框架之一的学生不会尝试建构知识，而是设计一个能得出预期结果的实验，并可能操纵数据或不确定性数值，使结果朝着自己的预测靠拢。低能动性—确认框架中的一个小组（E组）就将实验目的表述为：“重点就是我们应该把数据弄得好看些，好得出肯定的结论。”处于这两种框架之一的学生还会谨慎措辞，使其结论更贴近自己的预测。例如，低能动性—证伪框架中的一个小组（B组）讨论该得出什么结论时说：“好吧，那我们就说‘可能不会’，因为我们是在试图证伪它，对吧？”

相比之下，对实验有预测并表现出更强认识论能动性的学生，会采用**高能动性—证伪**框架或**高能动性—确认框架**。处于这两种框架之一的学生会利用实验来建构知识：他们设计能够检验其机制是否解释所观察到的摆的角度依赖性这一主张的实验，但也注意到可能出现不同的结果，并通过提问来回应其数据或结果。例如，处于高能动性—确认框架的一个小组（B组）预期能够确认待检验主张，但仍对其他结果持开放态度，而这些结果将由其统计分析决定。一名小组成员指出：“所以，在我们进行这些试验之后，我们要如何证明它会影响这种依赖性？……好吧，所以如果 t' 很小，那么它就不会产生影响，但如果它很大，它就会

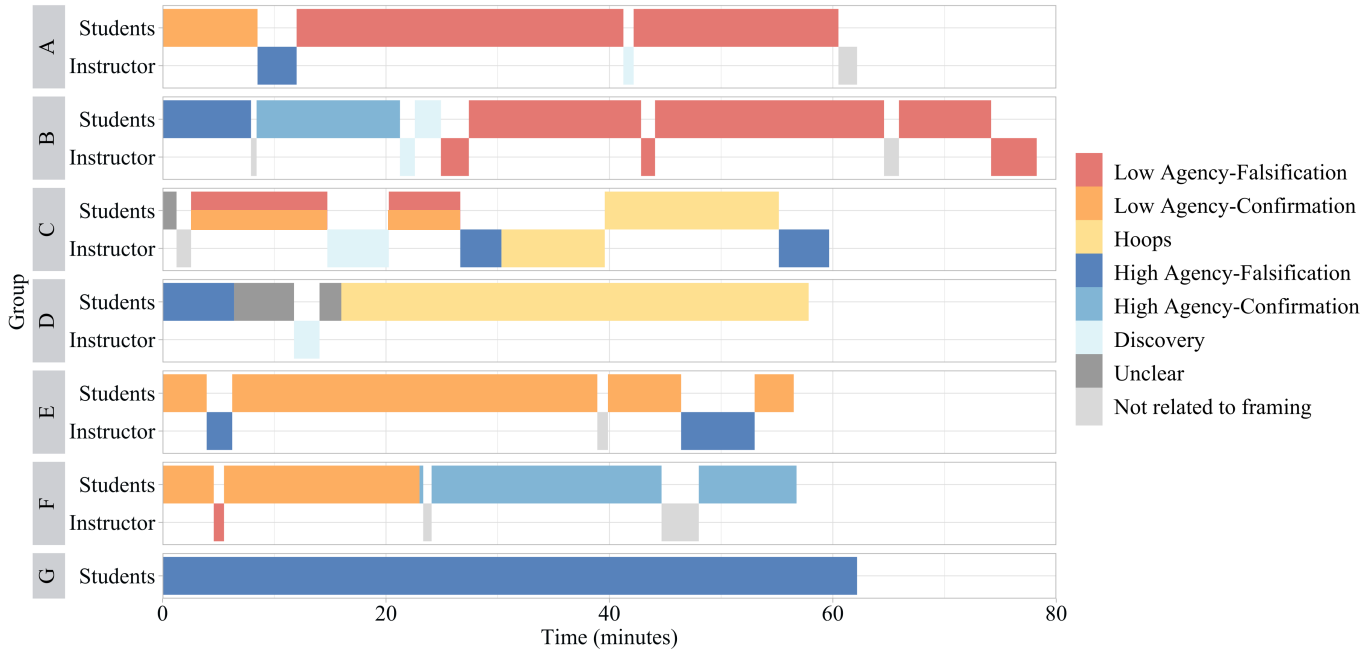


图4：时间线图，展示机制测试活动期间学生和教师的框定（定义见图3）随时间的变化。两种颜色同时出现（即 C 组）表示同一小组中的个别学生处于不同的认知框架中。每个小组的起始时间（0 分钟标记）对应于他们开始讨论活动的时间，结束时间则对应于小组完成活动并离开房间的时间（因此，各小组所用时间长短不同，教师互动看起来也有所重叠）。

产生影响。”处于这些框架中的学生的另一种常见行为，是根据数据所支持的情况得出恰当的结论，而不是为了迎合自己的预测而对结果含糊其辞。例如，处于高能动性—证伪框架的一个学生（G组）根据其证伪该主张的预期来解释数据：“我的意思是，比如说，*20*度的数据在某种程度上证伪了那个主张，但*10*度的数据让它显得有点……”

其他小组没有口头表达对其实验结果的预测（图3底行）。没有预测且表现出较少认识论能动性的学生会采用**障碍**框定，这与先前文献中指出的情况类似 [11]。这些学生表示希望尽快完成实验室实验，并且常常对该活动表现出负面情绪。处于障碍框定中的学生还会设计一个无论产生什么结果都可以的实验（即，他们不受预测的限制）。例如，一个小组（C 组）没有花太多时间设计实验，而是把实验视为一项需要完成的作业：“我们就随便记几个数字吧。”

另一方面，没有预测且展现出较强认识论能动性的学生，会采用**发现** 框架。处于这一框架中的学生对实验结果没有预期，并会设计适当的实验来检验主张，同时对多种可能的结果持开放态度。例如，发现框架中的一个小组（B组）将他们的目标概述为回答一个开放式研究问题：“所以我们想看看张力是否会让角度变得重要。”

汇总所有小组的框定轨迹（图4）后可以看出，学生约有三分之一的活动时间处于低能动性—证伪框架中（红色条表示学生框架，分布于A、B、C组）。总体而言，学生也有约五分之一的时间处于高能动性—证伪框定中（深蓝色条表示学生框架，分布于B、D、G组）。这两种框架的普遍存在表明，教师最初对证伪的阐述确实影响了学生的框定，尤其是对实验预测的理解：在约一半的实验活动时间里，学生都处于预期能够证伪待检验主张的框架中；七个小组中有五个曾在活动的某个阶段呈现这两种框架之一。

总体而言，学生在低能动性—证伪或低能动性—确认框架中度过的时间也约占活动的一半（红色和橙色条形代表学生框架，分布于七个小组中的五个，除D组和G组外），明确地寻求证伪或确认待检验主张。考虑到相关文献指出确认框架在学期初尤其占主导地位，这并不令人意外 [7–11], ，但这与实验室的目标以及教师在证伪陈述中引导学生关注更开放式结果的提示背道而驰。同样，有两个小组超过三分之一的时间处于Hoops框定之中（黄色条形代表C组和D组的学生框架），他们预期无论数据表明什么都将据此得出结论，以完成作业。尽管根据研究文献 [11], ，这同样不足为奇，但也与实验室的目标背道而驰。

在所有小组中，学生处于与更强认识能动性相关的三种认知框架之一的总时间占比较低，约为三分之一（三种深浅不同的蓝色

色条表示学生在 B、D、F 和 G 组中的认知框架分布）。这些认知框架仅在七个实验小组中的两个占主导地位（F 组和 G 组）。

B. 教师行为

此处，我们概述教师在活动期间与各个学生小组互动时的框定总体趋势，如图4中“教师”行所示。在下一节中，我们将呈现互动分析的结果。

我们观察到，助教花在与小组讨论如何框定活动上的时间，多于花在活动其他方面的时间（图4中教师框架的彩色条与灰色条）。助教还主要（约占其与学生互动总时间的40%）尝试引导学生进入高能动性—证伪框定（图4中教师框架的深蓝色条），旨在让学生尝试证伪指定机制，同时对数据所支持的其他结果持开放态度。这与助教在教师访谈中所述的意图一致（见IIIB 节）。同样，助教约有五分之一与各个小组互动的时间用于提示发现框架（图4中教师框架的浅蓝色条）。

不过，助教也试图在少数互动中提示学生采用低能动性—证伪框架（图4中教师认知框架的红色条形，合计约占五分之一的时间），向学生暗示证伪是他们应当找到的实验结果。加上前文提到的用于提示高能动性—证伪框架的时间，助教大约有60%的互动时间都在试图让学生转入证伪导向框架（图4中教师认知框架的深蓝色和红色条形之和）。助教从未提示学生采用低能动性—确证或高能动性—确认框架（图4中教师认知框架里没有橙色或中蓝色条形），这与其意图一致：挑战学生关于确认待检验主张的预期（即某种机制能够解释所观察到的角度依赖性）。

令人意外的是，尽管 Hoops 框定与实验室的目标相矛盾，助教仍引导 C 组采用 Hoops 框定（图4中教师框定的黄色条）。在这种情况下，该小组正在检验的机制是小角度近似是否失效。也就是说，他们的作业是检验：摆从 10° 和 20° 释放时观察到的摆的周期差异，是否归因于小角度近似在这些角度下不再成立（小角度近似用于推导摆周期的标准表达式）。一名小组成员表示希望确认这一机制成立，而另一名小组成员则想要证明这一机制不成立，即将其证伪（图4中学生框定的红色和橙色条同时出现）。在协商这一框架错位的过程中，该小组迟迟无法设计出实验，直到课程后段才完成（活动开始40多分钟后，他们才开始收集数据），并明显表现出对活动的沮丧。为确保小组在下课前有实验可以汇报，助教对他们说：“你们其实不必成功。只要做一个实验，考察你们正在研究的假设所产生的预测.....在我们现在所处的情境下，这就足够了。”

1. 由教师提示的学生框架转变

除G组外，所有实验小组在活动过程中都会采用不止一种认识论框架，因此会在不同框架之间发生转换。下面我们将介绍两个学生框架转变的案例，这些转变受到学生与教师之间互动的影响。

尽管 A 组和 B 组以不同的框架开始这项活动，并从教师那里收到指向不同框架的提示，但两组大部分时间都处于低能动性—证伪框架中（图4中代表学生框架的红色条形）。正如我们将要展示的，助教回应两组时都仿佛他们处于确认框架中，并试图通过提示高能动性—证伪框架（A组）或低能动性—证伪框架（B组）来应对这一框架。这些助教的做法符合他们在教师访谈中阐明的意图；然而，结果是，两组都没有将活动框定为一个建构知识的过程：两组都转向了低能动性—证伪框架。

A组 – Alex、Mike 和 Faru – 最初处于低能动性—确认框架中（图4中代表学生框架的橙色条形），他们希望通过实验表明，他们的机制——摆锤摆动的三维运动（而非摆锤在一个平面内摆动）——是对所观察到的角度依赖性的正确解释。Alex 提出了一种实验设计：

> **Alex**： 我觉得这个想法是，如果有三维运动， *10°* 和 *20°* 可以区分；没有三维运动时，它们就无法区分。那么我们就可以——这样就能表明这就是来源，对吗？
> **Faru**： 是啊。

Alex建议小组在摆锤的运动轨迹中加入更多三维运动，并再次比较 10°和 20°的周期。如果他们发现这两种情况下的周期不同，Alex表示，他们就可以“证明这就是角度依赖性的来源”。换句话说，小组有意设计实验来得出他们预期的结果。

当小组向助教提出这个想法时，助教试图提示他们采用高能动性—证伪框定，以此回应他们想要确认结果的意图（图4中代表教师框定的深蓝色条）：

> **助教**： 很难证明这是 *[3D* 运动*],*，所以你也可以证明它不是。**Alex**： 是的，没错。**Mike**： [听不清]
> **Alex**： 我想是吧。**助教**：要证明它不是容易得多。
> **Alex**： 要证明它不是误差来源，容易得多。**助教**：是的。**Alex**： 所以基本上，这意味着两种情况下都可以区分 *10°* ，而且 *20°* 也都可以区分，

与角度相关的误差在两种情况下都存在。

助教：我给你一个提示。你不一定非得在不同的角度下进行检查。对，那个假设——三维运动假设认为，在理想情况下不存在角度依赖性；但增大角度也往往会加剧这种 *[*非线性*]*运动，而你认为自己观察到的角度依赖性，其实只是圆周运动的依赖性。因此，试着测量圆周运动对周期的影响，看看它是否无法解释我们之前观察到的角度依赖性程度。

Alex：对，我想你可以用 *10°*来检验这一点，看看周期是否会随着 *10°* 而变化；如果会，那就说明有证据表明

助教：是的，如果你只在 *10°*下进行实验，就在相同角度下测试了几个条件，但其中有些因素与三维运动有关。对，你可以通过几种方式来做，也可以把它消除，看看会发生什么，对吧？

Alex：太棒了，好。[助教离开桌子]我确实有个想法，所以 [听不清]三维运动 [助教返回]

助教：不过再说一次，你是否最终证明自己是对的，并不会影响你的成绩。评分会看你为结论所作的论证是否充分，也会看你在过程中是否使用了恰当的统计方法，等等。

在这段互动中，助教尝试通过几种方式引导学生进入高能动性—证伪框定。首先，助教指出，证伪一个论断比证明它正确更容易（例如：“要证明它是三维运动更难 [3三维运动], , 所以你也可以证明它不是。”）。助教还直接建议学生设计一个能够证伪该论断的实验（例如：“你甚至不一定非要从不同角度进行检查。”），并表示他们不必找到某个特定结果（例如：“看看会发生什么。”）。最后，助教指出，他们的成绩并不取决于实验结果本身（例如：“你是否最终证明自己是对的，并不会影响你的成绩。”）。总的来说，这些做法旨在引导学生进入高能动性—证伪框定；在这种框定下，学生可能会预期找到证伪证据，但最终会依据数据得出恰当的结论。

与助教进行这番互动后，小组转而采用低能动性—证伪框架（图4中代表学生框架的红条）。学生们认为，助教的建议意味着他们应该做一个实验，结果应表明他们的机制无法解释角度依赖性（即证伪待检验主张）。他们按照助教的建议进行实验（即比较从 10° 释放时，有无额外三维运动的周期），并讨论刚得到的数据：

Alex：我们试着证伪这个假设。好，准备好了吗？ [放开摆]**Faru**：嗯。*1.27***Alex**：啊，不错，这挺好的。**Mike**：我们得证伪这个假设。**Alex**：嗯？**Mike**：这要怎么证伪它？

Alex：基本上就是说，这不是误差来源，不是差异来源，也不是额外的 [听不清]

Mike：因为现在看来，我们没法证伪它。

在收集周期测量数据时，小组对数据作出了主观反应（例如，“不错。”），Mike则担心他们无法得到自己想要的证伪结果（例如，“因为现在看来，我们没法证伪它。”）。这些评论体现出该小组的目标是找到他们认为助教希望他们找到的结果，并且他们仍然不愿接受其他可能的结果。

总结A组的历程：助教发现学生最初处于确认框架后，试图引导他们转向高能动性—证伪框定。这一互动使小组从期待确认性结果转为期待证伪性结果，但并未使小组从低认识论能动性转向高认识论能动性（该小组转向了低能动性—证伪框架）。

B组– Sarah、Alina 和 Carlos – 测试摆锤细绳中的张力是否能解释摆的周期所呈现的角度依赖性（例如，某个角度的张力是否可能比另一个角度更大）。活动开始约十分钟后，该小组处于高能动性—确认框架（图4中表示学生框架的中蓝色条）。他们决定比较摆锤从10° 和 20° 释放时的周期，此次实验使用比上一次更重的摆锤球，并讨论他们对结果的预期：

Sarah：所以，嗯，我的想法基本上是，我们可以做 *5*次或*10*次，你们觉得呢？比如，用砝码做*5*次或*10*次试验，然后不加砝码再单独做*10*次试验。那我们要怎么证明这会影响角度依赖性呢？**Alina**：你刚才说什么？**Sarah**：我是说，做完这些试验后，我们要怎么证明这会影响依赖性？**Alina**：呃，如果**Sarah**：可区分性？**Alina**：对。**Sarah**：好，所以如果 *t’* 很小，那它就不会产生影响；但如果很大，就会有影响。

这段对话中的一些证据表明，小组想要证明他们的机制是正确的（例如：“我们要怎样证明这会影响角度依赖性？”）。此外，也有证据表明，他们会根据统计结果对其他可能的结果持开放态度（例如：“所以，如果 t’ 很小，它就不会产生影响；但如果它很大，就会产生影响。”）。这两条证据表明，该小组处于高能动性—确认框架，因为他们对实验有一个确认性预测，但似乎也愿意得出有数据支持的结论。

小组收集了数据，并与助教进行了简短交流。在本次课程前一部分中，他们没有观察到角度依赖性，因此询问助教接下来该如何进行：

Alina：我们的 *t’* 确实很小，所以我们就想，下一部分需要用别人的数据吗？

助教：如果你们从来没有——对，你们的 *t'* 确实很小，所以很难有把握地判断效应量有多大，对吧？你们可以看看均值差，大致估算一下，对吧？但你们始终没能确认它是否可区分，所以很难说："哦，我们在 *10°*和 *20°* 发现的均值差就是角度依赖性的效应量。"嗯，你们明白我的意思吗？所以，你们可以使用他们的数据，可以这样说："其他人得到了很好的 *t'*，发现角度依赖性大约有这么大，所以我们想看看我们正在研究的效应能否解释这种大小的角度依赖性。"

这里，助教试图引导学生进入发现框架（图4中代表教师框架的浅蓝色条）：助教澄清了小组正在探究的主张，但没有暗示学生应该得到某个特定结果。相反，助教似乎鼓励小组考虑多种可能的结果（例如："我们想看看我们正在研究的效应是否能解释这一点，也就是那么大的角度依赖性。"）。

这段互动确实使小组转入发现框架（图4中代表学生框架的浅蓝色条），在这一框架下，他们恰当地陈述了正在检验的主张，并表示将进行实验、找出统计结果并据此进行解释（但没有口头表达某个特定的预测）：

Alina：对，我刚才正想说这个，我在想，我们是不是只需要看看，好吧，所以我们要看看张力是否会让角度产生影响，比如质量越大是否意味着——我们是不是只需要针对这两组数据做 *t'* 检验，像这样 [指向较重的摆锤球]，然后看看它是否显著，也就是比增加质量之前的 *t'* 更大？

不过，这一框定只是短暂的，因为该小组很快又与助教展开了另一轮互动，在互动中，助教提示了低能动性—证伪框架（图4中代表教师框架的红条）：

Alina：好的，所以我们只是想知道，用测试张力的方式来验证我们这样想是否合理。也就是说，我们增加了额外的质量，并在*10°* 和 *20°*处进行了测试。

助教：为什么是 *10°* 和 *20°*？

Alina：我当时想，也许我们可以比较有额外质量时这两个角度之间的 *t'*。

助教：可以，但这里的意思是，在 *20°* 度时，张力增加会导致*10°* 和 *20°* 之间产生角度依赖性，对吧？那么，增加质量将如何改变角度依赖性？

Alina：更大的张力。

助教：但是，你增大了*10°* 和 *20°*之间的张力差异吗？

Alina：没有。

助教：我是在问，我也不知道.....记住，你不必证明张力是来源，你只需要证伪张力不是来源。

Alina：好的。**助教**：要证伪它，比试图支持它容易得多，对吧？**Alina**：好的。

助教：如果你这样想，你会说，假设是 *10°*和 *20°* 之间的周期存在差异，主要是因为 *10°* 和 *20°*处的张力存在差异，那么你肯定可以通过一些方式来说明："张力差异并不一定会导致周期差异达到我们在不同角度下所观察到的程度。"所以，如果你记住这一点——你是在努力证伪它——这就会变成一项容易得多的任务。

听到该小组的实验设计后，助教采取了与A组展示其验证性实验设计时（如上所述）类似的做法。例如，助教提出建议，引导该小组调整其实验设计（例如，"为什么是 10° 和 20°？"），并提到证伪一个论断比证实一个论断更容易（例如，"证伪它比试图支持它容易得多"）。然而，与A组不同的是，助教向B组建议，证伪是正确的或预期的结果（例如，"你不必证明张力是来源，你只需要证明它不是"），因此提示了"低能动性—证伪"框架。在这次互动之后，B组采纳了教师的提示，并在活动的其余时间里保持在"低能动性—证伪"框架中（图4中学生框架的红色条带），我们在先前的工作 [48]中对此进行了详细说明。

总之，尽管B组在与助教互动之前采用了发现框架，且没有向助教表达任何对确认的预期，助教仍通过与对A组类似的方式，引导B组进入低能动性—证伪框架。与A组类似，这些助教的做法促使B组转向低能动性—证伪框架。

VI. 讨论

我们对一节非传统实验课进行了视频分析，以识别学生如何从认识论角度框定活动，以及教师如何引导学生进行框定。在接下来的章节中，我们将视频分析中识别出的认识论框架，与我们的理论框架以及研究文献中描述的学生框架联系起来。随后，我们综合总结教师引导的学生框架转变相关发现。

A. 非传统实验课中认识论框架的更多实例

我们运用理论框架（见图1），根据学生对实验预测的参与程度和认识论能动性来描述认识论框架。我们确定了六种不同的认识论框架，这些框架由两个维度界定：学生是否对实验结果持有预测，以及学生发挥认识论能动性的程度（见图3）。这些框架还区分了旨在确认（证明某项主张为真）和证伪（推翻某项主张或证明其为假）的预测。

所识别出的认知框架在以往研究的基础上进一步拓展，为确认框架和

此前在非传统实验室教学中观察到的 hoops 框架提供了更细致的定义，并将这些框架映射到我们的理论框架 [5–10]上。具体而言，我们进一步区分了这两种低能动性框架：学生可能有实验预测（确认框架），也可能没有（Hoops框定）；此外，我们还识别出能够区分这些框架的学生行为（见图3）。例如，阐述了预测且表现出较低认识论能动性的学生（低能动性—证伪或低能动性—确认框架）会谨慎地将结论导向其预测的结果；而未阐述预测且表现出较低认识论能动性的学生（Hoops框定）则几乎不作讨论便得出结论。

我们此前关于非传统实验课中框定方式的研究 [例如，10, 11] 重点关注理解确认框架和 Hoops 框架，因为处于这些框架中的学生往往不会参与预期的科学实践 [11]。然而，我们的视频证据证实，还存在另外三种确实体现学生参与预期科学实践的框架。处于这三种新框架——高能动性—证伪、高能动性—确认和发现——中的学生会运用认识论能动性来建构知识，而不论他们最初是否提出了对结果的预测。我们观察到，处于这些框架中的学生会设计能够检验待检验主张的实验，在面对数据或结果时提出问题，并反复改进实验设计。

我们还发现，正如先前文献所指出的那样，提出实验结果预测的学生并不一定会采用低能动性框架（尤其是确认框架） [10, 11]。例如，我们观察到，学生先口头提出预测，随后在新的实验依据面前运用认识论能动性来修正预测（例如，F 组）。此外，另一项研究也表明，确认框定也可能有助于学生进行意义建构：当数据与预测不符时，学生能够有效地排查实验和模型中的问题 [44]。

总之，我们的证据证实了以往研究的观点：为了让学生能够有效地参与科学实践，应支持他们的认识论能动性 [4, 45, 46]。我们还补充了有关学生的认识论能动性与他们如何框定活动之间关系的观点。我们发现，学生的有效参与（由图 3 所列的观察行为所证实）并不取决于他们是否阐述了对实验结果的预测。因此，为了改变学生总体的认识论框架，人们或许会认为，教师应致力于改变学生的认识论能动性，而非他们的实验预测。我们对本研究中助教的分析支持这一推论，接下来将对此展开讨论。

B. 教师在诱导学生框定中的作用

我们数据中的实验课教师主要关注学生的实验预测，旨在通过引入证伪这一概念，使学生摆脱确认框架：实验应当寻求证伪一项主张，而不是试图证明其为真（见 IIIB 节）。教师的这些线索使七个小组中的五个采用了某种形式的证伪框定，而只有一个小组在整个活动过程中始终处于低能动性—确证框架中（E组）。所呈现的事件也构成了支持性证据，表明实验课教师的响应式教学 [57]有可能改变学生框架。响应式教学 [66–69]包括了解个别学生对活动的预期，判断这种框定是否以及如何与实验室的目标一致，并据此稳定或改变这种框定。例如，对于一个小组（A组），教师听到学生设计了一项确认性实验，随后采取了一些策略，试图将他们转向新的框架（即引入证伪的概念），而他们的预测也从确认转向了证伪。教师实时有意改变学生框架的这种能力，先前已在物理问题求解情境中 [14–17], 得到证实，但在实验课中尚未得到证实 [11]，而我们在此观察到了这一点。

然而，如果教师的提示未能回应学生当前的认知框架，那么这些提示在改变学生框架方面的效果就较差。这些提示往往试图让学生不再期待确认性结果，无论他们是否处于与确认相关的框架中。例如，尽管B组最初处于发现框架，教师仍以他们处于确认框架的方式与其互动。教师提出转向证伪后，该小组便转而倾向于证伪，认识论能动性也有所降低。

根据对教师的访谈，我们推测，教师的意图和行为可能混淆了实验预测在学生认知框架中的作用与学生的认识论能动性。我们从教师试图应对认识论能动性较低的情况时看到了这一点（即避免学生只寻求确认已有知识，而不是生成新知识）：这些尝试导致学生的实验预测发生变化（在确认、证伪或不作预测之间变化），但学生的认识论能动性几乎没有变化，甚至有所降低。反过来的情况也同样存在：试图让学生不再专注于某个特定预测（尤其是确认性预测），结果却使学生的认识论能动性发生了变化。例如，在两个实验小组（A组和B组）中，教师对他们的实验设计提供了大量指导，并引导他们减少认识论能动性（例如，告诉学生要完成作业“必须做什么”），以期让他们不再受特定实验预测的束缚。这些做法如预期般使学生转向证伪，但也使他们转入低能动性的认知框架。在这种情况下，教师也试图在支持学生对实验探究的能动性（即“科学”不确定性）与降低学生对作业本身的能动性（即“学生”不确定性）之间取得平衡 [70]。这里的证据揭示了在构建和支持多种形式的学生能动性时，同时关注学生框定所面临的张力。另一种可能是，这些证据表明，相比于响应教师引导其改变认识论能动性的要求，学生更容易响应教师引导其改变预测的要求。

尽管我们将分析重点放在教师的作用上——

此外，实验指导也很可能影响了学生的认识论框架和教师行为（图 1）。正如我们先前所指出的，实验指导所引导的活动着重于考察数据中的差异，无论这种差异是否在学生的数据中显而易见。在我们分析的视频数据中，唯一在活动早期就自行发现差异的小组，也是整个活动过程中唯一采取高能动性框架的小组（G组）。相比之下，另一个小组（B组）在活动开始时多次转换认知框架：他们的数据并未显示出角度依赖性，而且该小组也不理解机制测试活动在其整体知识建构过程中的作用。教师也依据实验指导形成了自己的意图（即引入证伪），并同样试图对抗确认框架，即使学生处于不同的框架中也是如此。未来的研究应进一步探讨实验指导影响学生框定和教师行为的方式，以及静态的实验指导如何关注并响应学生框定。

总体而言，这些结果揭示了助教、教师和课程开发者在非传统实验课中转换学生框架时面临的诸多挑战。与许多教学实验一样，在这些视频数据中，助教与每个小组相处的时间有限，同时还要满足七个各自开展探究的实验小组的需求。尽管面临这些挑战及其他困难，教师仍关注学生框定；在许多情况下，引导框架转换的提示都取得了成效（例如，从确认转向证伪的小组数量）。

七、结论

我们对学期初的一次非传统实验课进行了视频分析，以识别学生的认识论框架，并确定教师在引导学生在这些框架之间转换时所起的作用。在这一情境中，我们沿两个维度界定并区分了六种认识论框架：学生是否对实验结果作出预测，以及学生在多大程度上展现认识论能动性。结果表明，关注学生能动性，可能比关注学生的实验预测更能促使他们积极参与科学实践。我们对教师与各实验小组互动的分析也表明，教师若高度聚焦于框架转换，其提示可能会奏效；但若未能回应学生当前的框定，则可能无效（或导致非预期的框架转换）。本研究阐明了学生认识论框架的复杂性，以及教师尝试改变这些框架时面临的挑战，说明未来研究有必要对其他非传统实验情境开展类似分析。

致谢

本研究得到美国国家科学基金会研究生研究奖学金计划项目（DGE-2139899）和美国国家科学基金会项目（DUE-2000739）的资助。此外，AMP 还获得了 Research Corporation for Science Advancement 提供的 Cotrell 博士后奖学金资助。我们也感谢合作者 Ian Descamps 和 Sophia Jeon 的支持。

八、附录

A. 教师访谈协议

1. 您此前的教学经历如何？包括在康奈尔大学任教之前和之后的经历。
   (a) 您教过这些实验课多少次?
2. 总体而言，您觉得教授这些实验课的经历如何?
   (a) 您喜欢哪些方面？(b) 遇到了哪些挑战?
3. 您如何理解摆实验的学习目标?
   (a) 您如何理解机制测试活动的学习目标？(b) 您是如何开展这项活动的教学的?
4. 在此语境中，你所说的证伪是什么意思？(a) 你为什么会采用证伪这一理念?

[1] N. G. Holmes 和 Carl E. Wieman。入门物理实验：我们可以做得更好。*Physics Today*，71:1–38，2018年。[2] Emily M. Smith 和 Natasha G. Holmes。教学实验课的最佳实践。*Nature Physics*，17(6):662–663，2021年。[3] Natasha G. Holmes、Carl E. Wieman 和 Doug A. Bonn。批判性思维教学。*Proceedings of the National Academy of Sciences*，112(36):11199–11204，2015年。[4] Benjamin M. Zwickl、Dehui Hu、Noah Finkelstein 和 H. J. Lewandowski。物理实验室中的基于模型的推理：框架与初步结果。*Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*，11:020113，2015年9月。[5] Dehui Hu、Benjamin M. Zwickl、Bethany R. Wilcox 和 Heather J. Lewandowski. 关于学生实验物理观的定性研究。《物理评论：物理教育研究》，13(2):020134，2017年。[6] Dehui Hu 和 Benjamin M. Zwickl. 考察学生对实验有效性的看法：从入门阶段到博士生。《物理评论：物理教育研究》，14(1):010121，2018年。[7] Emily M. Smith、Martin M. Stein 和 N. G. Holmes. 惊喜！引导学生摆脱物理实验室中的模型验证框架。载于 A. Traxler、Y. Cao 和 S. Wolf 编，《style id='7'>2018年物理教育研究会议论文集，华盛顿特区，2018年。

[8] Emily M. Smith 和 N. G. Holmes. “我们就假装一下”：学生在内容强化实验室中的认知框架转变。载于 S. Wolf、M. B. Bennett 和 B. W. Frank 编，《style id='2'>2020年物理教育研究会议论文集，虚拟，2018年。[9] Martin M. Stein、Emily M. Smith 和 N. G. Holmes. 确认已知之事：理解物理导论实验室中存疑的研究实践。载于 A. Traxler、Y. Cao 和 S. Wolf 编，《style id='5'>2018年物理教育研究会议论文集，华盛顿特区，2018年。[10] Emily M. Smith、Martin M. Stein 和 N. G. Holmes. 确认预期如何影响学生在入门实验室中的实验决策。《物理评论：物理教育研究》，16(1):010113，2020年。[11] Anna McLean Phillips、Meagan Sundstrom、David G. Wu 和 N. G. Holmes. 未能投入实验室中的问题：学生如何应对相互矛盾的数据和模型。《物理评论：物理教育研究》，17:020112，2021年。[12] Natasha Holmes 和 Doug Bonn. 是在做科学，还是在做实验？在物理实验室实验中引导学生参与科学推理。载于 P. V. Engelhardt、A. D. Churukian 和 D. L. Jones 编，《style id='14'>2013年物理教育研究会议论文集，俄勒冈州波特兰，2013年。[13] Abigail M. Bogdan 和 Andrew F. Heckler. 信念偏差对学生依据数据表进行推理的影响。载于 P. V. Engelhardt、A. D. Churukian 和 D. L. Jones 编，《style id='17'>2013年物理教育研究会议论文集，俄勒冈州波特兰，第73–76页，2013年。[14] Bahar Modir、John D. Thompson 和 Eleanor C. Sayre. 学生在量子力学问题求解中的认识论框架。《物理评论：物理教育研究》，13(2):020108，2017年。[15] Paul W. Irving、Mathew Sandy Martinuk 和 Eleanor C. Sayre. 学生认识论框架沿两个维度的转变。《物理评论专题：物理教育研究》，9(1):010111，2013年。[16] John D. Thompson、B. Modir 和 E. C. Sayre. 算法思维、概念思维和物理思维：理解学生在量子力学学习中困难的框架。载于《style id='26'>2016年国际学习科学会议论文集，2016年。[17] Deepa N. Chari、Hai D. Nguyen、Dean A. Zollman 和 Eleanor C. Sayre. 高年级物理课程中的学生框定与教师框定。《美国物理学杂志》，87(11):875–884，2019年。[18] 卡尔·波普尔。《style id='32'>《一切生命都是问题解决》。Routledge，纽约州纽约市，1999年。[19] Kevin G. Helfenbein 和 Rob DeSalle. 证伪与佐证：卡尔·波普尔对系统学的影响。《分子系统发育与进化》，35(1):271–280，2005年。[20] James Ladyman.《style id='38'>理解科学哲学。Rout-ledge，2012年。[21] Darrell P. Rowbottom. 库恩与波普尔关于科学中的批判与教条主义之争：一种群体层面的解决方案。《科学史与科学哲学研究 *A*辑》，42 124，2011 1 117( ): – 。[22] 欧文·戈夫曼。《style id='44'>框架分析：经验组织论。哈佛大学出版社，英格兰剑桥，1974年。[23] Deborah Tannen。《style id='47'>《话语中的框架》。牛津大学出版社，英国牛津，1993年。[24] Deborah Tannen 和 Cynthia Wallat. 互动中的互动框架与知识图式：医疗检查／访谈实例。《社会心理学季刊》，页码 205–216, 1987. [25] David W Shaffer。《认知游戏的认识论框架》。计算机与教育，46(3):223–234, 2006. [26] Paul Hutchison 和 David Hammer。关注科学课堂中的学生认识论框架。《科学教育》，94(3):506–524, 2010. [27] Edward F. Redish。物理教育研究的理论框架：对学生思维建模。*arXiv*预印本 *physics/0411149*，2004. [28] Andrew Elby 和 David Hammer。认识论资源与框定：帮助教师解读并回应学生认识论的认知框架。课堂中的个人认识论：理论、研究及实践启示，4(1):409–434, 2010.[29] Loucas Louca、Andrew Elby、David Hammer 和 Trisha Kagey。认识论资源：将新的认识论框架应用于科学教学。教育心理学家，39(1):57–68, 2004. [30] Seth Rosenberg、David Hammer 和 Jessica Phelan。八年级关于岩石循环的讨论中存在的多种认识论连贯性。《学习科学杂志》，15(2):261–292, 2006. [31] Leema K. Berland 和 David Hammer。科学论证的框定。《科学教学研究杂志》，49(1):68–94, 2012. [32] Soo-Yean Shim 和 Heui-Baik Kim。框架协商：科学建模期间小组中认识论框架与立场框架化的动态变化。《科学教育》，102(1):128–152, 2018. [33] Kristen B. Wendell、Jessica E. S. Swenson 和 Tejaswini S. Dalvi。认识论框架与小学新手教师学习和教授工程设计的方法。《科学教学研究杂志》，56(7):956–982, 2019. [34] Jennifer Schellinger、Lama Z. Jaber 和 Sherry A. Southerland。和谐还是脱节？认识论框架及其在综合科学与工程活动中的作用。《科学教学研究杂志》，59(1):30–57, 2022. [35] Brittland K. DeKorver 和 Marcy H. Towns。普通化学学生对化学实验课程的目标。《化学教育杂志》，92(12):2031–2037, 2015. [36] Clarissa Keen 和 Hannah Sevian。界定本科普通化学实验中学生挣扎的领域。化学教育研究与实践，2022. [37] Rachel E. Scherr 和 David Hammer。学生行为与认识论框架：物理学协作主动学习活动中的实例。《认知与教学》，27(2):147–174, 2009. [38] Hai D. Nguyen、Deepa N. Chari 和 Eleanor C. Sayre。小组问题解决中学生认识论框架的动态变化。《欧洲物理学杂志》，37(6):065706, 2016. [39] Bahar Modir、John D. Thompson 和 Eleanor C. Sayre。量子力学中的框定困难。《物理评论：物理教育研究》，15(2):020146, 2019. [40] Casey E. Murphy。《物理实验室协作主动学习活动中的寻求答案与构建观点》。缅因大学，2011. [41] Jason M. May 和 Lauren A. Barth-Cohen。学生对认识论能动性的动态框定。载于第*15*届学习科学国际会议论文集（*ICLS 2021*）。国际学习科学学会，2021. [42] P. H. Sneddon、K. A. Slaughter 和 N. Reid。大学生对在学校实践活动中物理学习的感知、看法与意见。《欧洲物理学杂志》，30(5):1119

，2009年

[43] Anthony C. K. Leung、Alexandra Terrana 和 Stanislaw Jerzak。学生对物理实验室教育价值的看法：一项横断面调查。加拿大物理学杂志，94(9):913–919，2016年。[44] Ian Descamps、Sophia M. Jeon 和 David Hammer。入门实验课中富有成效的确认框架案例。载于*2022*年物理教育研究会议，PER 会议，页 137–143，大急流城，密歇根州，2022年7月13日至14日。[45] Emily Miller、Eve Manz、Rosemary Russ、David Stroupe 和 Leema Berland。直面房间里的认识论大象：认识论能动性与新一代科学标准。《科学教学研究杂志》，55 1075，2018 7 1053( ): – 。[46] David Stroupe。考察教室科学实践共同体：教师和学生如何协商认识论能动性并学习作为实践的科学。《科学教育》，98(3):487–516，2014年。[47] Meagan Sundstrom、Anna McLean Phillips 和 N. G. Holmes。探究式实验课中的问题化：学生如何应对意外结果。载于 S. Wolf、M. B. Bennett 和 B. W. Frank 编，*2020*年物理教育研究会议论文集，虚拟会议，2020年。[48] Meagan Sundstrom、Rebeckah Fussell、Rachel Scherr 和 Natasha G. Holmes。学生对教师在物理实验室中提示框架转换的不同反应。载于*2022*年物理教育研究会议，PER 会议，页 451–456，大急流城，密歇根州，2022年7月13日至14日。[49] Eugenia Etkina、Alan Van Heuvelen、David T. Brookes 和 David Mills。实验在物理教学中的作用——一种过程方法。《物理教师》，40(6):351–355，2002年。[50] Tong Wan、Ashley A. Geraets、Constance M. Doty、Erin K. H. Saitta 和 Jacquelyn J. Chini。表征改革型实验室和辅导课中理科研究生助教的教学实践。《国际*STEM*教育杂志》，7(1):30，2020年12月。[51] Katherine L. McNeill、Lisa M. Marco-Bujosa、Mar´ıa Gonz´alez- Howard 和 Suzanna Loper。教师对课程的实施：科学论证中对程序的忠实度与对目标的忠实度。《国际科学教育杂志》，40(12):1455–1475，2018年8月。[52] Benjamin T. Spike 和 Noah D. Finkelstein。用于考察物理教学助教信念与实践的框架之设计与应用。《物理评论：物理教育研究》，12(1):010114，2016年2月。[53] Renee Michelle Goertzen、Rachel E. Scherr 和 Andrew Elby。教室中的辅导课助教：不同的教学与学习信念支持着相似的教学行为。《物理评论专题：物理教育研究》，6(1):010105，2010年4月。[54] Melissa Dancy、Charles Henderson 和 Chandra Turpen。教师如何了解并实施基于研究的教学策略：同伴教学法案例。《物理评论：物理教育研究》，12(1):010110，2016年2月。[55] Renee Michelle Goertzen、Rachel E. Scherr 和 Andrew Elby。教室中的辅导课助教：不同的教学与学习信念支持着相似的教学行为。《物理评论专题：物理教育研究》，6(1):010105，2010年。[56] Rosemary S Russ 和 Melissa J Luna. 从教师注意中的局部模式推断教师的认识论框定。《科学教学研究杂志》，50(3):284–314，2013年。[57] Amy D. Robertson、Rachel E. Scherr 和 David Hammer。科学与数学中的回应式教学。Routledge，纽约州纽约市，2016年。[58] N. G. Holmes、Benjamin Keep 和 Carl E. Wieman。通过构建并支持学生能动性来培养科学决策能力。《物理评论：物理教育研究》，16(1):010109，2020年。[59] Emily M. Smith、Martin M. Stein、Cole Walsh 和 N. G. Holmes。直接测量物理实验课中实验教学的影响。《物理评论*X*》，10 011029，2020 1( ): 。[60] https://www.physport.org/curricula/thinkingcritically/. [61] N. G. Holmes 和 D. A. Bonn。通过定量比较促进基础物理实验中的探究。《物理教师》，53(6):352–355，2015年。[62] Rachel E Scherr。通过视频分析获得洞见与进行编码：基础物理辅导课中的实例。物理评论专题：物理教育研究，5 020106，2009 2( ): 。[63]Sara Hennessy、Sylvia Rojas-Drummond、Rupert Higham、Ana Mar´ıa M´arquez、Fiona Maine、Rosa Mar´ıa R´ios、Roc´ıo Garc´ıa-Carri´ón、Omar Torreblanca 和 Mar´ıa J os´e Barrera。制定编码方案，以分析不同教育情境中的课堂对话。学习、文化与社会互动，9:16–44，2016年。[64] Sharon J Derry、Roy D Pea、Brigid Barron、Randi A En-gle、Frederick Erickson、Ricki Goldman、Rogers Hall、Timo-thy Koschmann、Jay L Lemke、Miriam Gamoran Sherin 等。开展学习科学视频研究：关于选择、分析、技术与伦理的指南。《学习科学杂志》，19(1):3–53，2010年。[65] Brigitte Jordan 和 Austin Henderson。互动分析：基础与实践。《学习科学杂志》，4(1):39–103，1995年。[66] Rosemary S. Russ、Janet E. Coffey、David Hammer 和 Paul Hutchison。使课堂评价更能体现科学推理：关注机制性思维的理由。《科学教育》，93(5):875–891，2009年。[67] Janet E. Coffey、David Hammer、Daniel M. Levin 和 Terrance Grant。形成性评价中缺失的学科实质。《科学教学研究杂志》，48(10):1109–1136，2011年。[68] David Hammer、Fred Goldberg 和 Sharon Fargason。回应式教学与三年级课堂中能量概念的萌芽。《科学、数学与信息通信技术教育评论》，6(1):51–72，2012年。[69] Daniel Levin、David Hammer、Andrew Elby 和 Janet Coffey。成为回应式科学教师：聚焦中学科学中的学生思维。美国国家科学教师协会，阿灵顿，2012年。[70] Eve Manz 和 Enrique Su´árez。支持教师应对科学、学生与教学中的不确定性。《科学教育》，102(4):771–795，2018年。