

现象的关联与背后的原因 ——从开普勒到牛顿

陈征^{1,†} 魏红祥² 张玉峰³ 郑永和⁴

(1 北京交通大学理学院 北京 100044)

(2 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(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)

2021-12-29收到

† email: chenzheng@bjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220109

1 从抽象理念到具体实例

《物理思想进课堂》专栏在2021年度通过12篇文章从原则和目的、层次和结构、范式和方法等较为底层和抽象的方面对物理学的轮廓进行了勾勒^[1]。2022年,专栏将尝试把这些较为抽象的理念融入力、热、声、光、电、磁等基础物理教育的内容中,形成较为具体的专题和实例,以期和一线基础物理教师有更多的探讨。

2 现象与原因

在许多人眼里,物理学是一门“透过现象看本质”的学问。较为谨慎地说,一方面物理学内相当多的前沿领域还处在探究现象与现象关联阶段,暂时还谈不上“本质”;另一方面由于“本质”一词常常给人“终极真理”的感觉,但物理学却随着人类的认识水平不断发展,今天的所谓“本质”明天就可能不够“本质”,因此笔者用“原因”代替“本质”来表述:物理学是一门探究“现象间关联以及现象后原因”的学问。

如2021年专栏多篇文章提到过的,物理学的构建过程大体经过两次“思维经济”:第一次是通过对各种现象进行定量地精确观察,从中归纳总结出现象之间的关联(唯象规

律),形成对自然知识的第一次“思维经济”;然后进一步在逻辑和数学工具的帮助下,探寻这些“表面规律”背后的原因,建立更为简洁、完备、精确的模型和理论(物理理论)来完成第二次“思维经济”^[2]。

经典力学的建立过程是个很好的例子。

3 从开普勒行星运动定律到牛顿运动定律

开普勒基于第谷对行星运动现象的大量观测数据(特别是火星的运行),对其进行归纳和总结,在1609年发表开普勒行星运动第一和第二定律,又在1619年发表第三定律。这三条定律表述为:(1)行星绕太阳运动的轨道是椭圆,太阳处在椭圆的一个焦点上(椭圆定律);(2)行星和太阳的连线在相等的时间间隔内扫过的面积相等(面积定律);(3)所有行星绕太阳一周的恒星时间 T 的平方与它们轨道半长轴 a 的立方成比例(调和定律)^[3]。形成了对第谷行星运动知识的第一次“思维经济”。

轨道是椭圆,太阳在焦点,连线扫过面积与时间的关系,公转周期与轨道长半轴的关系,这些显然都只是现象与现象

的关联,并不涉及“原因”的问题。就好像我们在一只钟表表盘上发现的规律:最长的指针每秒钟动1格,中间长度的指针每分钟动1格,最短的指针每小时动1格,至于它的机芯是机械的、石英的还是某个“精灵”在里面推动,在指针的规律中并不反映。

运动背后的原因到底是什么呢?亚里士多德认为地面上物体的一种运动方式源于组成物体的基本元素(水、火、土、气)回到自然位置的自然本性,称为自然运动(natural motion);另一种则是物体需要受到外界的作用才会运动,作用一旦撤去,运动也就趋于停止,称为受迫运动(violent motion)。天上的天体运动(celestial motion)也算是一种自然运动,它的运动方式是完美又无始无终的匀速圆周运动。

伽利略则用实验来寻找运动的原因。他发现在光滑斜面上同时释放相同形状但不同轻重的滚球,不论斜面角度大小,它们总是齐头并

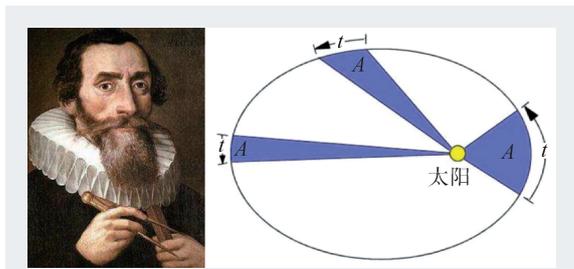


图1 开普勒和行星运动定律

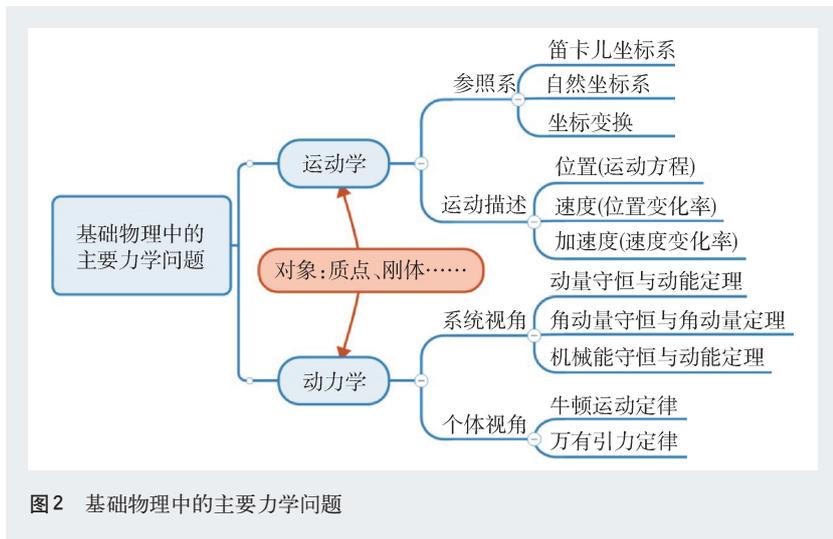


图2 基础物理中的主要力学问题

进(传说中的比萨斜塔实验应该是斜面实验的一个斜面为 90° 的极限情况),这一证据否定了亚里士多德“自然运动”的观点。而当把两个光滑斜面对在一起时,伽利略又发现从一侧滚下的小球,总能到达对面差不多相同的高度。随着对侧斜面变缓,小球在水平方向上滚出的距离也越长,那么在极限情况下,当对面的斜面达到水平时小球也将持续滚动下去。这意味着一个物体的运动并不需要外力的维持,亚里士多德的“受迫运动”,即力是物体维持运动的原因也是不对的。伽利略把物体不受外力而维持运动状态的性质称为惯性(inertia),不过他认为的惯性运动(inertial motion)是沿着地球表面的匀速圆周运动。

牛顿在伽利略对运动原因探究的基础上审视开普勒的行星运动定律,建立起一套揭示行星运动原因的理论,也是地面上的物体各种运动共同遵循的法则——牛顿运动定律:

(1)物体在不受外力或合外力为零的情况下将保持静止或匀速直线运动的惯性运动状态。

这是对伽利略惯性概念的继承和发扬(匀速直线运动),同时也提

供了惯性运动的判断依据——不受外力或合外力为零的物体一定在做惯性运动,于是我们就能以这个物体为参照物建立惯性参照系(inertia reference frame)。伽利略相对性原理告诉我们“一切惯性参照系中力学规律保持不变”(相对论将其进一步扩充为“一切惯性参照系中物理规律保持不变”),换句话说在一个惯性系中成立的力学规律在所有惯性系中都成立且形式不变。这为构建一个简洁、完备、精确、普遍适用的物理理论奠定了基础。

(2)具有一定动量的物体,在外力作用下,其动量随时间的变化率同该质点所受的外力成正比,并与外力的方向相同。

$$F = \frac{dp}{dt} = ma.$$

既然力是物体运动状态发生改变的原因,力和物体运动状态改变之间的准确关系是什么呢?牛顿第二定律给出了定量的回答,质点所受的外力与其加速度成正比。这个比例系数的大小与物质的多少有关,同时反应了物体运动状态改变的难易程度,牛顿将其称为“惯性质量”。

需要说明的是,牛顿第二定律

中的动量或是加速度,都是在依据牛顿第一定律确定的惯性参照系基础上描述的,所以第一、第二定律是各自独立的,牛一律不能视为牛二律外力为零的特例。

(3)相互作用的两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等,方向相反,作用在同一条直线上。

牛顿第三定律是不能由第一、第二定律推出的,是建立在大量实验基础上的一条独立定律。在惯性定律的基础上,牛顿第二定律给出了外力和物体的加速度成正比的关系,然而这里只有加速度 a 可以通过直接测量获得。力和惯性质量是两个相互关联的量,但其绝对数值的确定却需要借助牛顿第三定律。由于两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等,方向相反,作用在同一条直线上,那么相互作用的两个物体其加速度大小之比恰好是二者惯性质量之比的倒数,我们定义一个惯性质量的基准(如过去采用的国际千克原器),那么其他物体的惯性质量就可以通过与基准物体相互作用,对两者加速度的直接测量而得到:

$$m = m_0 \cdot \frac{a_0}{a}.$$

牛顿运动三定律既相互独立又构成一个有机整体,定量地解释了各种运动背后的原因——不受力或合外力为零的物体保持惯性运动,而物体运动状态发生变化的原因则是受到了力。辅以万有引力定律,牛顿力学体系几乎能够解决宏观低速情况下的所有力学问题,完成了第二次“思维经济”。

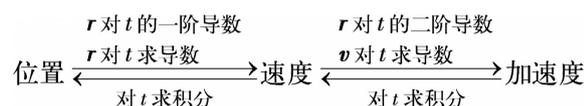
当然,万有引力定律——任何两个物体都存在通过其连心线方向上的相互吸引的力,其大小与它们质量的乘积成正比,与它们距离的

平方成反比，显然还是现象和现象之间的关联，至于引力产生的原因是什么，目前我们仍不知道。

4 基础物理中的“运动学”与“动力学”

运动学(kinematics)是从几何的角度描述和研究物体位置随时间的变化规律，开普勒行星运动三定律是典型的运动学规律。而动力学(dynamics)则是研究运动的变化与造成变化的原因，牛顿运动定律是动力学规律。

基础物理的力学大体由运动学和动力学两部分构成，具体如图2所示。其中运动学的部分大体只有两类问题：(1) 已知物体的位置随时间的变化规律通过微分得到速度、加速度；(2) 已知物体的加速度、速度，通过积分结合初始条件确定位置随时间的变化规律。



第(1)类问题配合动力学其实就是根据运动变化的现象寻找原因的过程；而第(2)类问题则是根据受力或动量的情况推断运动变化现象的过程。

中学阶段由于缺乏微积分和向量代数等数学工具，通常处理的都是较为特殊的情况。从最基本的惯性运动——匀速直线运动开始，物体由于受力而发生运动状态改变时，通常也只处理几种简单情况：

(1) 匀变速直线运动：加速度大小不变，方向不变且与速度方向平行；

(2) 匀速率圆周运动：加速度大小不变，方向始终与速度方向垂直；

(3) 抛体运动：加速度大小、方向均不变，方向与速度方向有一定角度。

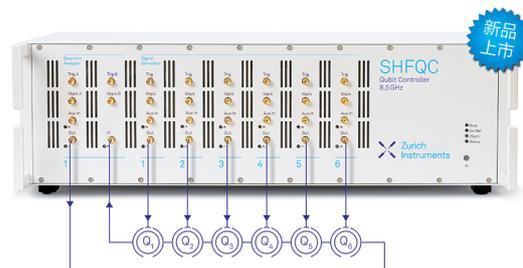
在这个基本脉络之下，运动与力的问题便可提纲挈领、纲举目张，剩下的就是分析和计算技巧问题了。

参考文献

- [1] 皮埃尔·迪昂. 物理学理论的目的与结构. 北京: 商务印书馆, 2005. p.39
- [2] 魏红祥等. 从“学会已知”到“探索未知”——物理思想进课堂专栏年度回顾与展望. 物理, 2021, 50(12): 853
- [3] 威世强. 牛顿万有引力定律的发现渊源——从所谓的开普勒定律到万有引力定律. 物理, 1998, 27(9): 557

苏黎世仪器推出一体化量子测控仪：一机即可完成量子测控

苏黎世仪器



亮点

苏黎世仪器推出的SHFQC量子测控仪，可以同时高达6个量子比特进行控制、读取和快速反馈测试。SHFQC支持高达8.5 GHz的测控频率，无需混频器校准，并提供1 GHz无杂散动态范围的高带宽。

概述

SHFQC拥有6个信号发生器控制通道和1个单独的量子态读取通道，每个通道都可以单独控制和触发。仪器内部数据和触发可自由设置，从而实现量子控制系统的灵活配置，比如快速反馈。每个通道都有一个任意波形发生器(AWG)，AWG的定序器功能可高效地编辑脉冲波形序列，来生成复杂的门控序列。单个读取通道可实时交错读取，或者并行读取多达16个qubits、8个qutrits或5个ququads。可自定义的多个匹配滤波器可以提高读取信号的信噪比，与其紧密集成的控制通道可降低反馈延迟。仪器提供了多个高效便捷的功能模块，比如快速谐振腔扫频，并可通过LabOne软件、LabOne QCCS软件或Python API集成到量子测控系统，从而简化并加速系统的表征、调谐以及算法的执行。

应用

SHFQC可无缝集成到任何现有的苏黎世仪器的量子计算测控系统，同时它还新增了一体机快速反馈功能，可提升已有的量子比特纠错能力。单台SHFQC高度集成，方便了小规模量子计算系统的搭建，同时也可以使用多台SHFQC来扩展支持大于100个量子比特的系统。

021-64870285
www.zhinst.cn

Zurich
Instruments