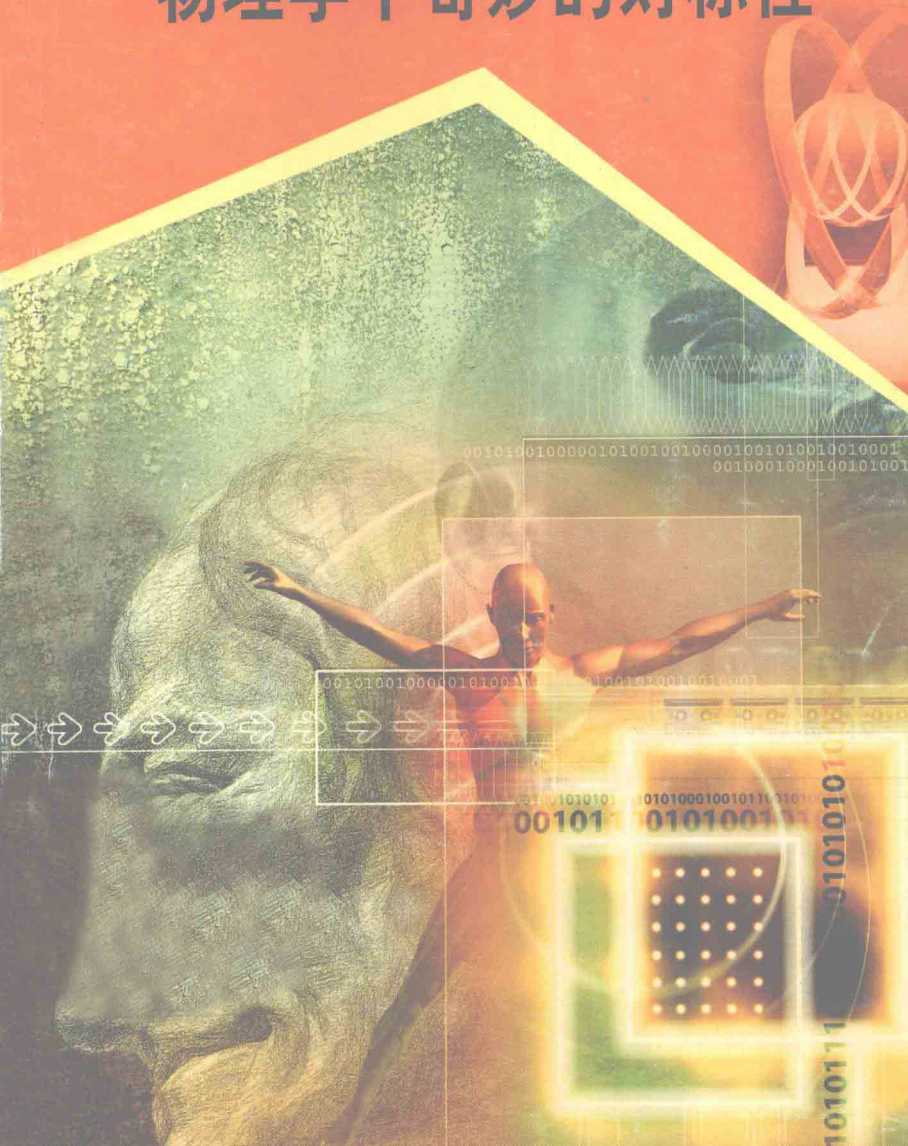


KE XUE WEN GONG

科学文丛

# 物理学中奇妙的对称性



科学文丛

# 物理学中奇妙的对称性

(32)

广州出版社出版

图书在版编目 (CIP) 数据

科学文丛. 何静华  
形继祖 主编. 广州出版社. 2003.

书号 ISBN7-83638-837-5

I. 科学... II. .... III. 文丛

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 082275 号

## 科学文丛

主 编: 何静华  
形继祖

广州出版社

广东省新宜市人民印刷厂

开本: 787×1092 1/32 印张: 482.725

版次: 2003 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印数: 1-5000 套

书号 ISBN 7-83638-873-5

定价: (全套 104 本) 968.80 元

## 内容简介

一个受过现代教育的人,如果不清楚对称性思想在现代物理学中的威力,那至少可以说是非常遗憾的。诺贝尔物理奖获得者狄拉克盛赞对称性思想为理论物理学的精华,海森堡认为对称性思想反映了当今自然科学的时代精神,杨振宁更是对对称性思想的力量表示深深钦佩。本书从历史发展的角度,对物理学对称性所具有的美感简洁性与其含义的深刻普遍性的统一,作了翔实而生动的描述。本书还用确凿的史料指出,对称性思想和任何一种科学思想一样,也是有局限性的,它们在给物理学家们带来胜利喜悦的同时,也曾给他们带来失败的苦果。今天,对称性思想更面临着一些巨大的难题。

# 目 录

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 一、经典物理学中的对称性思想 .....                   | ( 1 ) |
| 1. 哥白尼的成功和失误 .....                     | ( 1 ) |
| 2. 八弧分误差带来的重大突破 .....                  | ( 8 ) |
| 3. 守恒定律与对称性有什么关系? .....                | (17)  |
| 4. 喜欢写诗的科学大师 .....                     | (25)  |
| 5. 劳厄一箭双雕 .....                        | (33)  |
| 6. 原子里面的对称性 .....                      | (41)  |
| 7. 从“光阴似箭,日月如梭”谈起 .....                | (48)  |
| 二、现代物理学中的对称性原理 .....                   | (59)  |
| 1. 爱因斯坦的“连锁倒转法” .....                  | (59)  |
| 2. 博士论文得了诺贝尔奖 .....                    | (69)  |
| 3. 泡利的捍卫战大获全胜 .....                    | (78)  |
| 三、对称性出麻烦了 .....                        | (86)  |
| 1. 对称性的不对称:双生子佯谬 .....                 | (86)  |
| 2. $\theta$ - $\tau$ 之谜:对称性有些过分了 ..... | (94)  |

|                    |       |
|--------------------|-------|
| 3. 客人入席,对称破缺 ..... | (101) |
|--------------------|-------|

|             |       |
|-------------|-------|
| 四、结束语 ..... | (106) |
|-------------|-------|

## 一、经典物理学中 的对称性思想

### 1. 哥白尼的成功和失误

历史表明,美的观念随着思想和技术的进步而改变,谁要是以为自己发现了“永恒的美”,他就一定会陷于模仿和停滞不前。

——格罗佩斯

魏尔说,当他必须在真和美两种中挑选一个时,他总是挑选美。魏尔的这段话,可真有“挟雷藏电,飞流奔注”之势。但魏尔的话似乎颇为可疑。什么是真?真,大约是指事物的客观规律,它是不以人们的意志为转移的客观存在(虽然我们永远不能穷尽它);什么是美?这是一个至今仍然争论不休的题目,我们这儿也无意卷入这场争论中去,但从魏尔的原话来看,他所指的美,大约应该是指一种主观上的感受(否则,为什么要把美和真对立起来?)。如果这种分析是合理的话,那么魏尔似乎

过分相信自己主观上的审美情感了。在科学史上,持魏尔这种科学美学观点的人,可谓大有人在,哥白尼即为一例。但科学史也同样告诉我们,持这种观点的科学家并非总是常胜将军,他们有时确能因为他们所持的美学方法而“过五关斩六将”,大显威风;但也几乎毫不例外的是,当他们自以为他们的科学美学观点是“绝对”无争议时,他们也会“败走麦城”。这种例子几乎俯首皆可拈来。这一节我们要谈的是哥白尼的成功和失误。

哥白尼 1473 年 2 月 19 日出生在维斯杜拉河畔的小城托伦。他父亲是波兰人,母亲是德国人。18 岁时,哥白尼进入克拉科夫大学学习,读了三年书。在这三年里,他在波兰科学家布鲁兹乌斯基的教育下,对数学和天文学发生了兴趣,广泛地涉猎了这两门学科的著作。23 岁时,哥白尼到意大利,这时的意大利是文艺复兴时期科学、文化活动的中心,毕达哥拉斯和柏拉图的思想在意大利再次显示出迷人的吸引力。

在意大利波伦亚大学,哥白尼成了意大利天文学家、数学家诺瓦拉的学生。诺瓦拉当时是自然哲学中复兴毕达哥拉斯思想的运动的领袖,这个运动当时正在唤醒意大利的各所大学。诺瓦拉曾严厉批评托勒密天文体系太复杂,完全不符合毕达哥拉斯强调的数学谐和的美学原理。诺瓦拉的观点,激励了哥白尼,使他决心改革托勒密的天文学。

托勒密的宇宙体系,保留了天体必须作匀速圆周运动这一至高无上的美学要求;也保留了亚里士多德的地球是静止不动的理论。为了使这种天体理论符合实际观测,托勒密对本轮均轮系统运动,作了一些改动,提出了偏心等距点的方法。

除此以外,为了使地球处于宇宙中心并静止不动,并且还要使理论与观测资料吻合,托勒密还进一步牺牲了理论的简单

性要求,不断增加本轮和均轮的个数,最后这个体系所用的圆多达 80 多个。

从观测的角度来看,托勒密体系可以说取得了极辉煌的胜利,以至成为以后近 1400 年间天文学家、航海家们有用的工具。但到了哥白尼,他不满意这个理论体系,认为托勒密违反了毕达哥拉斯美学标准的严格要求。哥白尼认为,为了符合实际观测资料,托勒密让天体对它们的圆周中心作不匀速圆周运动,这是一个不可容忍的缺陷。还有,托勒密为了使地球静止不动,他使每个天体的运动变得极为复杂。

大约在 1529 年,哥白尼在标题为《纲要》的手稿里,对托勒密的理论体系进行了首次抨击。他写道:“……托勒密和其他大多数天文学家的行星理论,虽然和数据符合,但是还是遇到了不少困难。因此这个体系不能充分令人满意。”为了克服这种在哥白尼看来不容许出现的缺点。他继续写道:“每看到这些缺点时,我时常想是不是可以让这些圆有一种更合理的安排,使所有与观测不符的地方都可由此解决。在这种安排中,每个天体应绕着它合适的中心匀速转动,这才符合绝对运动规律的要求。”

那么,“更合理的安排”是一种怎么样的安排呢?哥白尼在阅读、研究过他找得到的一切经典著作后,惊讶地发现,在 1700 多年以前,就有古希腊的阿利斯塔克、希塞塔斯等一些天文学家提出,地球在天空绕太阳转动。哥白尼知道了这种“日心说”以后,非常兴奋,觉得这种学说,也许可以消除托勒密地心说带来的许多弊端。他在《天体运行论》中写道:

“既然前人可以自由选择一些圆周运动来解释观测到的天体,那我当然也可以尝试一下。于是,我开始设想让地球有某

种运动,看这样能否让天体运动得到更合理的安排。……经过长期反复的观测之后,我终于发现,如果除了地球的运动(自转和公转)以外,还考虑其他行星的运动,并算出它们的公转和地球的公转,那么,我们不仅可以由此推出其他行星的运动,而且还可以把所有的行星及其轨道顺序、大小以及整个天球都如此紧密地联系起来,以致在任何一部分里作一点简单的改变,都必须在其他部分以及整个宇宙中造成混乱。因为这个缘故,……我采纳了这个体系。”

哥白尼设想的宇宙总体图景是一个什么样的宇宙呢?我们按哥白尼的观点作一个简单的介绍。

最外层的球面,是由恒星组成,它也叫“天球”。天球是整个宇宙的框架,它是不动的,而其他行星,包括地球在内,都相对于天球作圆周运动。在运动的行星中,第一层是土星,它30年绕太阳转一周;其次是木星,12年转一周;再其次是火星,两年转一周;第四层是地球,每年转一周,在这条轨道上,还附加月球绕地球的转动;第五层是金星,9个月转一周;水星占第六层,80天转一周。

在天球和行星的中央,是“宇宙的心”——太阳。哥白尼说,把太阳叫作“宇宙的灯”、“宇宙的统治者”也可以,因为太阳好比是皇帝,坐在宇宙中央皇帝的宝座上,管理宇宙中所有的恒星和行星。

哥白尼对这种宇宙,真是满意极了,他说:

“宇宙中央是太阳,在这极美丽的庙堂中,谁能把这个火炬放到更好的位置上呢?在这个位置上,太阳才能把它的光照亮整个宇宙!”

哥白尼的日心体系比起托勒密体系简单得多,而且也漂亮

得多。他不仅把托勒密体系用来解释天体运动的繁琐的 80 多个圆减少为 48 个,而且在他的体系里,所有的行星都以同一个方向绕太阳旋转,而不像托勒密体系那样,有的行星由西向东转,有的又反转;运动的速度也随着与太阳距离变远而减慢。

哥白尼的宇宙是多么谐调、对称的一幅宇宙图景啊!

除此以外,哥白尼体系最突出的优点在于它能对行星的“逆行”现象给予一个非常自然的解答。“逆行”现象是行星在空间作圆周运动时,有时突然改变运动方向,向反方向运动一段不长的时间,以后又回到原来的圆周运动方向上。自古以来,天文学家们就对行星的逆行现象感到迷惑、烦恼,后来托勒密虽然能给出一个稍微象样的解释,但却非常复杂、牵强。哥白尼认为,所谓行星逆行现象,并非行星真的向相反方向转动,其实这只不过是一种掉转视线造成的视觉现象。这就正如当你坐在一辆汽车上看一辆速度较慢且行驶在你前方的汽车一样,如果你以远方的山、房屋等为背景时,则汽车在你前方时,你看见它在缓慢的向前驶;而当汽车与你并排时,你就觉得它似乎在向后行了,但它实际上仍然在向前行。对此,哥白尼在《纲要》中作过明确的解释,他说逆行现象“不是由于行星运动造成的,而是由于地球改变了它在大圆(即其绕日运行的轨道)中的位置。因为地球比行星运行快,所以指向天空的视线在后退,这样,地球不仅抵消行星的运动而且超过了它。这种逆行在地球离行星最近时最为显著。”

哥白尼体系的优越性在现在看来是无可怀疑的。但我们更关心的是:支持哥白尼作出这场天文学革命的根本思想是什么呢?这确实是一个非常有趣和有意义的问题。美国著名科学史家霍尔顿对此作过明确的回答,他说:“在哥白尼看来,除

匀速圆周运动之外,任何其他类型的天体运动都‘显然’是不可能的。”英国科学史家 A·沃尔夫也持同样的观点,他说:“无疑,哥白尼由于这种新观点更有对称性和一致性而心向往之。这些优点对于一个充满新毕达哥拉斯主义思想的人富有魅力。因为,毕达哥拉斯主义的精髓是它坚持认为,宇宙应该用数学关系来描述;两个几何上等价的行星理论,其中比较谐和、比较对称的那个理论也比较正确。”沃尔夫还说:“对于哥白尼来说,日心观点仅仅代表行星最对称的排列,以及用以解释观察到的行星运动的最简单的方式。”

G. 霍尔顿和 A. 沃尔夫的观点是说,哥白尼的根本思想是认为天体运动一定要符合对称、简单、和谐的美学要求,否则是不能容许的。这点看来是可以肯定的,因为哥白尼本人也曾非常有信心地认为,他提出的日心体系虽然也遇到一些无法解释的困难,但却仍然是最好的一种方案,为什么呢?哥白尼的回答是因为“在这样的安排下,宇宙里有一种奇妙的对称,轨道的大小与运动都有一定的谐和关系。这样的情形是用别的方法达不到的。”从这句话我们可以充分看出,哥白尼对于由对称性而得出的结论,具有多么高度的信任!当宗教界攻击日心说亵渎了上帝时,作为在宗教界身居高位的哥白尼巧妙地辩解说,从外表看来混乱无序的数据中找出对称和秩序,这本身就是对上帝的尊敬,因为我们所生活在其中的世界,只不过是上帝意志活动的象征。

哥白尼的日心体系提出来后,立即遭到强烈的反对,直到 100 多年之后,哥白尼体系才获得最后的胜利。它的胜利具有极伟大的意义,因为只有有了日心说,牛顿力学才能最终完成。正因为如此,恩格斯高度评价了哥白尼的《天体运行论》一书,

他在《自然辩证法》一书中写道：“自然科学借以宣布其独立并且好像是重演路德焚烧教谕的革命行为，便是哥白尼那本不朽著作的出版，他用这书（虽然是胆怯地而且可说是只在临终时）来向教会的权威挑战。从此自然科学便开始从神学中解放出来……”

哥白尼的日心体系具有重大意义，这是毫无疑问的，但它也有相当的局限性。我们这儿不去全面讨论这一个问题，只从科学美学思想作为评价理论的标准这一角度作一简单的讨论。哥白尼从毕达哥拉斯的对称性思想出发，认为一切天体的运动都是匀速的圆运动（或复合的圆运动），这有一定的价值，也促使他取得了相当伟大的成就，但像许多伟大的科学家一样，常常过份强调那些使自己取得成就的科学思想方法，结果走向极端，使研究陷于困境而不能自拔。哥白尼对于匀速圆周运动强调过了头，把它绝对化了，他不承认天体除了匀速圆周运动以外还会有什么其他类型的运动。从这一错误前提出发，他就摆脱不了错误的本轮—均轮体系的束缚，这就不仅使他的体系仍然不够简洁，而且更严重的是使他的计算无法做到准确无误。实际上，哥白尼的某些预测还不如托勒密的精确。很明显，唯美主义的科学美学思想妨碍了哥白尼，使他没有（也无能力）去追究预言与观测之间误差的原因。我们还应指出的是，哥白尼这种观点，对以后物理学、天文学的发展，有十分不利的影响，连近代物理学奠基人伽利略也受到影响，并因而没有能够发现万有引力。

格罗佩斯说得对：“谁要是以为自己发现了‘永恒的美’，他就一定会陷于模仿和停滞不前。”

## 2. 八弧分误差带来的重大突破

同一个美学原理在一种情况下有利,而在另一种情况下则妨碍我们正确地理解自然现实。因此,在以美的标准作为真理标准时,无论如何也不能忘记其相对价值,不能忘记它们本身也依赖于真理和科学,社会实践的发展水平,依赖于时代的整个文化遗产。……美的标准……只能把你引向真理,向你提出暗示,而不是直接指出真理的所在。决定性的看法总是要通过实践、实验和行动来确定。

——A. 苏霍金

如果没有开普勒的工作,日心论的命运将是不确定的。

——M. 克莱因

1963年,荷兰科学史家 E.J. 狄克斯特霍伊斯在他与 R.J. 弗伯斯合写的《科学技术史》一书中,对开普勒作出了极高的评价,他们说:“开普勒定律比哥白尼体系更加严重地背离古代的传统。因此有时把天文学革新的起端归之于开普勒而不是哥白尼,这也没有什么不合适。这样做还有另一个理由。开普勒的《新天文学》的副标题《天体物理学》意指一种研究纲领,而对他的许多同时代的人来说,这个研究纲领是荒谬和不可理解的。”这一评价,是有道理的。本节想从开普勒如何革新传统美学观点这一角度,对狄克斯特霍伊斯的评价作出佐证。

开普勒于 1571 年 12 月 27 日出生在符腾堡公国的一个城市怀尔。这个诞辰日正是圣诞佳节欢庆期间,可惜开普勒一生

在生活上并没有得到什么欢乐,相反,他倒是受尽了各种折磨。他的家庭虽然出身于贵族之后,但到他出生时,家道已经衰微,常为贫穷而窘迫不堪。开普勒是不足月的早产儿,出生后不久又染上可怕的天花。由于高烧,他失去了正常人所有的视力,手也因而残废。可怜的开普勒,从小就倍受疾病折磨!但幸运的是,他秉赋聪颖,从小就被人们视为神童,因而有机会作为教会公费培养的学生入学念书。1588年,他以最优的成绩在莫尔布隆学院获学士学位。由于他希望能在教会供职,毕业后他立即进入图宾根大学学习神学。

在图宾根大学学习期间,他有幸受到马斯特林教授的教诲。马斯特林是天文学教授,他相信哥白尼的日心说理论。虽然在课堂上他不得不讲授托勒密的地心说理论,但私下里他向开普勒推荐了有关哥白尼的天文学著作。年轻的开普勒在马斯特林的影响下,很快就接受了哥白尼的学说。对哥白尼体系所具有的数学简单性与和谐,开普勒佩服得五体投地。他曾经说:“我从灵魂的最深处证明它是真实的,我以难以相信的欢乐心情去欣赏它的美。”

1594,马斯特林被推荐到奥地利的格拉兹主持天文学研究,开普勒也随着他一起去了格拉兹,并担任一所高级中学的天文学讲师。

在格拉兹工作期间,由于他深受毕达哥拉斯和柏拉图的影响,以及深信哥白尼体系的正确,他决心在哥白尼体系中寻找一种美妙而和谐的几何规则,用以解释实际观测所得的数据。1596年,他在这方面最早的思考成果终于在《宇宙的奥妙》一书中公布了。在该书的序言中,开普勒写道:“我企图去证明上帝在创造宇宙并且调节宇宙的秩序时,看到了毕达哥拉斯和柏拉

图时代起就为人们熟知的五种正多面体,他按照这些形体安排了天体的数目、它们的比例和它们运动间的关系。”

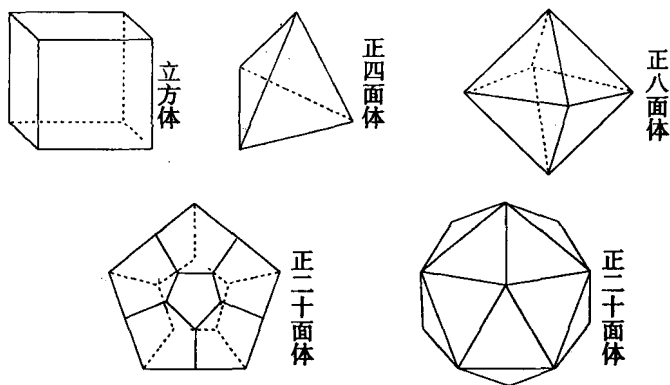


图 2 五种多面体

当时只知道六颗行星,而正多面体又恰好只有五种(见图2),这种偶合使开普勒大为激动。当他作了一系列巧妙安排之后,他非常满意地发现,他似乎发现了宇宙的基本秘密之一。他的安排是这样的:他认为六个行星的轨道半径是六个球的半径,这六个球和五种正多面体一个套一个。我们可用地球为准来度量所有其他轨道。一个正十二面体外切地球,这正十二面体就内接于火星的天球,一个正四面体外切火星轨道,这个正四面体就内接于木星天球。一个正立方体外切木星轨道,这个正立方体就内接于土星天球。现在把一个正三十面体放入地球轨道,外切这个正二十面体的天球就是金星(的轨道)。把一个正八面体放入金星轨道,外切这个正八面体的天球就是水星(的轨道)。

根据这个模型计算出的行星间的距离,与通过观测而推算

出的数值并不完全相符,但开普勒却十分满意,他说:“我从这个发现所得到的极度喜惊是无法用语言来表达的。”但实际上这一模型并没有很多成功的地方。可见,美学判断并不总是正确的。为了解释五大行星的轨道半径,开普勒由一系列互相切合的正多面体来决定它们之间的距离,这的确是一个非常对称的几何图景,但牛顿力学发展之后,就看到这个颇具对称美的解释只是形式上的,而不是实质的。霍尔顿认为,开普勒的对称几何图形,只是一堆毫无结果的杂乱无章的数字学表达。不过,开普勒的几何图形,引起了第谷·布拉赫和伽利略的注意。这对于开普勒今后的命运,却起了很大的作用。

开普勒写完他的第一部书以后,他就把它寄给了两位科学家,一位是在天文学领域里占有重要地位的第谷·布拉赫,另一位是声名显赫的伽利略。伽利略对开普勒的书似乎没有特别注意,但第谷却十分欣赏开普勒的著作。第谷并不相信开普勒的正多面体所导出的结论,但他看出开普勒具有丰富的天文知识和卓越的数学才能,于是他邀请开普勒到他那儿工作。开普勒开始拒绝了第谷的邀请,因为他不愿意离开格拉兹。但不久由于开普勒受到宗教的迫害,不得不于1600年离开格拉兹前往布拉格,这时第谷已从丹麦的赫文岛迁出,到鲁道夫二世的布拉格宫中就任皇家历算官。

开普勒的布拉格之行,是他一生中重要的转折点。这是因为开普勒作为第谷的助手,亲眼看到第谷对观测的极度认真、细致、严格,并因而对第谷的观测资料的可靠性、精确性深信不疑。我们也许还记得,爱因斯坦在1949年曾高度评价过开普勒的科学研究态度,他指出:“在科学研究中,他必须摆脱唯灵论的研究方式,这种思维方式只会把他引向神秘莫测的境地。