

物理学的理论和实验检验

牛顿给出了行星轨道的运动方程。这可以看做是理论物理学的起点(也可以堪称是物理学的起点,甚至可以看作是科学的起点)。自那以后,物理学是如何发展的,也就是说,人们是如何不断地探索新的物理规律的?我们来回顾一下。

以往的物理学理论的提出

起初,人们在日常生活中,接触到了自然界中的各种现象。人们就想探究其中的原因。所以,人们就反复地观察,总结其中的规律。

因此,长久以来,物理学问题的求解过程是如下这样的。先观察实验,从实验上总结规律。一开头是伽利略对于运动的持久性的观察。他由此推测,一个运动着的物体不受力的话,它会永远运动下去。牛顿定律就是从大量的实验事实中总结抽象出来的。万有引力定律也是从实验上总结出来的。

后来,从实验上总结规律的典型事例有:气体的等温,等压,等容三种情况下的气体状态方程,他们分别由三个人各自独立观察得到,所以,就以这三个人的名字名为玻意耳定律,盖吕萨克定律和查理定律。进而把这三条定律综合在一起,得到理想气体的状态方程。瑞士的一个中学物理教师巴尔末从氢原子的一套最强的光谱总结出了一个统一的公式,称为巴尔末线系,后来,其他人从氢原子的其它光谱系列分别总结出了帕邢线系,普芳德线系,等等。普朗克从黑体辐射的实验曲线总结出了黑体辐射定律。法拉第的电磁感应定律,麦克斯韦综合了许多实验,总结出了麦克斯韦电磁场方程组。门捷列耶夫总结了各种已发现元素的原子量和电荷量,列出了元素周期表。热力学第一定律,也就是热力学系统的能量守恒定律,也是从实验上总结出来了。克劳修斯和开尔文分别从大量的实验事实中总结出了热力学第二定律,分别给出了这个定律的克劳修斯表述和开尔文表述。同时,克劳修斯引入了熵的概念,这样就可以定量地表达热力学第二定律了。等等等等。从大量的实验事实总结出理论的规律,这样事例很多。

总结实验事实的时候,带有猜测的性质。猜测,就是直觉。猜对了,就是天才的表现。

这些实验事实的特点是,大量的实验事实可以在日常生活中被观察到,或者可以在实验室里使用仪器反复产生。由于这样的可重复性,易观察性,所以,要总结其中的规律并加以验证,就非常明确了。在科学发展的过程中,有比已经做出上述贡献的更加多得的人,也对同样的科学内容做出了各种总结,猜测,但是,不能经受检验的理论,都被淘汰了。只留下了经得住反复检验的理论。

进入 20 世纪之后的新情况

但是,进入 20 世纪之后,情况有所变化。

这时,人类的研究领域,在两个层次上有了发展。人们的研究已经不限于日常生活中所见到的现象和实验室里能够反复产生的现象。人类的视野朝着微观和宇观两个方面伸展。

微观领域,从分子尺度,原子尺度,亚原子尺度,再往深入。涉及到基本粒

子及其起源的研究，这需要极高的能量来产生基本粒子。

宇观方面，就是在 100 亿光年的尺度上，对于宇宙起源，发展演化的研究。这两个领域，都不是在人们日常生活中所能够接触到的范围内。

这两个领域的特点是，实际上发现的现象，只能借助于精密的仪器来观察。而且实验不是那么容易做的，实验的重复率是不能得到保证的。

在这种情况下，想要从大量的实验事实来总结出物理规律，已经是不现实了。

那么新的物理规律如何来挖掘呢？物理学家找到了一个方法，就是变分原理。而数学家已经为此准备好了变分法这种数学工具。

十七世纪，由于解决悬链线问题，最速降线问题和测地线问题的需要，而发展了变分法。18 世纪出现了变分法的欧拉-拉格朗日方程。一般都简称拉格朗日方程。哈密顿，拉格朗日等人发现，经典力学系统的运动方程，其实是可以通过拉格朗日方程来推导的。前提当然是拉格朗日量，简称拉氏量，必须是正确的。好在经典力学系统的拉氏量特别简单，它就是系统的总的动能减去总的势能。

后来，人们把这种方法移植到非经典力学的系统中。发现也是可以用的。例如，对于电磁场，给出合适的拉氏量之后，就可以通过拉格朗日方程推导出麦克斯韦电磁场方程。这个内容在我的《物理学中的数学方法》一书的 1.7.1 小节中有介绍。对于相对论力学系统，也可以找到相应的拉氏量。这就是我的(中文版)书中的(1.7.32)式。

不过，在非经典力学系统中，拉氏量就不见得是系统的动能加上势能了。例如相对论力学系统的拉氏量，原来应该是动能的部分，现在是一个负的量。不管怎样，只要能够推导出正确的运动方程，就是正确的拉氏量。相对论的运动方程已经预先知道了，所以，尝试了之后，发现这个拉氏量是正确的。

因此，现在要正确地描述一个系统的运动，首先就是要找一个正确的拉氏量。

现在理论物理学家要寻找新的规律，就是寻找拉氏量。由于是要找新的运动规律，没有现成的方程可以来检验，所以只能是凭经验和直觉来猜。猜出一个拉氏量，如果由此得到的结果与实验观测符合，那么这就是正确的理论。否则只好另做。在这个过程中，许多人在猜拉氏量。

通过变分法，可以从拉氏量推得运动方程。从这个角度上来说，运动方程是可以从拉氏量推导得到。对于围观粒子的运动，例如电子，无法根据观察来总结出其运动方程。就只好先根据变分法来推到其运动方程。然后看，有这个运动方程计算出来的物理量是否与实验观测所符合。薛定谔就是根据这个步骤推到了薛定谔方程。这是量子力学的起点。(薛定谔的原文请看：Schrödinger E. *Annalen der Physik*, 1926, 79(4); Schrödinger E. *Collected Papers on Wave Mechanics*[M] (Translated from the second German edition) London and Glasgow: Blackie & Son Limited, 1928.)因此，可以说，薛定谔是第一个根据变分法从理论上推导出粒子的运动方程的，而不是从大量的实验事实中总结出这样的运动方程。

在薛定谔之后，在微观和宇观的两个方面，更不可能从实验来总结物理规律了。只能先从猜测拉氏量出发，推到运动方程，计算物理量，看它们是否与实验观测的量符合。如果符合，说明这个理论是正确。

以下讲三个例子。

提出新理论的三个例子

第一个例子，统一场论。

人们已经发现自然界有四种最基本的相互作用力。依照这些力被发现的时间顺序，分别是万有引力，电磁力，强相互作用力和弱相互作用力。那么，人们就想，是不是相互作用都是由一个拉氏量来体现？一个拉氏量，在不同方面的体现，就是这个方面的作用力？因此，就致力于将不同的基本相互作用归入到一个拉氏量中。这就是爱因斯坦开始想搞的统一场论。他没有搞出来。

后来，人们就逐步发展。首先，是发现电磁力和弱相互作用力是可以统一起来的。也就是说，猜到了一个正确的拉氏量，它的两种情况下，分别表现为电磁力和弱相互作用力。

人们继续寻找，发现强相互作用力，也能够和电磁力，弱相互作用力统一起来。所以，到目前为止，已经有三种基本里统一了。只剩万有引力。万有引力的性质是比较特殊的。它虽然和电磁力一样，是与距离平方成反比的长程力，但是，它只有吸引力没有排斥力。而电磁力是既有吸引又有排斥力。人们还在继续努力，试图把四种基本作用力最终能够统一起来。也就是说，要猜一个更为全面的拉氏量，它能够在不同的情况下，分别体现出这四种相互作用。

第二个例子，发现基本粒子。

基本粒子的理论模型，也是有一个基本的拉氏量。它在不同方面的表现，出现不同的基本粒子。现在所说的基本粒子，由于能量很高寿命很短，所以，实际上是某种共振态。如果这个拉氏量导出以前还没有发现过的共振态，那么，这就是发现了新的基本粒子了。从理论模型，可以计算这种新的基本粒子的能量和寿命，它是在什么条件下产生的。等等。然后在加速器上做实验，看能否发现这种粒子，或者是这种粒子带来的一些现象。

由于首先是理论计算，预言某些可能出现的现象，所以，这样的科研论文可以是预先写好的。只不过，其中用到的实验数据需要根据实验观察的结果来填写。如果实验观察的结果与理论的预期符合，那么，说明这个理论是正确的。如果没有观测到相应的实验结果，那么，这个理论基本上是白做了。论文也就白写了。

世界上最大的加速器，处于法国和瑞士边界的欧洲加速器中心，每年有将近一个月的时间开动起来，产生数据。其余的时间都是检修维护阶段。实际上开动的的时间要低于每年一个月。那么，理论组会在加速器开动之前，写完文章。一旦机器开动，探测器记录基本粒子相互碰撞的数据。科学家找到合适自己论文的实验数据之后，把实验数据填写进已经写好的论文中。第二天就可以向杂志社投稿了。当然，这儿说的是比较稀少的成功的例子。

这样，物理学在基本粒子物理和天体物理这两方面，现在就进到了这样一个程度：先写出拉氏量，理论推导计算得到数值结果。然后观测实验，如果实验的数据与理论符合，就说这个理论是正确。有时候，这样做出来的理论很难或者根本就无法检验。但是没有办法，人类现在就只能做到这一步了。这特别体现在第三个例子上。

第三个例子，引力波的探测。

爱因斯坦根据广义相对论理论，认为万有引力是依靠引力波以光速来传递的。那么，大家就想从实验上来寻找引力波。可是，引力波实在是太弱了。想了

各种办法，都没有探测到。一个最大的仪器是花了几十亿美元建造的叫做 LIGO 的探测器。这个探测器利用光的迈克尔孙干涉仪。干涉臂长是 4 公里。由于引力波实在太弱，这个仪器的精度是 10^{-21} 次方。(LIGO 的工作原理可参看：曾定方，引力波背景下的电磁波，《物理与工程》第 27 卷，第 3 期，76(2017))理论上认为，一对黑洞，也就是双星系统，在发生碰撞的时候，释放出的引力波要比平时强很多。这样的引力波传播到地球上，就应该被这个仪器观测到。也就是说，这个仪器应该表现出适当反应。

可是，这个仪器做成了将近 20 年，还没有观测到引力波。这并不是说这个仪器没有反应。这个仪器一直有反应。这是因为，宇宙中有很多的射线，伽马射线，粒子射线，太阳风，等等，是很多的。但是这些从宇宙的近处或者深处来到地球的粒子或者波，不是信号太强，就是太弱，不在理论预计的引力波的量级范围内，所以，就认为都不是引力波的信号。直到 2016 年 2 月份，探测器的反应刚好与理论预期的符合。那么，就认为，找到了引力波，而且，引力波源是在 13 亿光年远处。也就是说，在这么远的距离处，在 13 亿年之前，在这个位置上两个黑洞发生了碰撞，或者说，相互合并。产生了引力波，经过 13 亿年的奔波，今天传播到了地球上。这是实验观测是两个团队合作的成果。这个已经写好了十几年一直在等着的论文，终于填上实验结果，发表了。后来大概过一个月，又探测到一次信号。

自那以后，仪器就再也没有反应过。

所以，现在对于宇宙深处的实验事实的研究到了这样一个地步：如果人们观测到的实验数据在理论预测的范围内，那么，就认为理论是正确的，被实验所证实的。这样有一个实验结果证实，就算是证实。只有一个实验结果也没有观测到，才说，这个理论不知道是否正确。

现在，科学界主流认为，引力波已经找到了，尽管还有反对的声音。

这样找到的引力波，是没有办法进一步验证的。这也是没有办法的事情。因为这样的物理过程的发生，不是人们能够控制的实验。

这三个例子就是为了说明，现在的物理学在基本粒子和天体物理的两个层次上，只能从拉氏量着手来进行研究。除此，没有什么别的好的办法。