

直觉——一种特别的物理学思维

祖宏迪^{1,2} 白欣^{1,†} 张玉峰³ 郑永和⁴

(1 首都师范大学 北京 100089)

(2 北京科技创新研究中心 北京 100744)

(3 北京教育科学研究院 北京 100036)

(4 北京师范大学科学教育研究院 北京 100875)

2021-10-06收到

† email:baixin@tsinghua.org.cn

DOI: 10.7693/wl20211009

在物理学探究历史发展过程的大多数时期,物理学家只拥有有关自然现象的有限经验,没有对应的物理概念,也不知道该使用什么样的数学工具,往往没有办法按照严密的逻辑或数学方法来完成从0到1的跨越。此时,一种特别的思维方式发挥了重要的作用,这就是“直觉”。直觉会有错误和失败,这种“大胆假设”之后“小心求证”的研究模式,时至今日依然是物理学前沿探索中可靠、可用且常用的方法之一。

1 引言:从0到1的跨越

开普勒在第谷留下的大量精确的观星数据中,归纳总结出行星运动三定律。牛顿在开普勒和伽利略的工作基础上进一步发展出宏伟的牛顿力学体系。“始于集邮、终于物理”,在这个过程中,归纳、演绎、分析、综合、数学语言的运用,从各个角度看都近乎是物理学研究近乎完美的案例。然而在物理学探究的大多数时候,物理学家手中并没有如第谷观星数据那样好的基础条件。他们通常只拥有有关自然现象的有限经验,没有对应的物理概念,也不知道该使用什么样的数学工具。在这种情况下,往往没有办法按照严密的逻辑或数学方法来完成从0到1的跨越。此时,一种特别

的思维方式发挥了重要的作用,这就是“直觉”。

马赫说:“科学的功能是代替经验。这样,科学一方面必须依然停留在经验的范围之内,另一方面必须加速超越经验”^[1]。优秀的物理学家往往能够通过敏锐的直觉从海量的可能性中找到正确的方向,再通过实验观测与数学推理进行验证,从而得到其中的物理规律。

“直觉”看似天马行空,其实建立在两条必要条件之上:(1)拥有一定的观察和实验的经验基础;(2)拥有基本的科学思维。它不是凭空的臆想或是随意的猜测,更不是唯心主义者认为的不需要现实经验和逻辑基础的某种人类与生俱来的神秘“禀赋”。物理学的直觉是一种虽不十分严谨,但仍建立在经验和逻辑基础上的跨越式的思维方式,是在清晰的物理图像基础上的一种“合理外推”。

我们可以用飞车特技来比拟物理学的直觉:一辆汽车不可能靠某种神秘的力量凭空“闪现”在鸿沟对面,只

有沿着具有适当坡度、高度、起跳角度和方向的跳台,在积累了足够的初始动量后“起飞”,才有可能越过没有道路的天堑。一个物理学家凭借“直觉”提出时,虽然还没有直通答案的沿着严谨的逻辑和数学铺成的道路,但在经验基础上通过科学思维形成的清晰的物理图像,已经为“跨越”架起了跳台,完成了初始动量的积累和方向的框定。

2 伽利略的直觉

作为物理学奠基人之一的伽利略有着敏锐的物理直觉。他手中并没有第谷的数据,所研究的问题也不行星运动轨迹那样直接而明显。然而,伽利略常常利用直觉来提出大胆的猜测,然后通过观察、实验和推理来验证和矫正自己的直觉。如在《关于两门新科学的对谈》中,伽利略借萨耳维亚蒂之口说出了对落体的实验、观察和猜想^[2]:

“我们已经看到不同比重的物体之间的速率差,在那些阻滞性最强的媒介当中最为显著。例如在水银这种媒质中,金不仅比铅更快地沉到水下,而且还是能够下沉的唯一



图1 1997年5月柯受良驾车飞跃黄河(图片源自网络)

物质，所有别的金属以及石头都将上升而浮在表面。另一方面，在空气中金球、铅球、铜球、石球以及其他各种材料所做之球的速率之差都是那样的小。以至于在一次100腕尺的下落中，一个金球不会超过前一个铜球四指的距离。既观察到这一点，我就得到结论说，在一种完全没有阻力的媒质中，各物质将以相同速率下落。”

“既然除了完全没有空气，也没有任何不论多么坚韧或柔软的其他物体的空间之外，任何媒质都不可能给我们的感官提供我们所寻求的证据。而且那样的空间又得不到，我们就将观察发生在最稀薄和阻力最小的媒质中的情况，并将它和发生在较浓密和阻力较大的媒质中的情况相对比。因为如果作为事实，我们发现在不同比重的物体中，速率的改变随着媒质的越来越柔和而越来越小，而且到了最后，在一种最稀薄的，虽然还不是完全真空的媒质中，我们发现尽管比重的差别很大，速率的差值却很小，乃至几乎不可察觉。我们就有理由在很高的或然性下相信在真空中一切物体都将以相同的速度下落。”

伽利略敏锐地注意到：在如水银那样密度较大的媒介中，不同比重的物体表现出明显的运动差别；而在稀薄的空气中，具有不同比重的各种球却表现出了几乎相同的下落。由此可以判断媒质的密度大小对物体运动有很大的影响，这是有实验事实基础的。

但证据链条没办法直接延伸到真空中。在伽利略生活的时代，人们还不具备制造真空环境的能力，没有任何真空中的直接观察经验和实验证据。力到底是使物体获得速

度还是使物体获得加速度仍为未知，微积分等数学工具也还没出现，加速度的概念需要伽利略自己创建。正是依靠直觉，伽利略大胆地猜测“真空中各种不同的物体都将以相同的速度下落”，并以此作为目标，通过斜面实验等一系列精巧的逻辑和实验验证，最终找到了正确的答案。

这样的例子在伽利略的研究中还有许多。当伽利略将光滑直线斜面上物体的运动规律“物体到达底端时，获得的速度大小只依赖于物体下降的高度”推广到任意曲面的时候，他将曲面分解成一个个连续的直线斜坡，随着小斜坡越来越多，物体沿这条折线轨道从一个点到达另一个点的过程就越逼近曲面的情况。在今天看来同样很小的一步外推，在没有极限概念的情况下，其实是极易陷入如芝诺悖论的逻辑困难。然而伽利略凭借脑海里清晰的物理图像，凭借直觉大胆推测，并且在当时计时技术相当落后的时代，设计了精巧的实验，在很高精度上证实了其推测的正确性。

今天我们十分熟悉的牛顿第一定律，也就是惯性定律中的惯性，也是伽利略的直觉带来的成果。伽利略凭借直觉猜测相对的两个光滑斜面，从一端下落的物体总能到达对面相同的高度，那么当对侧斜面的坡度不断的减缓，物体在水平方向运动的距离就越远，这些都得到了有限的双斜面实验的证实。在此基础上，伽利略再一次凭借直觉合

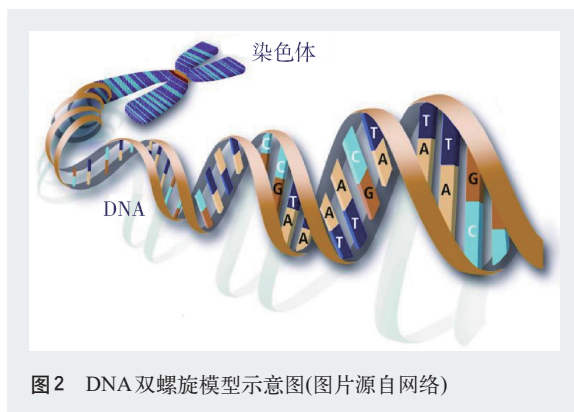


图2 DNA双螺旋模型示意图(图片源自网络)

理外推，当对侧的斜面逐渐趋于水平，物体将在水平面上一直运动下去。这种在没有外力影响下一直保持相同运动状态的性质就是惯性。¹⁾

华东理工大学的廖玮老师在《科学思维的价值》一书中对伽利略的思维方法有系统的阐述，其中还能看到不少类似的例子^[3]。

3 从物理到生命

良好的物理直觉当然不是伽利略的专利。量子物理的奠基人之一埃尔温·薛定谔1943年在都柏林三一学院的一个系列演讲中，用物理学的基本思想审视了当时生物学领域的一些最新发展。承载生物遗传的物质载体是细胞中染色体上的位点——基因，每个基因的体积大约不超过边长300 Å的立方体，而这样的体积中也就能放下大约100万个原子。按照物理学估算不确定度的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 律，100万个原子组成的系统不确定度高达千分之一，这样的不确定度对生命这样的复杂系统而言实在大得惊人。薛定谔凭借敏锐的直觉预言——遗传物质应该是一种大分子^[4]。这个洞见启发了一批物理学家采用物理的思想和方法来研究生物。十年后的1953年，沃森和克里克构建起了那个

1) 需要说明的是，伽利略脑海中的惯性运动是围绕地心的匀速率圆周运动，而不是牛顿第一定律中的匀速直线运动。

大分子——DNA的模型，而威尔金斯和富兰克林的X射线衍射结果为之提供了坚实的实验证据，为分子生物学的建立拉开了序幕。

4 用数学和验证夯实基础

在前沿研究中，没有可用的概念，不知用什么数学工具时，需要在清晰的物理图像基础上，凭借直觉去完成大胆的跨越。然而别忘了“大胆假设，小心求证”是密不可分的。直觉的跨越是从0到1的第一

步，后面还是需要严谨的数学推理和精密的实验来验证，并且对得到的结论、建立的概念、发现的规律乃至表述它们的数学语言进行梳理，才能形成如本专栏前面多篇文章从不同角度论述的那种“简洁、完备、精确”的物理学理论体系。

直觉会有错误和失败，但相较于在茫茫无际的可能性中如大海捞针般找答案，这种“大胆假设”之后“小心求证”的研究模式，显然是高效、可靠、可用的方法。在今

天的物理学前沿探索中，仍是十分常用的方法。

参考文献

- [1] 斯特恩·马赫 著,李醒民 译.力学及其发展的历史批判.北京:商务印书馆,2014
- [2] 伽利略 著,戈革,译.关于两门新科学的对谈.北京:北京大学出版社,2016
- [3] 廖玮.科学思维的价值.北京:科学出版社,2021
- [4] 埃尔温·薛定谔 著,吉宗祥 译.生命是什么.广州:世界图书出版广东有限公司,2016

· 物理新闻和动态 ·

国际首台大动量极低温深紫外激光角分辨光电子能谱系统研制成功并投入使用

角分辨光电子能谱技术(ARPES)是当代凝聚态物理和材料科学研究中最重要的实验手段。在众多前沿物理问题的研究中，如非常规超导体的超导机理、拓扑材料的探索和二维材料的超导与奇异物性等方面，ARPES都发挥着至关重要的作用。中国科学院物理研究所周兴江研究组与中国科学院理化技术研究所许祖彦院士研究组和陈创天院士研究组长期合作，采用我国具有自主知识产权的深紫外激光技术，先后研制成功三台套各具特色的真空紫外激光光电子能谱系统。该系列能谱仪的主要性能国际领先，并具有独特的优势，把光电子能谱技术提高到了一个新的层次。此后，该研究团队继续推动深紫外光电子能谱技术向更高光子能量和更低样品温度进发，于近期成功研制了

“大动量极低温深紫外激光光电子能谱系统”。

该激光光电子能谱系统光源配备了两套具有自主知识产权的177 nm和167 nm深紫外激光，对应光子能量分别为7.0 eV和7.4 eV。7.4 eV的深紫外激光属国际首创，是目前达到的全固态激光光子能量的最高纪录。该仪器采用五轴低温样品台，使用液体He-4预冷、抽取液体He-3制冷的技术，在实现5个自由度(两个转动，三个平动)的条件下最低样品温度达到0.8 K。在此低温下，对多晶金的费米能级展宽测得的总宽度为0.71 meV，验证了整个系统的超高能量分辨率。

这是国际首台样品温度低于1 K的极低温激光ARPES系统，实现了目前光电子能谱技术能达到的样品最低温度，也是目前国际上能正常工作的唯一一台同时实现超低温和超高分辨率的ARPES系统。新的7.4 eV的深紫外激光、创纪录的0.8 K极低温以及好于1 meV的超高能量分辨率，这些优越和独特的性能，使得在极低温度和超高分辨率下对高温超导机理、量子相变、重费米子超导体和拓扑超导体等诸多重要前沿问题的研究成为可能。这一新的开创性的研发工作，将确保我国深紫外激光光电子能谱技术在国际上继续保持领先地位，为进一步研究凝聚态物理关键问题提供高尖端的实验手段。

(中国科学院物理研究所 赵林 周兴江 供稿)

