

# 物理学思维的艺术

廖 玮<sup>†</sup>

(华东理工大学物理学院 上海 200237)

2021-04-07收到

<sup>†</sup> email: liaow@ecust.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20211008

常常可以看到有人把物理学当作是逻辑严密的精妙理论,可以由少数的原理解释广泛的现象,例如牛顿力学体系。许多人以牛顿作为科学的典范,甚至有人把牛顿力学那样系统化的理论才当作是科学。这种对科学的理解实际上是把教科书上总结好的科学理论当作为科学,甚至当作是科学的全部,实质上是只把已经完成的理论当作科学。拥有这种思想方法的人常常不知道科学理论中的概念从何而来、有什么根据,常常以为科学所需的概念没有什么困难,甚至以为相关概念在科学理论发展出来之前就已经出现。还有人认为哲学可以为科学发展作概念准备,甚至有人认为科学需要哲学为其发展作概念准备,好像哲学家在书斋中的思辨和想象可以凭空建立起科学发展所需的观念,可以胜过科学家在实验室里艰苦的实验工作以及对实验的思考。如果是那样,我们将不得不承认哲学是比科学更加有效的思维方式,谈论伽利略以来的科学革命也将毫无意义。

以上这种对科学的理解,是一种对现实颠倒的思路。对现实的颠倒是现实的抽象,是对现实的超越,是科学理论最终获得成功的一个极端重要的必要环节,但这同时也可能造成对现实的掩蔽。由这种思路的视角我们可以看到恢弘的景象,但是很难看到盛景所不得不依赖的地基或者根系。实际情况恰好

相反,人们常常是在非常困难的情况下思考问题、发现原理,逐步建立起系统化的理论。这种困难不仅仅是缺乏系统化的理论的帮助,也可能是缺乏合适的概念思考问题,以前具有的概念甚至可能造成妨碍,还可能是没有合适的数学工具描述现象,更可能是没有足够的实验技术手段探测现象。对科学发展而言,更加重要的一点是如何在非常困难的情况下在未知领域思考问题、得到答案。在有这么多困难的情况下开展探索、找到合适的问题、获得问题的答案,这需要高超的思维艺术。

物理学正是在未知领域探索的科学,物理学丰富的历史为这种思维艺术提供了丰富的范例。物理学家常常需要在缺乏合适概念的情况下思考问题,在不知道逻辑和数学如何发挥作用的情况下找到答案,并且发明适合描述未知世界的新概念和新语言。物理学思维的艺术就在于,我们需要在面对这类困难的情况下找到合适的方法获得答案,甚至在不知道答案为什么是正确的情况下得到正确的答案,然后再考虑如何完善打造出逻辑严密的理论体系。这是辉煌的智力成就,是高超的思维艺术。此外,正是在这种首先获得的少量可靠线索的指引之下,辨析概念和打造理论体系的努力才不会陷于概念的丛林之中而找不到正确的前进方向。这样才可能在还有许多问题没有被透彻理解的

情况下就建立起可靠的理论体系,这也正是在物理学历史上多次发生的情况。

费曼在1948年发展出量子电动力的协变表述和重正化方法是一个非常好的例子,展示了物理学研究过程中的这种困难。费曼回忆1948年的Pocono会议时说<sup>[1]</sup>:

按照贝特的建议,我在演讲中说:“这是我的数学公式,我将向你们展示它产生了量子电动力学的的所有结果。”立刻有人问我:“这个公式是从哪里来的?”我说,“它来自哪里并不重要;它有效,这是正确的公式!”“你怎么知道这是正确的公式?”“因为它有效,所以它会给出正确的结果!”“你怎么知道它会给出正确的答案?”“这将从我如何使用它变得明显。我会向你们展示这个公式是如何工作的;在它的帮助下,我会解决一个又一个问题。”所以我试着解释我用过的符号的意义,我用它来解决电子的自能问题。当我说到细节的时候,他们就觉得无聊了。然后贝特试图帮助我,他说:“别担心那些细节,给我们解释一下这个公式是怎么用的。”并问:“是什么让你一开始就认为这个公式是正确的?”然后我试图进入物理概念。我在困难中越陷越深,一切都变得一团糟。我试着解释我所使用的技巧。举个例子,不相容原理,就是说你不能有两个处于同一状态的电子;结果是在微扰理论的中间态上你不太需要注意这个原

理。我从经验规则中发现，如果你不注意它，你无论如何都会得到正确的答案，如果你注意了它，你就得担心这个和那个。

然后他们问：“那不相容原理呢？”“对中间态没有任何影响”。然后泰勒问：“你怎么知道？”“我知道，因为我已经算出来了！”然后泰勒说：“这怎么可能？不考虑不相容原理是根本错误的。”我回答说：“我们以后会看到。”

在开始的时候，我已经说过我将处理单电子，我将描述这个关于正电子是一个在时间上倒退的电子的想法，狄拉克问：“它是么正的么？”我说：“让我试着解释它是如何工作的，然后你可以告诉我它是否是么正的！”我当时甚至不知道“么正”是什么意思。所以我继续说下去，狄拉克重复了他的问题：“它是么正的么？”于是我最后说：“什么是么正的？”狄拉克说：“矩阵将你从现在的位置带到未来的位置。”我说：“我还没有得到任何从现在到未来的矩阵。我在时间中向前或者向后，所以我不知道你的问题的答案是什么。”



图1 伽利略·伽利雷(1564—1642)

这些人每个人都有自己的想法，他们的表现就好像我应该知道他们在想什么。狄拉克已经在量子力学中证明了一点，即因为你只在时间上前进，你必须有一个么正算符。但是没有处理单个电子的么正方法。狄拉克不能考虑向前和向后，他想知道关于么正性的定理是否适用于它。他们每个人，出于不同的原因，都认为我在做的事情中有太多的把戏，而事实证明，要告诉他们你真的可以以我的方式继续下去是不可能的。

……我有一种可怕的逆来顺受的感觉。我对自己说，我必须把它全部写下来发表，这样他们就可以阅读和研究它，因为我知道它是正确的！就是这样。

费曼的理论没有理清概念，反而带来了概念上的混乱，他有很多物理问题不能回答。虽然有这么多的困难，但是他非常确信自己是对的。这一方面是因为他对自己的计算有信心，他的结果与实验结果符合，另一方面是因为他可以和施温格的计算做比较，可以互相核对。然而，实际上施温格也遇到了类似的困难。当施温格在会议上试图解释他的理论的物理含义时，也立即遭遇到类似费曼的困境，所以贝特才建议费曼在报告中多讲数学而少讲物理的方面。简而言之，费曼和施温格都分别发展出了量子电动力学的协变表述和重正化方法，计算得到了兰姆移动和电子反常磁矩的结果，与实验符合。他们确信自己是正确的，但是他们都不知道自己为什么是对的。此后，在费曼、施温格和朝永振一郎的研究工作的激发下，相继有戴森对费曼、施温格和朝永振一郎的表述形式之间关系的阐明，戴森对可

重正化的证明，威克(Wick)定理，Wald恒等式等多个研究工作。这些工作阐明了量子电动力学的内在结构，理清了很多概念，在一定程度上说明了费曼、施温格和朝永振一郎等人的工作为什么是对的。然而，即便如此，我们必须承认，量子电动力学的重正化理论过于离奇，时至今日我们仍然没有真正理解量子电动力学为什么是对的。

实际上，我们并不需要讨论高深的量子电动力学就可以理解到科学研究中的这种困境，以及科学家克服这种困难达到正确结果的思维艺术。伽利略(图1)对匀加速运动的研究就是这样一个极好的范例。

当我们站在现代，以现代的技术条件和知识积累来回顾伽利略所面对的问题，很容易产生这样一个错觉，即伽利略所面对的是一个比较简单的问题。实际上，伽利略缺乏现代人习以为常的很多技术、知识和概念。伽利略需要在缺乏这些技术、知识和概念的情况下找到通向答案的路径，找到答案。他所面对的是一个非常困难的局面。伽利略以非凡的实验能力和高超的思维艺术对他所面对的难题作出了精彩的回答，并且在他的研究中开创了典型的科学研究的方法，为科学革命以来所提倡的科学思维和科学方法树立了一个典范。

### 伽利略面对的困难

伽利略面对的一大困难是当时的人们并没有加速度这个概念。这个概念需要等他发明出来。加速度说的是经过一段时间之后物体的速度会被改变。例如，假设在 $t_1$ 时间有一个速度 $v_1$ ，在 $t_2$ 时间有一个速度 $v_2$ ，加速度就是 $(v_2 - v_1)/(t_2 - t_1)$ 。然而，这里还需要先引入一个瞬时速

度的概念,即在 $t_1$ 这个时刻有一个速度 $v_1$ ,且在 $t_2$ 这个时刻有一个速度 $v_2$ 。速度的定义是单位时间间隔内的位移除以时间间隔。也就是说,假如在 $t_1$ 时间物体处于位置 $x_1$ ,在 $t_2$ 时间物体处于位置 $x_2$ ,则可以定义速度为 $(x_2-x_1)/(t_2-t_1)$ 。这是在一个时间间隔内物体移动的速度。引入瞬时速度需要更进一步,需要具有无限小极限的概念。当把 $t_2$ 时间向 $t_1$ 靠拢时,即 $t_2-t_1$ 趋向于零时,定义一个在很短的瞬间内的速度。这个一瞬间的速度就是前面所说的瞬时速度。当我们说在 $t_1$ 时间的速度 $v_1$ 以及在 $t_2$ 时间有一个速度 $v_2$ 的时候,我们已经有了瞬时速度的概念。然而,在伽利略之前,人们并不知道这个概念,这个概念也需要等到伽利略发明出来。发明这个概念还有一个困难,就是当考虑趋向于非常小的极限的时候,会出现类似芝诺悖论的概念困难。这类问题会对从概念上引入瞬时速度和加速度造成很多困扰<sup>[2]</sup>。

这个困难的一个要点在于瞬时速度和加速度的概念都隐藏在现象之下,并不直接呈现在人们看到的现象之中。人们可以直接观测到的是物体的位置。物体在一个时间处于一个位置,在另一个时间处于另一个位置,这些量可以直接记录下来。像时间、位置这样的可以直接在观测中记录下来的物理量被称作是直接可观测量。速度需要使用位置差和时间差才能计算出来,因而不是直接可观测的物理量。加速度也同样不是直接可观测的物理量。对于运动速度比较慢的物体,人们可以大致看到一个速度,在心里建立起速度这个概念。但是对于运动速度快的物体,根据日常经验建立的速度概念就不够用了。例如,

自由落体在开始的第一秒之内将下落大约5 m,第二秒之内将下落15 m,第三秒之内将下落25 m。这样一种运动对人的反应能力而言过于迅速,凭借人力不太可能在这样的过程中看清楚速度是在快速变化的。所以,建立瞬时速度和加速度这样的概念需要对从感觉经验中自然获得的概念做进一步的加工处理和推广。这是建立关于运动物体物理学理论所必须的第一步。

到了现代社会,精密测量技术已经发展到可以在很短的一个瞬间测量计算得到一个瞬时的速度。例如,在汽车上一般都装有速度表,显示每个时刻汽车的速度,使用手机和卫星定位系统也可以获得速度信息。这都是因为现代测量技术已经发展到伽利略时代的人想象不到的程度。现代的测量仪器可以在很短的瞬间精确地测量得到位置的变化,从而计算出速度等不可直接观测的量,在很短的时间内显示出来,并且把物理量的变化不断地显示出来。在现代的技术条件下,这些不可直接观测的物理量表现为好像是直接可观测的物理量。这是技术进步带给了人们在思维上潜移默化的转变。这种转变使现代人把瞬时速度和加速度这样的概念当作是理所当然的,同时也掩盖了伽利略在他那个时代所面对的困难。

伽利略面对的另一个困难也与时代的技术水平有关。他没有很好的记时技术以便精确地记录时间的流逝,对精确地研究物体的运动造成了很大的困难。

伽利略面对的困难还包括缺乏合适的数学工具。他研究物体的运动,这种研究原则上需要微积分知识。然而,在伽利略的年代,这种数学知识还没有被发明出来。伽利

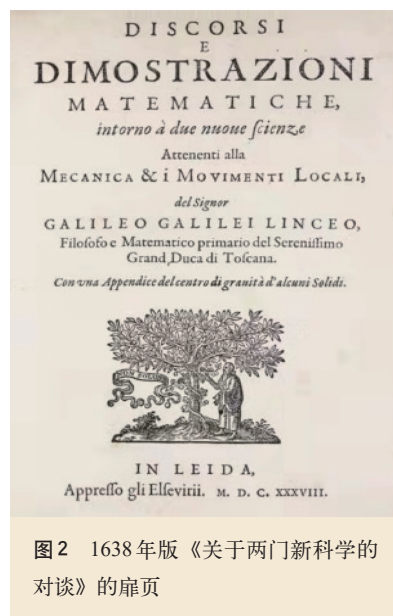


图2 1638年版《关于两门新科学的对谈》的扉页

略不得不把研究限制在匀加速运动的领域。在涉及到变加速问题的时候,也只能费力地(或者说创造性地)把问题转化为匀加速运动的问题加以考虑。

### 伽利略的创造、推理和斜坡实验

伽利略猜想重力导致的自由落体运动是匀加速运动,但是伽利略没有办法直接做实验检验这个猜想。一方面,如上所述,自由落体的加速运动太快,以伽利略那个时代的技术手段难以对这个运动开展直接研究。另一方面,因为速度不是直接可观测量,需要通过测量位置和记录时间推算出来,匀加速运动所说的速度随时间成正比这个假设不能由实验直接检验。实验能够检验的是匀加速运动的推论。此外,如上文所述,伽利略还需要先引入瞬时速度和加速度的概念。自由落体过于快速的运动也导致对引入瞬时速度和加速度造成困难。

在《关于两门新科学的对谈》(图2)第三天的对话中,伽利略对瞬时速度和加速度的概念进行了许多讨论和辨析,其中一段写道<sup>[3]</sup>:

辛普利邱：但是如果越来越大的慢度有无限多个，它们就永远不能被历尽，因此这样一个上升的重物体将永远达不到静止，而是将永远以更慢一些的速率继续运动下去。但这并不是观察到的事实。

萨耳维亚蒂：辛普利邱，这将会发生，假如运动物体将在每一速度处在任一时间长度内保持自己的速率的话；但是它只是通过每一点而不停留到长于一个时刻；而且，每一个时段不论多么短都可以分成无限多个时刻，这就足以对应于无限多个渐减的速度了。

至于这样一个上升的重物体不会在任一给定的速度上停留任何时间。这可以从下述情况显然看出：如果某一时段被指定，而物体在该时段的第一个时刻和最后一个时刻都以相同的速率运动，它就会从这第二个高度上用和从第一高度上升到第二高度的完全同样的方式再上升一个相等的高度，而且按照相同的理由，就会像从第二个高度过渡到第三个高度那样而最后将永远进行均匀运动。

伽利略引入匀加速运动，这意味着速度可以变得越来越慢，甚至无限的慢，辛普利邱不能理解这一点，而认为无限慢的慢不能被全部历经，并认为这意味着运动不能达到静止或者从静止开始。这实质上是一个类似芝诺悖论的概念困难。伽利略实际上不能回答这个概念困难，他缺乏定义瞬时速度和瞬时加速度的微积分知识，也缺乏回答芝诺悖论所需的无穷级数求和知识<sup>[2]</sup>。伽利略对这个困难的回应是：物体只是通过每一点而不停留到长于一个时刻。虽然这不是现代的瞬时速度的定义，但是伽利略已经把把这个概念表达了出来。通过这

样一种辨析，伽利略同时引入了瞬时速度和加速度的概念。

如我们所熟知的，伽利略把重力加速的自由落体问题转化为斜坡上物体运动的问题。日常经验告诉我们，沿斜坡的加速运动比自由落体要慢很多。实验研究这个问题要比直接研究自由落体容易很多。他考虑光滑斜坡上物体的运动。沿着斜坡表面的加速度由向下的重力加速度产生，如果斜坡是光滑的话，重力产生的沿斜坡的运动也应该是匀加速运动。

伽利略对斜坡上物体的加速运动做了详细的实验研究。在《关于两门新科学的对谈》第三天的对话中，伽利略记述了他的斜坡实验<sup>[3]</sup>：

萨耳维亚蒂：我们取了一根木条，长约12腕尺，宽约半腕尺，厚约3指，在它的边上刻一个槽，约一指多宽。把这个槽弄得直、很滑和很好地抛光以后，给它裱上羊皮纸，也尽可能地弄光滑，我们让一个硬的、光滑的和很圆的青铜球沿槽滚动。将木条的一端比另一端抬高1腕尺或2腕尺，使木条处于倾斜位置，我们像刚才所说的那样让铜球在槽中滚动，同时用一种立即会加以描述的办法注意它滚下所需的时间。我们重复进行了这个实验，以便把时间测量得足够准确，使得两次测量之间的差别不超过1/10次脉搏跳动时间。完成了这种操作并相信了它的可靠性以后，我们就让球只滚动槽长的四分之一；测量了这种下降的时间，我们发现这恰恰是前一种滚动的的一半。其次我们试用了其他的距离，把全长所用的时间和半长所用的时间，或四分之三长所用的时间，事实上是和任何分数长度所用的时间进行了比较，在重复了整百次的这种实验

中，我们发现所通过的空间彼此之间的比值永远等于所用时间的平方之比。而且这对木板的，也就是我们让球沿着它滚动的那个木槽的一切倾角都是对的。我们也观察到，对于木槽的不同倾角，各次下降的时间相互之间的比值，正像我们等一下就会看到的那样，恰恰就是我们的作者所预言了和证明了的那些比值。

为了测量时间，我们应用了放在高处的一个大容器中的水。并在容器的底上焊了一条细管，可以喷出一个很细的水柱；在每一次下降中，我们把喷出的水收集在一个小玻璃杯中，不论下降是沿着木槽的全长还是它长度的一部分；在每一次下降以后，这样收集到的水都用一个很准确的天平来称量。这些重量的差和比值，就给我们以下降时间的差和比值，而且这些都很准确，使得虽然操作重复了许许多多次，所得的结果之间却没有可觉察的分歧。

根据对伽利略实验记录的研究<sup>[4]</sup>，我们知道伽利略制造了一个长约2 m的斜坡，其倾斜角为 $1.7^\circ$ 。他打磨斜坡，使其接近光滑，并在斜坡上制造凹槽。他使用青铜圆球，让球从斜坡上沿着凹槽滚下。他在斜坡上安放了一些小的凸条，当球经过凸条时就会有轻微的咔哒声。然后他沿着斜坡调整这些凸条的位置，以使咔哒声之间的时间间隔相等。如果把时间分割成相等的等份，把斜坡上从静止开始的物体在第一个时间间隔中经过的距离记为 $S$ ，则在第二个相等的时间间隔内物体运动经过的距离大约为 $3S$ ，而在第三个时间间隔内物体运动经过的距离大约为 $5S$ 。经过长时间的分析，他发现这个实验结果与速度

和时间成正比这个假设一致。由速度和时间成正比这个假设可以推论得到物体经过的距离与时间的平方成正比。也就是说，如果当第一个时间间隔中经过的距离为 $S$ ，则在第一个和第二个的总时间间隔中物体经过的距离将是 $4S$ ，在第一、第二和第三个的总时间间隔中物体经过的距离将是 $9S$ 。很容易看到，在第二个时间间隔中，物体经过的距离是 $(4-1) \times S$ ，即 $3S$ ；在第三个时间间隔中，物体经过的距离是 $(9-4) \times S$ ，即 $5S$ 。因而，这个实验结果与匀加速运动的推论一致，支持了匀加速运动的猜想。

为了做出这个实验，伽利略不得不采用粗糙的记时方法。他使用了多种记时方法。一种是唱歌、打有节奏的拍子或者数脉搏。另外一种是使用一个大的水桶，在水桶的底部有一个小孔，如果水桶里的水流出的不多、水面变化不大，可以设想从小孔流出水的速度是大致均匀的。因而可以通过称量从小孔流出水的重量而估计时间的流逝。可以想象，伽利略的时间记录是不怎么精确的。虽然伽利略声称实验结果是精确的，但是从现代实验科学的观点来看这样的实验是比较粗糙的。伽利略的斜坡实验不是精确测量的实验，只可能提供大致的信息。

伽利略不满足于这个斜坡实验的结果。他对匀加速运动做了更多抽象思考，对其推论做了更多检验。首先，他考虑沿着具有两个不同斜率的斜坡会有什么不同和相同之处。他发现，只要下降的高度一样，沿着不同斜坡下降到底部时物体获得的速度大小是一样的。他首先以深邃的直觉思维对沿斜坡方向的力的分量做了一个精妙的论证，得到了力和加速度沿着斜坡方向的

分解规则<sup>[2]</sup>。其后他证明，如果物体从图3(a)所示的 $A$ 点出发，从静止开始运动，沿斜坡 $AB$ 到达底部 $B$ 时和沿 $AC$ 到达底部 $C$ 时所获得的速度大小是一样的。进而可以论证知道，如果物体在 $A$ 点有一个初始速度，再沿着斜坡加速下落，沿斜坡 $AB$ 到达底部 $B$ 时和沿斜坡 $AC$ 到达底部 $C$ 时所获得的速度大小还是一样的。

接着，伽利略更进一步考虑沿着任意的光滑曲面的运动。考虑如图3(b)所示的曲面，物体沿着这个曲面运动下落。伽利略把光滑曲面近似地考虑为很多小的斜坡的连接。假设在斜坡连接的转角处物体的速度不损失，因此物体可以被认为是在无摩擦地小斜坡的连接上运动。当物体从 $A$ 点开始沿着小斜坡的连接下落到达 $C_1$ 点时，物体所具有的速度与物体沿着大斜坡 $AB$ 到达与 $C_1$ 点具有相同高度的点的速度大小是一样的。接着物体在沿着小斜坡到达 $C_2$ 时，物体所具有的速度与物体沿着大斜坡 $AB$ 到达与 $C_2$ 点具有相同高度的点的速度大小还是一样的。依次类推，最后可以发现，物体沿着一系列的小斜坡到达 $B$ 点获得的速度与物体沿着大斜坡 $AB$ 到达 $B$ 点的速度的大小是一样的。如果小斜坡越来越多，这些小斜坡的组合就可以当作是逼近于曲面。所以可以得出结论，物体沿着任意光滑曲面从一个点到达另外一个点获

得的速度大小是一样的，这个速度只依赖于物体下降的高度。

最后，伽利略考虑对称的斜坡与前面斜坡的组合。如图3(c)所示，把对称的斜坡或者曲面连接到前面斜坡或曲面。考虑物体从 $A$ 点静止地出发，沿斜坡 $AB$ 下滑，到达 $B$ 点。假设在转折点 $B$ 点，物体的速度没有损失，物体接着沿斜坡 $BA'$ 上升。因为斜坡 $AB$ 与 $BA'$ 是对称的，可以想象物体最终将会到达 $A'$ 点， $A'$ 点与 $A$ 点具有相同的高度。同样考虑沿着很多小斜坡以及对称小斜坡的情况，如图3(c)所示。同样可以得到结果，假如物体从 $A$ 点静止地出发，经过一系列小斜坡到达 $B$ 点后，继续沿着一系列小斜坡上升，最后将会到达 $A'$ 点。最后，类似在上一自然段的推理，可以得到物体沿着任意光滑曲面下滑，再沿任意光滑曲面上升，最后将上升到相同的高度。

现在，伽利略得到了一个可以直接用实验检验的推论。如图3(d)所示，考虑一个线摆。线的一端固定在 $A$ 点，另一端悬挂一个重物。一开始，把重物放在 $C$ 点，让线摆

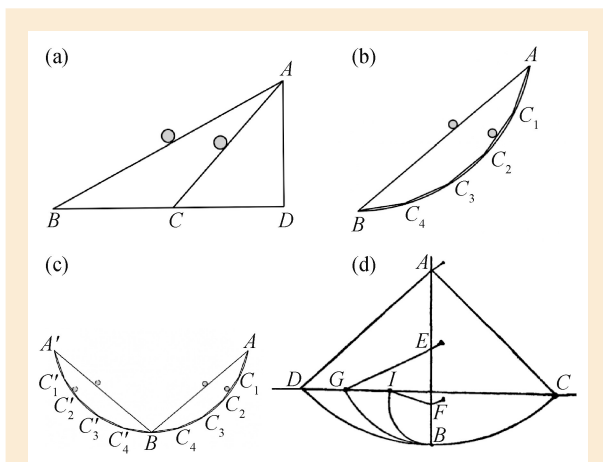


图3 (a) 物体沿着不同光滑斜坡运动；(b) 物体沿着小斜坡以及光滑曲面运动；(c) 物体沿着对称的斜坡或者光滑曲面上落和上升；(d) 伽利略的线摆实验

无阻力的下落，再上升。根据前面的讨论，重物将上升到与 $C$ 点具有相同高度的 $D$ 点。接着考虑在线摆经过路径的 $E$ 和 $F$ 点上，打入钉子之类的障碍物。线摆到达某个障碍物之后不再以 $A$ 点为中心摆动，而将会以 $E$ 点或者 $F$ 点为中心摆动，最终重物将到达 $G$ 点或者 $I$ 点。根据前面的讨论， $G$ 点、 $I$ 点与 $C$ 点和 $D$ 点具有相同的高度。这是一个很容易用实验检验的结论。

### 伽利略的研究方法及其对于理性思维的价值

伽利略对匀加速运动的研究有很多值得探究和学习的要点，具有极大的价值。如前文所述，匀加速运动对于伽利略而言是个十分困难的问题，原因是他缺乏必要的概念准备、实验技术和数学工具来研究物体的运动。这是前沿科学研究的通常情况。真正探索未知世界的前沿研究所面对的常常是伽利略所面对的这种情况。当进入前人没有涉足过的领域之时，前人发展出的、应对其他问题的概念常常是不适用的，甚至可能造成妨碍。人们需要发明新的概念来合理地表述新的现象。在此基础之上，人们才可能发展出描述现象的科学理论。实验技术和观测技术也常常跟不上实验研

究的需要，需要实验家自己去发明新的实验技术和制造新的实验仪器。数学家独立发展了很多数学知识，当科学发展到一定程度时可能会发现一些数学家以前发明的数学突然变得很有用。这是科学发展历史上的一类情况。然而，更多的情况是，研究者不知道如何用数学语言表述研究的问题，这样的数学或许还不存在。对于伽利略所研究的动力学问题，直到牛顿、莱布尼茨发明微积分之后，适用于研究这个问题的数学工具才出现。伽利略面对的是一个极端的情况，在对物体运动的研究中这三种困难全都出现了。

伽利略发展出了合适的概念，也发展出了一些实验技术，以回应这些挑战。更加重要的是，他使用了高超的思维技巧，在十分困难的情况下找到了问题的关键所在并且得到了答案。这个技巧表现在以下几个方面。

第一，他大胆地通过物理直觉猜测现象背后的物理规律。他猜测力导致加速度，猜测重力导致的自由落体运动是匀加速运动。虽然他曾经也猜错了，但是即便错误的猜想也有价值，因为这打开了思路。

第二，他强调要研究现象之中的数量关系，从中得到关于现象的可靠知识。

第三，他尽力使用当时已知的数学知识研究匀加速运动的推论。由速度与时间成正比这个假设，他推论得到了运动距离与时间的平方成正比。

第四，对于当时无法用数学知识加以表述的问题，

他频繁地使用物理图像和直觉进行推理，得到了一些十分漂亮的推论。这些运用直觉和图像的推理可能在逻辑上并不严格，但是在物理上却十分合理，可以被接受。

最后，他使用实验检验这些推论，多方面检查自己的猜想，并由此建立起对猜想的信心。总体而言，虽然这些检验仍然是十分粗糙的，但是这些检验足以树立起对猜想的信心。

伽利略的这个研究展现的是一种在十分困难的情况下得到正确知识的高超思维艺术。他的这个研究模式也是物理学最典型的研究模式。物理规律常常隐藏在现象背后，并不直接展现在现象之中。像伽利略所面对的匀加速运动那样，物理学家常常不能直接检验物理规律，而只能检验物理规律的推论。在这种情况下，猜测隐藏在现象背后的规律成为一个必要的环节。作出猜想之后，还必须检查猜想。因为猜想不直接展现在现象之中，从猜想得到推论是另一个必要的环节。运用数学知识从猜想得到推论，或者运用物理图像从猜想得到推论，是得到推论的两种方法。最后，再使用实验或者观测检查推论，或者将推论与其他已知的事物去比较从而检查推论。当从多方面检查推论都无误之后，我们就可以树立起对猜想的信心。如果与实验或观测不一致，我们可以通过这种方式矫正自己的直觉，再次做出猜想，再推论，再用实验和观测检验。通过这种反复纠正和尝试，最终达到对现象的正确认识。图4对伽利略的这种思想方法做了一个简单展示。通过这样一种方式，物理学家在十分困难的研究条件下，克服困难并积累了大量可靠的知识。

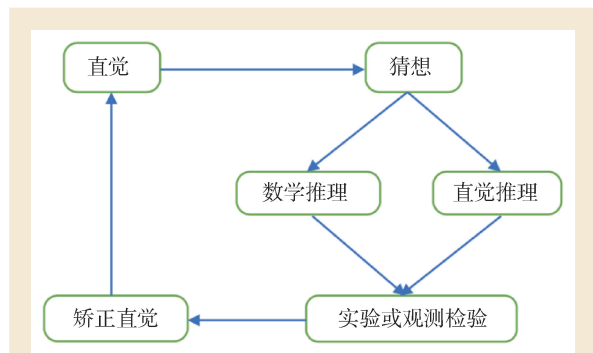


图4 追溯原理的思维方式

伽利略对匀加速运动的研究为这种研究模式提供了一个典型的范本。

这种思维方式当然大量使用推理，但是与常见推理不同的关键一点是，这种推理的目的是发现原理和检查原理，是通过推理实现对原理的追溯。例如，欧几里得几何以少数几个公理作为基础，通过演绎推理得到许多几何知识。几何学的这些公理是自明的，不需怀疑。演绎性的知识体系一般以这种方式建立理论。然而，许多这类理论看起来“自明”的原理实际上常常并不是那么可靠，这就使这类演绎性理论的可靠性成为一个问题。物理学的原理一般是隐藏在现象之后的，是有待发现的，不是自明的，甚至可能在被发现几百年之后还没有被透彻理解，例如经典力学中的质量概念<sup>[2]</sup>。物理学家运用推理的主要目的是揭示直觉中的内容，或者矫正直觉，从而发现隐藏在现象之后的规律。通过这种思想方法实现了对原理的追溯、发现了原理、确认

了原理的正确性之后，人们才可能把这些原理打造成可靠的理论体系。爱因斯坦把科学家比作依靠少量线索就可以找到答案的侦探，说科学家像侦探那样寻找事件和事件之间的联系，然后创造性地运用想象力把它们联系起来<sup>[5]</sup>。爱因斯坦所说的就是这种思维方式，他说：“伽利略的发现以及他所应用的科学推理方式是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端”<sup>[5]</sup>。

总之，在困难的情况下创造合适的概念描述现象、追溯和发现原理是物理学研究以及一切科学研究的首要方面，在此基础之上，人们才可能把已发现的原理建造为逻辑严密的可靠理论体系。仅仅把科学当作发展完好的理论体系只会掩盖科学发现的真实过程，而很难让人具有原创能力，当面对全新未知的时候，接受这种教育的人也很可能是束手无策的。学习物理学思维的艺术就是要学习如何在非常困难的



图5 科学思维的价值——物理学的兴起、科学方法与现代社会

情况下思考问题，学习如何在未知领域思考问题，学习如何创造概念，学习追溯和发现原理。这是通过学习获得创造性思维的关键所在。在《科学思维的价值——物理学的兴起、科学方法与现代社会》(图5)一书中，对这种思维方法还有更多展示。

## 参考文献

- [1] Mehra J, Rothenberg H. The Historical Development of Quantum Theory, Vol 6. Springer-Verlag New York, Inc., 2001
- [2] 廖玮. 科学思维的价值——物理学的兴起、科学方法与现代社会. 北京: 科学出版社, 2021

- [3] 伽利略著, 戈革译. 关于两门新科学的对话. 北京: 北京大学出版社, 2016
- [4] 马尔科姆·朗盖尔著, 朱栋培, 袁业飞, 向守平等译. 物理学中的理论概念. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017

- [5] 爱因斯坦, 英费尔德著, 周肇威译. 物理学的进化. 长沙: 湖南教育出版社, 1999

## 《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：[physics@iphy.ac.cn](mailto:physics@iphy.ac.cn)；联系电话：010-82649029。

《物理》编辑部