

月球为何没有飞向太阳？ ——基于学习进阶及教育支架理念的探讨

张明硕 黄致新 熊维敏 潘艺哲

(华中师范大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430079)

摘要 中学物理和大学物理在知识内容和思维方式上存在较大差异,但仍然是螺旋式上升的关系,在中学物理教学中,不能完全割裂和大学物理的联系。本文针对“月球为何没有飞向太阳”这一问题,在学习进阶及教育支架理念的指导下,探讨如何在中学阶段融入大学物理知识,促进中学物理与大学物理的衔接。

关键词 物理教学; 教学衔接; 学习进阶; 认知支架; 非惯性系

WHY DIDN'T THE MOON FLY TO THE SUN? —DISCUSSION BASED ON THE CONCEPT OF LEARNING PROGRESSION AND EDUCATIONAL SCAFFOLDING

ZHANG Mingshuo HUANG Zhixin XIONG Weimin PAN Yizhe

(School of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079)

Abstract There are significant differences in knowledge content and thinking styles between middle school physics and college physics, but they are still in a spiral relationship. In middle school physics teaching, the connection with college physics cannot be completely separated. This paper addresses the question “Why didn't the moon fly to the sun?” and explores how to integrate university physics into middle school to facilitate the interface between middle school and university physics, guided by the concept of learning progression and educational scaffolding.

Key words physics teaching; teaching articulation; learning progression; cognitive scaffolding; non-inertial systems

“大学物理好难”“以前中学遇到的疑难问题原来要这样解释”,在大学物理课堂做助教工作期间,笔者常常能听到本科生发出这样的感慨。一方面,学生在中学阶段,没有接触到大学物理的内容,因此对大学内容感到陌生,产生畏难情绪;另一方面,中学物理范畴的一些疑难问题,用大学物

理的知识解释起来能让学生恍然大悟,给予其一种“原来是这样”的认知乐趣,满足学生的认知需求。在中学阶段选取适当知识点采取合理的教学方式渗透大学物理内容,不仅可以促进中学与大学的衔接,还可以帮助学生深化对物质世界的理解,拓宽其思维视野,激发学习兴趣。

收稿日期: 2023-01-18

通讯作者: 黄致新,男,教授,主要从事物理教育研究。

引文格式: 张明硕,黄致新,熊维敏,等. 月球为何没有飞向太阳? ——基于学习进阶及教育支架理念的探讨[J]. 物理与工程, 2023, 33(3): 120-124.

Cite this article: ZHANG M S, HUANG Z X, XIONG W M, et al. Why didn't the Moon fly to the Sun? —Discussion based on the concept of learning progression and educational scaffolding[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(3): 120-124. (in Chinese)

因此,本文针对“月球为何没有飞向太阳”这一问题在中学阶段和大学阶段的不同解释,并基于学习进阶的视角,搭建认知支架,探讨中学物理与大学物理的衔接途径。

1 月球为何没有飞向太阳

太阳的质量 $m_{\text{日}} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$, 地球的质量 $m_{\text{地}} = 5.96 \times 10^{24} \text{ kg}$, 月球的质量 $m_{\text{月}} = 7.35 \times 10^{22} \text{ kg}$, 太阳和地球间的距离 $r_{\text{日地}} = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$, 月球和地球间的距离 $r_{\text{地月}} = 3.84 \times 10^8 \text{ m}$ 。通过这些数据我们可以分别计算出太阳、地球对月球的万有引力。如果分析三者处于任何相对位置的受力, 计算较为复杂。因此本文只讨论月球离太阳最近与最远的情况。

当月球、太阳与地球三者在同一直线上时, 因为 $r_{\text{日地}} \gg r_{\text{地月}}$, 所以太阳到月球的距离可近似为太阳到地球的距离, 将数据代入公式 $F_{\text{引}} = G \frac{Mm}{r^2}$, 太阳对月球的万有引力 $F_{\text{日月}} = 4.31 \times 10^{20} \text{ N}$, 地球对月球的万有引力 $F_{\text{地月}} = 1.98 \times 10^{20} \text{ N}$ 。太阳对月球的引力大小近似是地球对月球的引力大小的两倍, 但月球为何没有飞向太阳呢?

2 中学阶段基于“惯性系”的解释

中学生容易理解的解释如图 1 所示, 月球在绕着地球转, 同时地球和月球一起绕着太阳转。地球和太阳对月球的万有引力的合力指向太阳, 此合力提供了月球绕太阳转的向心力, 月球围绕

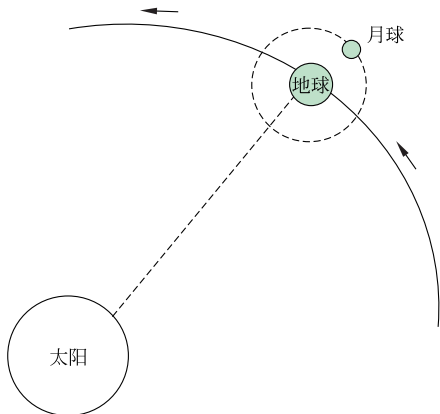


图 1 太阳惯性系下的月球

太阳转, 因此月球没有飞向太阳。

这种解释隐含的物理基础是: 选取太阳作为惯性系, 对月球进行分析。此解释没有突破中学物理的范畴, 符合中学生的思维习惯, 也就是在惯性系中对物体进行动力学分析, 容易被中学生接受。

3 大学阶段基于“非惯性系”解释

在大学的动力学部分, 参考系从惯性系扩展到了非惯性系。在上述问题中, 太阳是更好的惯性系, 那地球呢? 相对于太阳, 地球做变速运动, 此时的地球应该看成非惯性系。如果以地球为参考系对月球进行分析, 需要引入惯性力这一概念。

4 学习进阶推动物理衔接

诚然, 直接向学生引入惯性力的概念, 在非惯性系中分析问题, 中学生往往难以理解。从应试的角度来看, 教师完全不必详细讲解“非惯性系和惯性力”的内容, 只需简单介绍, 甚至寥寥数语也无可厚非。但是, 这样并不能完全解答学生的疑惑, 不能很好地满足学生的探索欲望, 也不利于学生在大学阶段的物理学习。

因此, 笔者认为在中学阶段有必要引入“非惯性系”和“惯性力”这两个大学阶段的物理概念。运用郭玉英教授团队提出的科学概念理解的发展层级模型^[1], “非惯性系”和“惯性力”的概念理解发展层级模型如表 1 所示。

合理安排教学内容, 帮助中学生发展对“非惯性系”和“惯性力”的理解, 是可以实现的。学者们对于学习进阶的定义不尽相同, 取得了共识的理解是学生在一段时间内关于某一主题展开的循序渐进、逐步深入的学习过程。中学生可以破除“地球是惯性系”这一思维定势, 形成从“惯性系”到“非惯性系”的认知飞跃, 促进物理观念和科学思维的发展。

4.1 搭建认知支架, 助力学习进阶

地球属于非惯性系, 分析月球受力需要引入惯性力, 此时的惯性力也称为惯性离心力。在教学过程中需要提供脚手架, 搭建认知支架, 让学生实现从“惯性系”到“平动非惯性系和平动惯性力”, 再到“转动非惯性系和惯性离心力”的进阶过程。

表1 “非惯性系”“惯性力”概念理解发展层级模型

发展层级	层级描述	学生对问题的理解认识
经验 (Experience)	学生具有尚未相互关联的日常经验和零散事实	认识到一系列牛顿第二定律“不成立”的运动情况
映射 (Mapping)	学生能建构事物的具体特征与抽象术语之间的映射关系	知道牛顿第二定律是否成立与参考系的选取有关
关联 (Relation)	学生能建构抽象术语和事物数个可观测的具体特征间的关系	知道参照系有“惯性系”和“非惯性系”之分,知道“隐藏的惯性力”
系统 (System)	学生能从系统层面上协调多要素结构中各变量的自变与共变关系	知道惯性力的“存在”,能让牛顿第二定律在非惯性系下仍然成立
整合 (Integration)	学生能由核心概念统整对某一科学观念(例如物质观念、能量观念等)的理解,并建构科学观念间和跨学科概念(例如系统、尺度等)之间的联系。	在非惯性系下,列出动力学方程;对参考系的理解,从“惯性系”到“非惯性系”,进一步深化对运动与相互作用的理解

支架1:讨论平动非惯性系和平动惯性力。

如图2所示,取地面为惯性系,小车相对于地面向左加速运动,加速度为 a ,小车为非惯性系,在桌面上质量为 m 的小球在绳子的牵引下和小车保持相对静止。

在地面惯性系中,小球的运动学方程为 $T=$

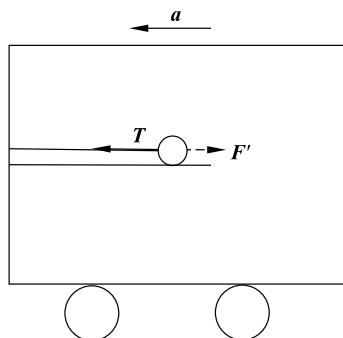


图2 平动非惯性系与平动惯性力

ma ,符合牛顿第二定律,满足动力学方程。

在小车非惯性系中,小球是相对静止的, $T \neq ma'$,不符合牛顿第二定律,不满足动力学方程。

为了在非惯性系中牛顿第二定律能够成立,需要引入惯性力 $F' = -ma$,我们把 F' 称为平动惯性力,此时小球的动力学方程为 $T + F' = ma'$,符合牛顿第二定律。在非惯性系中对物体进行受力分析,除了考虑有施力物体的“真实力”,也要考虑没有施力物体的惯性力,并且惯性力是根据作用效果人为引入的“假想力”。

笔者认为在中学阶段只需要让学生能够列出非惯性系下物体的运动方程即可,物体在不同参照系之间的加速度变换可以进行留白,不必单独作为一个知识点特别讲解。在分析各种情景时,自然而然就会用到加速度变换。这样处理,一方面可以减轻学生的认知负担,另一方面也为学生对加速度变换进一步的自主探究留下空间。

支架2:在平动非惯性系和平动惯性力的基础上,分析转动非惯性系和惯性离心力。

如图3所示,取地面为惯性系,转盘相对于地面绕过圆心的铅直轴转动,角速度为 ω ,转盘为非惯性系,质量为 m 的小球在绳子的牵引下和转盘保持相对静止,小球质心位置到圆心的距离为 r 。

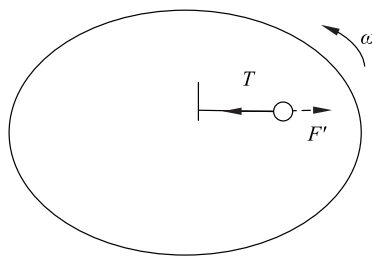


图3 转动非惯性系和惯性离心力

在地面惯性系中,小球的运动学方程为 $T = m\omega^2 r$,拉力大小为 $m\omega^2 r$,方向指向圆心,符合牛顿第二定律,满足动力学方程。

在转盘非惯性系中,小球是相对静止的,需要引入惯性力 F' , $T + F' = ma' = 0$,得出 $F' = -T$,大小为 $m\omega^2 r$,方向背离圆心,因此此时的惯性力也叫做惯性离心力。

通过支架1和支架2,可以过渡到“地球是非惯性系,月球受到惯性离心力”吗?笔者认为从物理内涵上讲,是不可以的。在分析太阳、地球、月球三者的受力情况时,由于天体之间距离和天体

自身尺寸的大小关系,我们把三者看成是质点。支架2的分析过程,并没有讨论质点。从物理意义上讲,文献[2]中“小球却相对转台静止不动”和文献[3]中“小球静止在盘面不动”这样的表述需要进一步深化理解,因此笔者搭建了支架3。

支架3:小球真的相对转盘静止不动吗?

本文不引入极坐标系的概念,仍然基于中学阶段的直角坐标系进行讨论。如图4所示,小球质心位置在转盘上记为A点,圆心记为O,在OA连线上任取一B点,在地面参考系看来,转动过程中,AB两点相对位移的矢量大小不变,但方向处处改变。因此在地面惯性系看来,位于A点的小球相对于B点,是运动的,在支架2中,更准确的说法是小球相对于转盘上的A点是静止的。这样才能和被看成质点的太阳(惯性系)、地球(非惯性系)和月球(分析对象)一一对应起来。

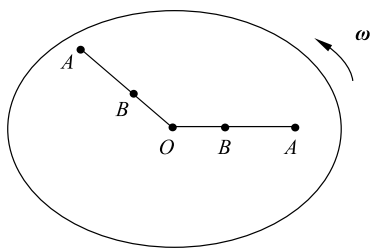


图4 转盘上的小球

B点相对于地面惯性系的加速度大小为 $\omega^2 r_B$,以B点为非惯性系,如图5所示,小球受到的惯性离心力大小为 $m\omega^2 r_B$,推导如下:

在地面惯性系中

$$a_B = \omega^2 r_B$$

$$a_A = \omega^2 r_A$$

小球位于点A,受拉力 $T = m\omega^2 r_A$

小球相对于点B的加速度大小为 $a_A - a_B$

在B点非惯性系中,小球动力学方程为

$$T + F_{\text{惯}} = m(a_A - a_B) = m\omega^2 r_A - m\omega^2 r_B$$

$$F_{\text{惯}} = -m\omega^2 r_B$$

惯性力的大小为 $m\omega^2 r_B$,方向与 a_B 方向相反,背离圆心。

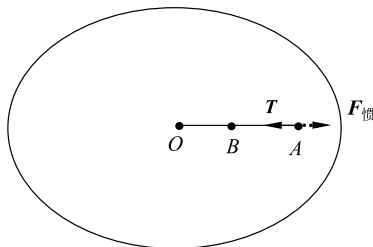


图5 B点非惯性系下的小球

4.2 破除思维定势,实现学习进阶

学生在原有的基础上,利用搭建的支架,如图5所示,就可以回归“月球为何没有飞向太阳”这一问题。

如表2所示,利用类比思维,太阳是更为合适的惯性参考系,地球就成了非惯性系。

表2 认知支架的构建过程

情景	支架1	支架2	支架3	月球没有飞向太阳
惯性系	地面	地面	地面	太阳
非惯性系	小车	转盘上的A点	转盘上的B点	地球
分析对象	小球	小球	小球	月球

以地球为参考系计算月球受力时,需要加上惯性力,如图6所示。

月球受到的惯性力大小为

$$F_{\text{惯}} = m_{\text{月}} a_{\text{地}} = m_{\text{月}} \frac{Gm_{\text{日}}}{r_{\text{日地}}^2} = \frac{Gm_{\text{日}} m_{\text{月}}}{r_{\text{日地}}^2}$$

为了讨论方便,不妨考虑月球离太阳最近和最远时的情况,如图7所示。

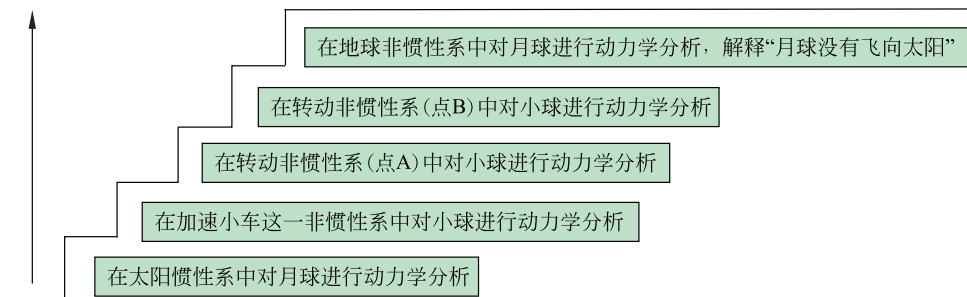


图6 “月球在地球非惯性系中的动力学分析”的构建路径

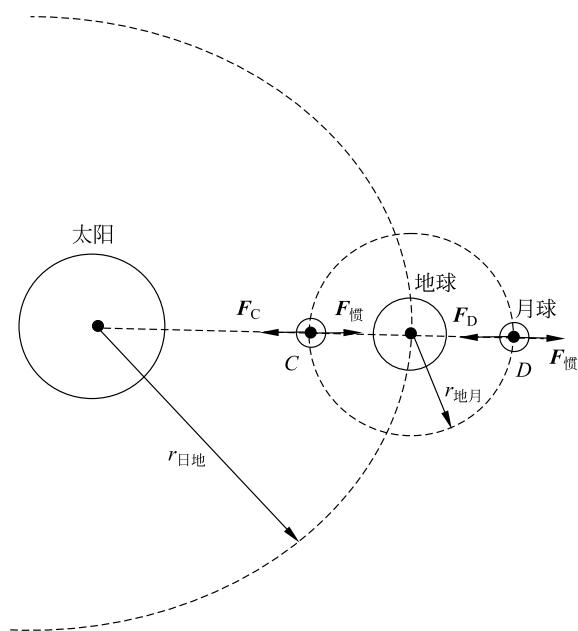


图7 地球非惯性系下的月球

最近 C 点:月球所受太阳的引力大小为

$$F_C = \frac{Gm_{\text{日}}m_{\text{月}}}{(r_{\text{日地}} - r_{\text{地月}})^2}$$

最远 D 点:月球所受太阳的引力大小为

$$F_D = \frac{Gm_{\text{日}}m_{\text{月}}}{(r_{\text{日地}} + r_{\text{地月}})^2}$$

因 $r_{\text{日地}} \gg r_{\text{地月}}$

$$F_C = \frac{Gm_{\text{日}}m_{\text{月}}}{r_{\text{日地}}^2}$$

$$F_D = \frac{Gm_{\text{日}}m_{\text{月}}}{r_{\text{日地}}^2}$$

与 $F_{\text{惯}}$ 进行比较 $F_C = F_D = F_{\text{惯}}$

可以看出,以地球为非惯性参考系分析月球受力时,太阳对月球的引力和惯性力相互抵消,所以只需要考虑地球给月球的引力即可。实际上,更加准确的表述应该是地球和月球组成了一个双星系统,系统的质心绕太阳转动。地月双星系统的进一步分析也可以点到为止,让学生进行自主探究。

5 结语

物理“难教难学”,这既是客观的实践经验,也是主观的情感体验。但是,这一社会共识不该是

广大物理教育者内心的桎梏铁律,我们需要探索出提升物理教育教学效果的锦囊妙计。中学物理和大学物理不是平行且割裂的,而是相互交织在一起的,大学物理内容对中学物理教学有着丰富的参考价值。针对“难教难学”这一问题,本文给出的回答是借鉴学习进阶和教育支架理念,在中学教学中巧妙引入大学物理知识,培养中学生的物理品味,激发其学习兴趣,以此来破除面对物理时的畏难情绪,保障物理教育教学活动的顺利进行。

参考文献

- [1] 郭玉英,姚建欣. 基于核心素养学习进阶的科学教学设计[J]. 课程. 教材. 教法, 2016, 36(11): 64-70.
GUO Y Y, YAO J X. Instructional design of science lessons based on the learning progression of key competencies[J]. Curriculum, Teaching Material and Method, 2016, 36(11): 64-70. (in Chinese)
- [2] 马文蔚. 物理学上册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020: 45-48.
- [3] 黄致新, 潘武明, 王建中, 等. 大学物理学 第一卷 大学物理(上)[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 51-53.
- [4] 李海英, 郭欣, 倪牟翠, 等. 通过力学教学实现中学物理到大学物理的良好过渡[J]. 物理与工程, 2018, 28(1): 86-88.
LI H Y, GUO X, NI M C, et al. A good transition from middle school physics to university physics through mechanics teaching[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(1): 86-88. (in Chinese)
- [5] 黄绍书. 高中课程改革背景下大中学物理教育面临的困境与思考[J]. 物理与工程, 2019, 29(3): 101-104+116.
HUANG S S. The difficulties and reflections of physics education in middle schools under the background of high school curriculum reform[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(3): 101-104+116. (in Chinese)
- [6] 李玉强, 鹿桂花. 大学物理和中学物理教学内容衔接的探讨——以静电场为例[J]. 物理与工程, 2016, 26(1): 76-79.
LI Y Q, LU G H. Research on cohesion of curriculum between college physics and middle school physics—Taking the part of electrostatic field as example[J]. Physics and Engineering, 2016, 26(1): 76-79. (in Chinese)
- [7] 赵亚娟, 陈浩. 大学物理教育如何与中学物理教育更好地衔接[J]. 物理通报, 2010(11): 14-17.
- [8] 徐红霞. 大学物理和中学物理的力学教学的有效衔接[J]. 物理与工程, 2014, 24(S2): 83-85.