

# 物理学中的悖论

邱也容 厉光烈



悖论又称佯谬,就是逻辑矛盾。它是一个哲学命题:假设该命题为真,则可逻辑地推导出它为假,反之亦然。举一个大家都熟悉的例子——《两小儿辩日》:孔子到东方游历,途中看见两个小孩在争论,就问他们辩论什么,一个小孩说:“我认为太阳刚出来时距离人近,而正午时距离人远。”另一个小孩却认为太阳刚出来时离人远,而正午时离人近。前一个小孩解释说:“太阳刚出来时大得像车上的篷盖,等到正午时就像盘子碗口那样小,这不正是远的显得小、近的显得大吗?”另一个小孩反驳说:“太阳刚出来时清凉凉,等到正午时就热得像把手伸进热水里一样,这不正是近的就觉得热、远的就觉得凉吗?”两个小孩的观点各有依据,让孔子难断是非,两个小孩嘲笑说:“谁说你知识丰富呢?”

这就是一个悖论,而且是一个与物理学有关的悖论<sup>\*</sup>。在物理学的发展过程中,一些理论自身的不完善或者理论之间的不相容往往导致悖论的产生,而这些悖论引起的论辩又反过来验证和完善了物理理论,甚至导致新理论的创建。下面就是几个例子。

## 一、“追光”悖论与狭义相对论

爱因斯坦从牛顿力学和麦克斯韦电磁场理论的不相容中提出的“追光”悖论,就是他创立狭义相对论的逻辑思维出发点。他在《自述》中这样说:“经过十年沉思以后,我从一个悖论中得到了这样一个原理(指狭义相对论)”。这个悖论是他在16岁时无意中想到的:“如果我们以光速(指真空中的光速)追一条光线运动,那么我们会看到,这样一条光线就好像是在一个空间里停滞不前地震荡着的电磁波。可是无论依据经验还是按照麦克斯韦方程组,看来都不会有这样的事情”。爱因斯坦在这段话里提出一个“追光”的假想实验:一个以光速追随光线运动的人,按照牛顿力学,看见的光波应是驻波,而麦克斯韦方程组给不出这样的驻波。“追光”悖论就这样产生了,它表明牛顿力学与麦克斯韦电磁场理论存在着不相容,这种不相容只在运动速度达到或接近光速时才会出现。因此想靠实验发现这种不相容在

当时是不可能的,但爱因斯坦却靠这样一个假想实验创立了狭义相对论。对于习惯于一般逻辑思维的人,这是难以想象的,所以当时很少有人能够理解狭义相对论。

## 二、双生子佯谬与广义相对论

爱因斯坦将狭义相对论发展成广义相对论,是从一个叫“双生子佯谬”的悖论开始的。根据狭义相对论,两个事件之间的时间间隔不是绝对的,其长短会随着运动状态的变化而改变。任何观察者都会发现:当运动速度接近光速时,相对于他做匀速运动的所有过程,都会比相对于他静止的同样过程进行得慢一些,这就是所谓“时间迟缓”效应。爱因斯坦设想有一对双胞胎甲和乙,甲坐速度接近光速的宇宙飞船去做宇宙飞行,当他返回地面同乙会面时,甲就会显得比乙年轻。但是由于运动是相对的,以宇宙飞船为参照系,甲可以认为自己静止而乙相对宇宙飞船运动,从而又推出乙显得比甲年轻。双生子佯谬就这样出现了,它就是爱因斯坦将狭义相对论发展成为广义相对论的思维出发点,或者说爱因斯坦就是根据这样一个悖论发现了广义相对论。

## 三、宇宙有限无限之争与爱因斯坦静态宇宙

宇宙是有限的,还是无限的?这是一个长期争论不休的问题。

如果宇宙有限,它就总有个边界、有个中心。可是它的边界和中心在哪里?边界之外又是什么?如果边界之外还有东西,那么边界之内就没有整体性,就够不上称为宇宙;如果边界之外没有东西,那么从不同地方看(比如从有限区深处和边界附近看),宇宙会明显不同,这不符合宇宙学(哥白尼)原理。同样,存在中心这种特殊地方也不符合宇宙学原理。

如果宇宙无限,那么夜里为什么会天黑?大家知道,一个恒星如果离我们近,就会显得明亮;离我们远,就会显得暗淡。但是远处的星多,按照宇宙学原理,恒星在宇宙中均匀分布,那么在无限宇宙中,无论白天还是黑夜,从各个方向上看都应当一样亮,就像太阳一样耀眼。这就出现了一个悖论,即奥伯斯佯谬。另外,如果宇宙无限,那么万有引力定律就不再适用。例如地面上的1斤苹果,主要是通过测

现代物理知识

量地球对苹果的引力称重的,并不考虑包括太阳和月亮在内的其他天体对苹果的引力。可是严格地讲,这些天体对苹果都有引力。远处的天体引力虽小,数量很多,总效果未必很小,测量结果变成一个不确定的量 $\infty - \infty$ ,这就是西利格佯谬。

持宇宙有限论的人无法回答宇宙的边界和中心在哪里,持宇宙无限论的人同样无法解释奥伯斯佯谬和西利格佯谬。后来,爱因斯坦提出广义相对论,用空间弯曲的宇宙(爱因斯坦静态宇宙),即用“四维时空”中的“三维球面”描述我们生活其中的“三维空间”,解决了这场论争。因为“三维球面”既无边界、也无中心,虽然无限、但却“有界”,于是上述问题(包括奥伯斯佯谬和西利格佯谬)都可得到圆满解释。

#### 四、质光悖论与宇宙大爆炸论

现代宇宙学中的宇宙大爆炸论,是以“质光悖论”为契机,探讨天体系统的膨胀现象而得出的。“质光悖论”的内容是:如果假设爱因斯坦静态宇宙中的星系团是稳定的,那么就可估算出组成星系团的各星系的质量,进而计算出各星系的动力学质量,但是计算结果与用星系团光度估算出来的质量完全不符,前者比后者大几十倍,甚至几百倍。但是如果假设星系团甚至宇宙不处于稳定状态,而是在不断膨胀,就可化解上述矛盾。既然宇宙在不断膨胀,那么开始时就可能缩成一团,然后通过大爆炸向各个方向散开,这就形成了宇宙起源于大爆炸的想法。1929年哈勃通过望远镜观察到许多星系正在不断远离我们而去,从而证实了宇宙确实在不断膨胀。1965年彭齐亚斯和威尔逊发现宇宙微波背景辐射,进一步验证了宇宙大爆炸理论。

#### 五、“麦克斯韦妖”与热力学第二定律

1850年,克劳修斯在卡诺工作的基础上将能量守恒和转化定律与卡诺定理统一起来。他指出:一个自动运作的机器不可能把热从低温物体移到高温物体而不发生任何变化,这就是热力学第二定律。不久开尔文又提出:不可能从单一热源取热,使之完全变为有用功而不产生其他影响;或不可能用无生命的机器把物质的任何部分冷却至比周围最低温度还低,从而获得机械功。这就是热力学第二定律的“开尔文表述”。奥斯特瓦尔德则将其表述为:第二类永动机不可能制造成功。在提出热力学第二定律的同时,克劳修斯还提出了熵的概念 $S(\text{熵}) = Q(\text{热量}) / T(\text{温度})$ ,并将热力学第二定律表述为:孤立

系统中实际发生的过程总是使整个系统的熵增加。但从此之后,克劳修斯就错误地将孤立体系中的熵增定律扩展到整个宇宙,认为在整个宇宙中热量不断地从高温转向低温,直至一个时刻不再有温差,宇宙总熵值达到极大。这时将不再有任何力量能够使热量发生转移,这就是“热寂论”。

在热力学第二定律成为物理学家的热门话题时,麦克斯韦为批驳“热寂论”设想了一个无影无形的精灵——“麦克斯韦妖”,它守在一个盒子中的一道闸门边,允许速度快的微粒通过闸门到达盒子的一边,而让速度慢的微粒通过闸门到达盒子的另一边。这样经过一段时间后,盒子两边便会产生温差,建立秩序,实现熵的自发减少,这似乎推翻了热力学第二定律。直到20世纪50年代,人们利用“信息熵”或“负熵”概念才弄清楚“麦克斯韦妖”并不违背热力学第二定律。这是因为,小精灵为了完成分子动能的有效转移,必须获得分子运动的信息。为此,例如设法用光照亮分子以辨别其速度大小,这样所引起的熵增加足以抵消转移分子动能所减少的熵。因此将外光源、小精灵、气体作为整体,熵仍然单调增大。其实“麦克斯韦妖”只是开放系统的一个组成部分,靠外界输入能量或信息执行某种任务。生物化学中的各种酶就是一个实例,它们并不违背热力学第二定律。

#### 六、“薛定谔猫”与量子力学叠加原理

“薛定谔猫”是薛定谔为了证明“量子力学是不完备的”而提出的一个假想实验:一个箱子里有一只活猫、一瓶毒药和一个盒子,盒子里有放射性原子和一个激发装置。关上箱子,当放射性原子衰变放射出一个 $\alpha$ 粒子时,激发装置被激活,打破盛有毒药的瓶子,释放毒药毒死那只可怜的猫。如果放射性原子不衰变,瓶子就不会打破,毒药也不会释放,猫就仍然活着。按照量子力学叠加原理,放射性原子总是处在衰变与不衰变的叠加状态,因此激发装置也应处在激发与不激发的叠加状态,毒药也应处在释放与不释放的叠加状态,猫就因此处在“或死或活”的不定状态。这显然令人难以理解——日常生活中见到的猫,不是活的、就是死的。有人会说,那就是“半死不活”的猫。可是严格来讲,“半死不活”也是活的,它与这里所说的“或死或活”并不是一回事。这显然是谬论,因此薛定谔说量子力学是不完备的。

那么这种状态到底是否存在呢?其实,感觉和

经验有时并不可靠。不久前,实验就发现了这样的状态,当然不是真的发现了“或死或活”的猫,而是找到了玻色凝聚体可以处在相距几毫米的位置 A 与位置 B 的叠加状态。“薛定谔猫”的本质就是存在宏观态的叠加,而位置 A 与 B 虽然只相距几毫米但对量子力学来说已经是不同的宏观态了。实验就这样证实了量子力学并不像薛定谔想象的那样不堪一击。

### 七、EPR 佯谬与量子纠缠态

为了与哥本哈根学派的代表人物玻尔辩论,爱因斯坦提出了许多理想实验,其中最著名的就是他与玻道尔斯基和罗森共同提出的“EPR 佯谬”(EPR 分别是他们三人姓氏的第一个英文字母)。EPR 佯谬是,如果一对处于“量子纠缠态”的粒子(譬如处在相同动量状态的一对电子,按照泡利不相容原理,它们必然是一个自旋向上、一个自旋向下)分道扬镳,各自朝相反方向飞行一段距离后,此时测量其中一个粒子,不仅能确定该粒子的状态(譬如测出其中一个电子的自旋向上),而且也能同时确定已在远处的另一个粒子的状态(即另一个电子的自旋一定向下),这是因为两个粒子之间存在量子相关作用(即上面提到的泡利不相容原理)。这个理想实验将量子力学的结论与相对论中同时性的相对性对立起来,乍一看两者必有一个是错的,即 EPR 佯谬似乎是一个判决量子力学对错的实验。几十年来,不断有人在做这个实验,最新的结果再次证明了量子力学结论的正确性——量子相关作用确实存在。

EPR 佯谬从假想实验开始,引发了许多真实实验。在此过程中,人们不仅加深了对量子力学和相对论的理解,而且从中萌生了研制量子纠缠态的想法,并据此提出了量子纠缠态一些可能的应用——量子通讯、量子密码甚至量子计算机。

### 八、吉布斯佯谬与量子统计理论

美国物理学家吉布斯曾对带隔板的容器内同种分子组成的理想气体在抽去隔板前后熵的变化进行了计算,最初他是用经典配分函数

$$Z = (1/h^f) \int \exp[-E(p_s, q_s)/kT] d\Gamma。$$

其中,相空间  $\Gamma$  中的宏观无限小体积元  $d\Gamma = dp_1 dp_2 \dots dp_f dq_1 dq_2 \dots dq_f$ ,  $f$  是系统的自由度,  $p$  是广义动量,  $q$  是广义坐标。他得出的结果是气体的熵在隔板抽去后增加了。但实际上,用一隔板将固定容器中同一种理想气体分成温度和压力都相等的两部分,抽去隔板的过程则是可逆的,并不影响系统

按微观状态的分布,因此隔板抽去前后系统的总熵不应改变。这就是所谓的吉布斯佯谬,其实是统计物理学中受经典理论局限导致的一个错误结论。为了解决这一矛盾,吉布斯修正了最初的配分函数,加上一个因子  $1/N!$  (其中  $N$  为系统的粒子数)。他用修正后的配分函数重新计算,终于得到合理的熵变,消除了佯谬。但是吉布斯并未弄清为什么要加上因子  $1/N!$ 。直到量子统计理论建立后,才从根本上解释了他的疑问。

经典统计理论把粒子看作是可分辨的:交换任何两个处于不同位置的粒子,系统就属于两种不同的微观态。如果  $N$  个粒子交换位置,就要产生  $N!$  个新的不同微观态。而量子统计理论则把粒子看作是不可分辨的:对调任何两个粒子都不会增加新的微观态。因此分子间  $N!$  种可能的排列就不应引起物理上的不同情况,即经典配分函数中不同状态的数目被扩大了  $N!$  倍,所以应加上一个因子  $1/N!$ 。而由量子统计理论导出的配分函数中会自然出现这个因子,吉布斯佯谬问题就这样解决了。

物理学研究是一种探索性活动。探索性思维可以有许多不同的方式,悖论就是其中一种特殊方式,它们所引起的论辩在物理学的发展过程中曾经和正在起着重要的推动作用。从上述例子中不难看出:“追光”悖论致使爱因斯坦发现了狭义相对论,而它又源自牛顿力学和麦克斯韦电磁场理论的不相容;双生子佯谬产生于狭义相对论,而它引起的论辩又致使爱因斯坦发现了广义相对论;吉布斯佯谬因经典统计理论存在局限而提出,它的解决却导致了量子统计理论的创建。悖论显然产生于旧理论,而它的解决却催生了新理论。在经典物理(包括牛顿力学、麦克斯韦电磁场理论和玻尔兹曼统计理论)到现代物理(包括相对论、量子力学和量子统计理论)的发展过程中,悖论及其引起的论辩起着十分关键的作用。在物理学的应用领域中,悖论及其引起的论辩也同样起着十分重要的作用。进入 21 世纪,电子计算机的快速发展将趋于极限,取而代之的将是量子计算机,而“薛定谔猫”所揭示的宏观态叠加原理被实验验证,将使平行计算功能以指数增长的量子计算机取代以线性增长的传统计算机;EPR 佯谬涉及的量子纠缠态作为量子密码术的重要组成部分将使未来的光通讯“绝对”安全。此外还应指出的是:为解决“麦克斯韦妖”与热力学第二定律的

# 庞加莱于物理学的贡献

邓天华 田泽兴

庞加莱的研究和贡献涉及数学的各个分支,例如函数论、代数拓扑学、阿贝尔函数和代数几何学、数论、代数学、微分方程、非欧几何、渐近级数、概率论等,当代数学不少研究课题都能追溯到他。作为数学家的庞加莱也是一位影响深远的物理学家,他的研究工作涉及天文学、光理论、电磁理论、相对论等物理学分支。

## 庞加莱生平

朱尔·昂利·庞加莱(Jules Henri Poincaré) 1854年4月29日生于法国南锡(Nancy)的一个显赫世家。他的父亲莱昂(Léon Poincaré)是一流的生理学家和医生、南锡医科大学教授,才华出众、善良又有教养的母亲把一生心血全部倾注于照料和教育孩子。其叔父安托万(Antoine Poincaré)曾任国家道路桥梁部检查官。庞加莱的堂弟雷蒙(Raymond Poincaré)曾于1911年、1922年、1928年几度组阁,任总理兼外交部长,并于1913年1月~1920年初担任法兰西第三共和国第九届总统。

庞加莱5岁时罹患一种当时看来非常严重的传染病——白喉,致使其喉头麻痹达9个月之久,语言功能也受到极大损害,这一不幸导致庞加莱不能进行剧烈运动,这样一来阅读便成了他的主要娱乐。庞加莱的阅读速度快得惊人,能迅速、准确、持久地记住读过的内容;他甚至能指出某句话是在书中的第几页。

矛盾而引入的“信息熵”或“负熵”概念已在信息科学和生命科学中得到广泛应用。

悖论,作为一种科学的思想方法,是物理学研究的一种重要手段。首先,悖论可以激发积极主动的探索性思维。遵循这条思路,便可揭示一个概念或一种理论所存在的深刻内在矛盾。一般来讲,一个概念或一个理论中存在悖论,并不意味着概念或理论完全错误,只是反映它并不完善:包括适用范围的局限性和应用它的条件限制。在扩展有关概念、完善有关理论之后,悖论便可消解。其次,发现和提出悖论仅仅是开始,只是暴露了原有概念或理论中存在的问题。要建立新的概念、新的理论,还需要大量

庞加莱于1862年进入南锡中学。虽然最初各科学学习成绩十分优异,但他对数学并无特殊兴趣。大约在15岁时,庞加莱显露出非凡的数学才能。从此,他习惯于一边散步、一边解数学难题。

1870年7月19日爆发的普法战争使庞加莱不得不中断学业。法国战败,许多被占领的城乡被德军洗劫一空。为了解时局,他很快学会了德文,德军的暴行使他成为一位满腔热忱的爱国者。战争结束后,庞加莱继续学业,并于1872年两次荣获法国公立中学生数学竞赛头等奖,从而于1873年被高等工科大学以第一名录取。

1875~1878年,庞加莱在高等工科大学毕业后又进入高等矿业学院,打算当采矿工程师,于是数学便成了他的业余爱好。直到在研究一个微分方程问题时得出意想不到的结果,他才认识到自己的天赋所在。

1879年8月1日,庞加莱撰写了关于微分方程的博士论文,获得博士学位。同年12月被卡昂(Caen)大学聘为数学分析教授,正式开始他的数学生涯。1881年任巴黎大学教授后,他一生的科学事业就和巴黎大学紧紧地连在一起。1906年,庞加莱当选为巴黎科学院主席;1908年被选为法国科学院院士,这是一位法国科学家所能达到的最高地位。1912年7月17日,庞加莱因血栓梗塞逝世于巴黎,享年58岁。

艰苦的研究。第三,悖论对推动物理学的发展永远有益:无论物理学发展到什么程度,一些概念和理论总会不可避免地出现悖论。顺便指出:比较完备的物理学理论体系一旦受到冲击,往往就会出现新概念、新理论,解释那些违反“常规”的现象,以修正或完善原有的理论体系,而不是完全推倒原有的“那座物理大厦”。

(江苏省南京市晓庄学院物理系 210017)

\* 现在运用光的散射可以解释这个悖论:太阳刚出来时,太阳光穿过的大气层比正午时要厚。由于光的散射,太阳的影像就显得大,热度就显得弱。孔子及其同时代的人对“光的波动性”一无所知,因此无法回答两个小孩的问题。