

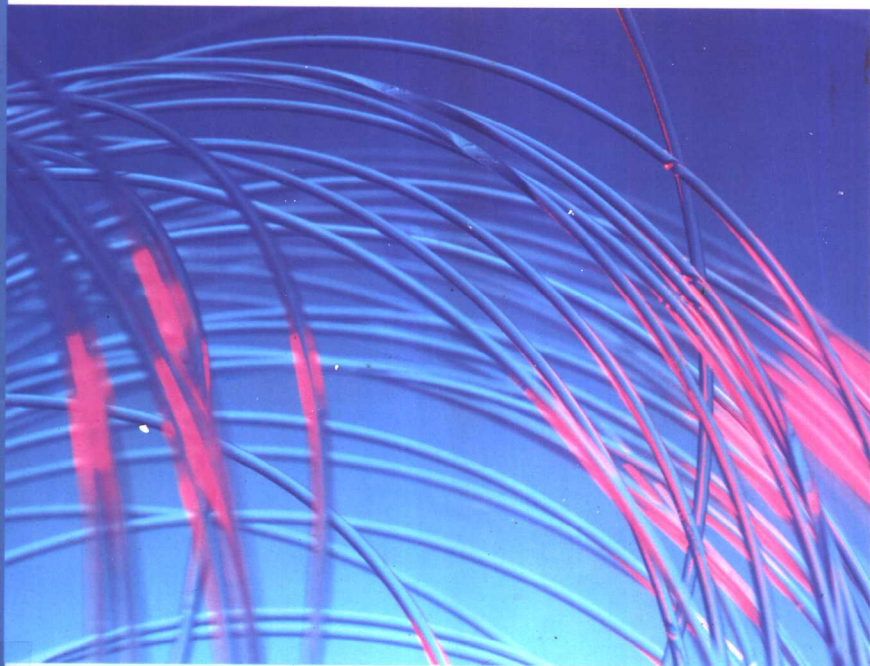
WULIXUE SIXIANG FANGFA YANJIU

物理学

思想方法研究

◆ 项红专 著

IXUE SIXIANG FANGFA YANJIU



浙江大学出版社

物理学思想方法研究

项红专 著

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

物理学思想方法研究 / 项红专著. — 杭州: 浙江大学出版社, 2004. 6

ISBN 7-308-03690-1

I. 物... II. 项... III. 物理学—思想方法—研究
N. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 046292 号

责任编辑: 田 华

封面设计: 刘依群

出版发行: 浙江大学出版社

(杭州 振大路 38 号 邮政编码 310027)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

排 版: 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷: 浙江上虞印刷厂

开 本: 850mm×1168mm 1/32

印 张: 5

字 数: 120 千

版 印 次: 2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 0001—5000

书 号: ISBN 7-308-03690-1/O · 309

定 价: 8.00 元

目 录

物理学家的思维特征·····	(1)
物理学家的思维误区·····	(13)
物理学发现的艺术·····	(19)
问题——物理学发现之源·····	(26)
极端思维——物理学家的创新思维·····	(32)
物理模型的特征和作用·····	(37)
物理假说的形成方法及作用·····	(45)
类比思维——物理学家创新的钥匙·····	(53)
物理学中的悖论、佯谬和归谬法 ·····	(60)
实验的简化、强化和纯化 ·····	(65)
实验失误原因的系统分析·····	(71)
常用实验设计思想·····	(79)
物理实验中的典型转换·····	(86)
物理实验中的放大方法·····	(92)
作图法的巧妙运用·····	(98)
物理实验中的改变量法·····	(103)

示零实验的特殊功能·····	(106)
减小实验误差的方法·····	(113)
实验方法的方法性·····	(120)
数量级在物理实验中的应用·····	(126)
实验设计中的创新方法·····	(134)
巧妙设计的实验装置·····	(139)
利用地球的物理实验·····	(144)
参考文献·····	(151)
后 记·····	(156)

物理学家的思维特征

作为自然科学重要基础学科的物理学在近现代科学发展史上起了重大作用,尤其在 20 世纪,物理学作为主导学科取得了一系列突破性成果。这充分体现了物理学家勇于探索、不畏艰难的精神,创造性思维和正确科学方法的运用。在长期的科学研究生涯中,物理学家形成了自己新颖独特的思维风格,笔者在此就物理学家的主要思维特征作一初步探讨。

1. 善于抓主要矛盾

任何复杂事物,总包含着许多矛盾,但在一定条件下,必定有一个是主要的,其他是次要的。物理学家在研究问题时,善于把主要矛盾突出出来,暂时去除次要矛盾,而不是眉毛胡子一把抓。一旦弄清主要矛盾后,再考虑次要矛盾,如此一级级近似,就可能逼近实际。玻尔的原子模型,用三个基本假设便抓住了主要矛盾即电子与原子核的静电相互作用,使原子结构的量子论研究取得了突破性进展。在那时并不知道,因而也不会讨论电子自旋及其与轨道运动的相互作用,即原子的“精细结构”,这是次要

矛盾;更不会去讨论电子自旋与原子核自旋的耦合,即“超精细结构”问题,它是更次要的矛盾(超精细相互作用引起的能级分裂比精细结构还要小三个数量级)。我们知道,分子中有许多原子核和电子,它们都在运动,情况十分复杂。但核与电子有很大区别,核的质量远大于电子的质量,由于这种质量的差别,就使得运动产生了很大差别。电子运动得很快,核运动得很慢,而且两种运动之间还有相互作用。玻恩和奥本海默抓住了影响分子性质的主要因素即电子和核的运动,忽略了电子运动与核运动的相互作用,而且把电子运动与核运动分开来处理,在讨论电子运动时,把原子核近似看成不动。这就是所谓的玻恩—奥本海默近似,事实上,整个光谱学都是建立在玻恩—奥本海默近似基础上的。物理学家不仅善于抓主要矛盾,而且其抓法有其巧妙之处。例如,我国著名物理学家彭桓武有一个著名公式即所谓 $3 \ll \infty$,意思是比较两个因素,如果 $\text{甲}/\text{乙} \gg 3$,这个 3 你可看成是无穷大,也就是乙可以忽略不计,集中精力先考虑甲,然后再考虑对乙作修正。但是,在不同的具体条件下,次要矛盾可以转化为主要矛盾。例如,从 1951 年起,天文上观测到来自银河系和河外星系的 21 厘米波长的射电谱线,证明中性原子氢是宇宙中丰度最高(占 3/4)的元素。在一个处于基态的氢原子中,当电子自旋与核(质子)自旋“平行”时,由于电子自旋与核(质子)自旋磁矩相互作用所产生的附加能量将使基态能级略有升高;反之,“反平行”时,所产生的附加能量使能级略有降低。这样,原来的一条能级分裂成了两条,形成了所谓的超精细结构。由于相当电子在这两个超精细能级(“平行态”与“反平行态”)之间跃迁,便会放出 21 厘米的特征微波辐射。可见,测量氢原子在宇宙中的丰度时,电子自旋与核(质子)自旋的相互作用就上升为主要矛盾了。

研究分子的结构问题,实质上是个多体问题,而多体是可以用统计平均来处理的。但托马斯、费米在这个问题上没有抓住主要矛盾,把电子运动的动能、库仑作用能和交换作用能都用统计平均办法进行计算,得到的结果对原子还可以,对分子完全不行。若用这种统计平均办法进行计算,原子只能是孤立的原子,却不能结合成稳定的分子,而实际情况并非如此。这就说明,托马斯、费米的处理办法,零级近似办法,丢掉了主要矛盾,抓住的是次要矛盾。到了1951年,另一位物理学家斯雷特,把动能部分、库仑作用能部分作为主要矛盾,按照量子力学来处理,而把交换作用能部分作为次要矛盾用统计平均办法来处理,得到的结果很成功。

物理学家往往先对所研究的问题作定性分析,几乎不用做任何计算就能得出所研究问题中包含的各种量之间的粗略关系,显示出该现象的物理景象,并且产生一个能得到预期结果的方案。定性分析的主要目的就是在分析问题时尽量将问题简化,抛开那些无关紧要的非本质东西。量纲分析就是一种重要的定性分析方法,用它去把握研究对象的本质,往往一针见血,切中要害。拉普拉斯早在18世纪末就用这种方法抓住了质量 m 、光速 c 、万有引力常数 G ,给出广义相对论所预言的黑洞大小尺度近似值: $R \sim Gm/c^2$ 。量纲分析是如何归类(用什么尺子)的问题,而量级分析是如何比较(用多大的尺子)的问题。林家翘先生曾经精辟地用抛体运动的例子阐明了这个道理。分析抛体运动,抛体的初速度影响抛体运动,重力使抛体回到地面,抛体落地远近与地球大小有关。这样,忽略了空气阻力、地球自转等次要因素后,影响抛体运动的主要因素可能有:地球半径 R 、物体质量 m 、重力加速度 g 和抛体初速度 v 。由于物体运动在时空进行,我们

可抓住时间和空间(长度)这两个量纲。从量纲分析看,这四个量能组成三种以时间为量纲的组合即 R/v 、 $\sqrt{(R/g)}$ 和 v/g (m 没有进入式子,说明真正控制抛体运动的参数只有 R 、 v 、 g) ,三种以时间为量纲的组合分别对应着三种以空间为量纲的组合即 R 、 $v \sqrt{(R/g)}$ 和 v^2/g 。这样就可用三个不同的时间标尺和三个不同的空间标尺来度量抛体运动。具体用哪套尺子就需要作量级分析。对于地面上的抛体运动,抛体的高度与 v^2/g 是相当的,所以只有第三套尺子才是恰当的。而前两套尺子不是合适的尺子,用它们去观察现象会导致错误的近似的结论。如果从地球外看问题,用第二套尺子观察现象,这就相当于取了特征速度 $R/\sqrt{(R/g)}$,即 $\sqrt{Rg}$,这个特征速度就是第一宇宙速度。

2. 敢于大胆假设

物理学家对事物的认识总是由初步的、探索性的猜测,逐步提高到对事物本质的认识,在这过程中,科学假说对物理学理论的形成及发展起着十分重要的作用。科学假说是在已有知识和事实的基础上,对事物本质及其规律性作出的一种推测性说明(或解释)。“科学发现近于说故事,近于编造神话”,是大胆的猜测。著名科学哲学家波普尔认为,任何科学理论实质上都是猜想,都是根据有限的事实材料大胆地跳跃到某种结论上,猜测性地对问题进行解答,然后再去接受经验的检验。杨振宁教授也认为,所有物理和数学的最前沿的研究工作,很大一部分力量要花在猜想上。“大胆假设,小心求证”是物理学家的一种重要的治学方法。哥白尼时期的观测工具,不可能提供任何具有决定意义的新材料,日心说的提出只能是超越直觉经验的大胆猜想。从现代

的观点看,安培的分子电流假说不尽正确,但在当时能提出这样的假说,不能不说是十分大胆的,是一种创新。安培把一切电磁作用都简化为电流之间的相互作用,开创了电动力学的新纪元。法拉第具有惊人的假说能力,他提出的科学假说胆量之大、速度之快、数量之多都是惊人的,这也是他获得成功的原因之一。例如,他提出了“光可能是一种电磁振荡的传播”、“强磁场可能会改变光源的波长”、“重力和电力是有联系的”等一系列假说。位移电流的引入,是麦克斯韦理论思维的大胆创造,也是建立他的电磁理论的关键一步。但由于位移电流的假说十分抽象,连威廉·汤姆逊都不能理解,说它是“怪诞的、天才的但并非完全站得住脚的假说”。麦克斯韦在机械论和超距作用统治下的欧洲,能提出“位移电流”这一前所未有的新概念和新假说,确实是非常大胆的。1925年,年龄还不到25岁的两位荷兰学生——乌仑贝克和古兹米特根据一系列的实验事实提出了大胆的假设:电子不是点电荷,它除了轨道角动量外,还有自旋运动,它具有固有的自旋角动量 s 。提出任何电子都有相同的自旋角动量,而且它们在 z 方向的分量只取两个数值,这对经典物理是无法接受的。正因为这些概念上的困难,乌仑贝克和古兹米特的假设一开始就遭到很多人的反对(包括当时已闻名的泡利),以至于乌仑贝克和古兹米特想把已写好的文章收回。后来的事实却证明,电子的自旋概念是微观物理学最重要的概念。普朗克在发现用经典物理学理论无法解释黑体辐射现象后,于1900年提出了能量量子化假说,为20世纪物理学提出了一种崭新的观念。他这一假说与经典物理学理论完全背道而驰(在很长的时期内,科学家们和哲学家们都认为一切自然过程都是连续的,并以此作为科学研究的一个基本理论思想,正如莱布尼茨所说——“自然界没

有飞跃”),是如此的大胆,他自己都认为他的假说要么荒唐无稽,要么可能是牛顿以来物理学最伟大的发现之一,他把他所做的事情叫做“孤注一掷的行动”。从普朗克能量量子化假说→爱因斯坦的光量子假说→玻尔的原子结构模型假说→德布罗意的物质波假说,假说对量子力学理论的形成及发展起着十分重要的作用。假说是否正确,必须由进一步的实验来验证。验证假说的实验往往是物理学发展史上十分重要的、关键性的实验,如验证电子波性的电子衍射实验、验证光的粒子性的康普顿散射实验等。狄拉克提出了对今天仍有巨大影响的两大假说——磁单极假说和大数假说,迄今为止物理学家寻找磁单极和验证大数定律的工作从未间断过。

3. 使自己的思想形象化

尽管数学化了的物理学很抽象,但在进行物理学研究时,仍然要借助于形象思维。形象思维具有直观性,这种直观印象有时能透过事物的本质,诱使物理学家作更深入的探讨。亚里士多德正是从月食时月球上的弧形,认识到地球是球形的。伽利略用图表形象地体现出自己的思想,从而在科学上取得了革命性的突破,而他同时代人使用的还是传统的数学方法和文字方法。例如,伽利略用图像法证明:一个从静止状态开始均匀加速的物体,通过任意一段距离所需的时间,等于该物体以其最高速度和恰好开始加速前的速度的平均值为速度匀速地通过该段距离所需的时间(见图1)。具体论证方法简述如下:将 AB 时间线分成 n 个相同时间间隔, BE 表示最大速度值, HI 为平均速度值,由于 $\triangle AIG$ 的面积 $=\triangle FIE$ 的面积,故 $\triangle AEB$ 的面积 $=$ 矩形 $AGFB$ 的面积。所以,一个物体从静止开始作匀加速运动,另一

物体以前者最大速度的一半作匀速运动,如果两者通过的距离都是 CD ,则所需时间相等。法拉第具有丰富而深刻的物理思想,他从广泛的实验研究中构想出描绘电磁作用的“力线”图像,通过力线图像,法拉第使许多电磁现象的定性解释变得十分简单、直观和形象。法拉第的力线思想是场概念的先声,许多物理学家都给予极高的评价。汤姆逊(开尔文)推崇说:

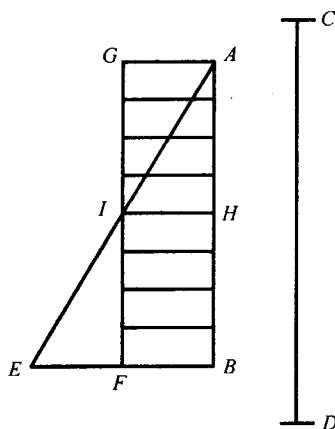


图 1

“在法拉第许多贡献中,最伟大的一个就是力线概念了。”据说,麦克斯韦养成了把每个问题在头脑中构成形象的习惯。爱因斯坦认为,文字和数学在自己的思维过程中发挥的作用并不重要。爱因斯坦的思想是非常直观的,他运用直观和空间的方式思考,而不是沿着纯数学或文字的推理方式思考。他具有丰富的想象力,是思想实验的大师,他的“思想火车”和“思想升降机”两个实验创立了彪炳史册的狭义相对论和广义相对论。狄拉克凭借高超的想象力,勾画出了一一种新的真空图像——真空并非空无所有,而是由负能态所填满的电子海洋。这种图像否决了原子论关于真空就是一无所有的论断,是对旧以太论的扬弃。费曼是一位视觉化的大师,他的费曼图把复杂的次原子事件,用一种视觉语言描述成简明的事件(见图2)。量子电动力学是一门高度精确的物理理论,电子与光子之间的几乎一切过程均可以用它来精

确处理。根据这个理论,一切过程均可以用叫做费曼图的图形来表示。费曼图由线段和顶点组成,线段代表粒子,顶点代表作用。用费曼图对相互作用进行理论计算,十分方便。

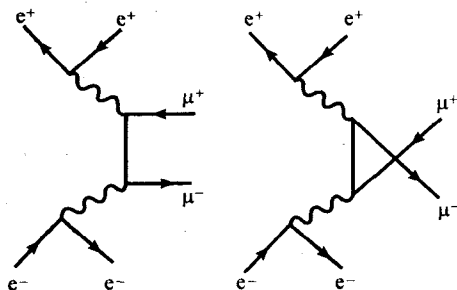


图 2

4. 寻求联系和统一

物理学家善于把不同的对象放在一起进行比较,设法在一些常人看起来没有关联,甚至是风马牛不相及的事物之间寻求联系,使他们得以看到他人看不到的东西。牛顿把树上的苹果与天上的月亮联系了起来,他想如果苹果树长得像月亮那么高,上面的苹果是否也会落地呢?富兰克林将“天电”与“地电”联系了起来。卢瑟福把原子内部与太阳系联系了起来。物理学家邓锡铭把Q开关高功率激光器与一个稍有漏水的抽水马桶建立起联系。所谓Q值,是指对激光器里共振腔损耗的量度,Q值越大,损耗越小。如果有意在腔内加一个可以变化的损耗,在光激发的初期,使损耗很大,Q值变得很小,这时就不会形成激光振荡(稍有漏水),因此造成较大的粒子数反转;当粒子数反转达到最大值时(水箱灌满),突然间减小损耗,增加Q值(把水箱底部

的盖快速揭开),积累的能量便以极快的速度在很短的时间里释放出来,从而得到很大的激光功率(水一涌而出)。除了氢之外,在其他所有的原子核中,均有两个或两个以上的质子,而它们的距离非常近。根据库仑定律,它们之间的排斥力应使原子核自行爆炸。但事实上,几乎所有的原子核是牢不可破的,这一矛盾现象难倒了当时所有的物理学家。两个本性互相排斥的东西居然能够牢牢地粘在一起而难以分开,其原因究竟何在呢?著名物理学家汤川秀树把这一现象与两条公狗在抢一块肉骨头时的情形联系了起来,他将两个质子比作两条公狗,而肉骨头就是介子。在表面上完全不同的事物之间寻找它们的内在联系,这永远是自然科学家的一个令人向往的主题。追求物理学的内在“联系”与“统一”是物理学家的共同信念。一部物理学发展史,可以说是一部不断地追求“联系”和“统一”的历史。牛顿把地上物体运动和天上物体运动统一了起来,能量守恒定律把各种不同运动形态统一了起来,安培提出的分子电流假说把电流磁性与物质的天然磁性统一了起来,麦克斯韦把光和电磁现象统一了起来,爱因斯坦把光的粒子性和波动性统一了起来,德布罗意把光子与一切(静质量不为零)微观粒子统一了起来,相对论把能量 E 和动量 p 联系了起来,质能方程把 E 、 m 、 c 联系了起来。玻尔把当时人们持极大怀疑的卢瑟福模型、普朗克—爱因斯坦的量子化与表面上毫不相干的光谱实验巧妙地结合了起来,在他的原子模型中得到了和谐的统一。法拉第坚信大自然是统一的、和谐的,坚信物质世界中的一切现象都以这种或那种方式相互联系着,坚信自然力的统一性、不可毁灭性和可转换性。正是在这种思想的指导下,他取得了电磁感应现象、磁致旋光效应和电解定律的发现。关于自然力的统一性思想还导致法拉第把磁力、电力

和万有引力联系起来。一个世纪以后,爱因斯坦提出的统一场论继承了法拉第的伟大思想,成为现代物理学的重要探索方向。而今天的“大统一理论”,已成为当代物理学研究的前沿。

5. 以多种角度考虑问题

物理学家在研究问题时,习惯于以多种角度考虑问题,寻找尽可能多的解决问题的方法,既考虑了最大可能性,也不放过最小可能性。爱因斯坦说,如果让一个普通人在一个干草垛里寻找一根针,那人在找到一根针以后就会停下来;他则会把整个草垛掀开,把可能散落在草垛里的针全部找出来。达·芬奇认为,为了获得有关某个问题的构成的知识,首先要学会如何从不同的角度重新构建这个问题。他觉得,他看待某个问题的第一种角度太偏向于自己看待事物的通常方式,于是,他就会不停地从一个角度转向另一个角度,重新构建这个问题。费马认为,导出折射定律可以采用另一种截然不同的思考方法。他假定不同媒质对光的传播表现出不同的阻力,提出了“自然沿着最短路径作用”的原理。他于1661年成功地导出了折射定律。对于黑体辐射问题,一般人的处理方法总是企图把辐射强度用它与温度的关系来表示,或者说,企图找出能量、波长和温度之间的关系。而普朗克在处理方法上是独树一帜的。他认为,在这个问题上熵的概念应当具有最基本的意义,应当将振子的熵与其能量联系起来。事实上,爱因斯坦的相对论就是对不同视角之间关系的一种解释。两个事件,从一个坐标系看来是同时的,而从另一个相对于这个坐标系运动着的坐标系看来,它们就不能再被认为是同时的事件了。阴极射线是打开微观世界的钥匙,物理学家克鲁克斯在研究阴极射线的性质时,就考虑了多种可能性,即阴极射线是否由

微粒组成、是否带有能量、它的组成物是否带电；奥斯特在研究电流磁效应时，还考虑了电流的热效应可能对磁针偏转产生的影响。3k 微波背景辐射的发现者彭齐亚斯和威尔逊意外地发现过剩的天线噪声时就考虑了它来自电子线路和“白色电介质”（鸽子粪）的可能性。J·J·汤姆逊用了两种彼此独立的方法（磁场偏转和热效应法、磁场和电场偏转法）测量 m/e 。热力学和统计物理学的研究对象是相同的，它们都研究热现象，但由于物理学家研究的出发点不同，研究方法不同，它们成为关于同一自然现象的两种不同的理论：热力学是热现象的宏观理论，统计物理学是热现象的微观理论。同样，量子力学是通过两条途径发展起来的，薛定谔在爱因斯坦思想的影响下，提出了波动力学；海森堡等人在玻尔思想的影响下，提出了矩阵力学，而这两种力学在本质上是等价的。

6. 从相对立的角度思考问题

物理学家之所以能够提出不同的见解，是因为他们可以容纳相对立的观点或两种互不相容的观点。物理学家玻尔认为，如果你把两种对立的思想结合在一起，你的思想就会暂时处于一个不定的状态，然后发展到一个新的水平，这种思想的“悬念”使思考能力之上的智力活跃起来并创造出一种新的思维方式。对立的思想的纠结缠绕为新观点的奔涌而出创造了条件。爱因斯坦创造性思维的特色之一就是善于从对立面去把握事物，也就是善于发现事物的对立面，使矛盾在极端对立的背景下进一步突出，以便在此基础上建立具有更高统摄水平的新理论。有人将爱因斯坦这种通过对立求统一的思维方法比喻为“两面神”思维。其主要表现为能同时积极地构想出两个在逻辑上互为矛盾，

但又各有其经验基础的相反物(对立面),由此构成理论创造的思维背景。这种从对立求统一的方法,可以在爱因斯坦的许多思想实验中找到。例如,路基上的观察者看到的的同时的两道闪光,在匀速行进的“爱因斯坦列车”上的观察者看来这两道闪光不可能同时;一条光线从光源到达等距的两点,在相对于光源静止的参照系看来是同时的,而相对于光源运动的参照系看来却有早有迟。同一事件为何既同时又不同时?这种对立的思维方法即导致了“同时性的相对性”原理的建立。爱因斯坦所思考的对象,大多是关于对立面的问题,例如一个观察者,能在同一时刻既处于运动状态又处于静止状态;在狭义相对论中,他既否定了—个特别优越的参照系(绝对静止的惯性系),却又肯定了一类特别优越的参照系,那就是惯性系,等等。从宏观物体运动发展到微观粒子运动,正因为物理学家容纳了相对立的观点,使得在原观点基础上不断创造出了新的观点,如量子化、测不准原理、波粒二象性等。