

美与物理学

▶ 杨振宁

19世纪物理学的三项最高成就就是热力学、电磁学与统计力学。其中统计力学奠基于麦克斯韦（J. Maxwell, 1831-1879）、波尔兹曼（L. Boltzmann, 1844-1905）与吉卜斯（W. Gibbs, 1839-1903）的工作。波尔兹曼曾经说过：

一位音乐家在听到几个音节后，即能辨认出莫扎特（Mozart）、贝多芬（Beethoven）或舒伯特（Schubert）的音乐。同样，一位数学家或物理学家也能在阅读了数页文字后辨认出柯西（Cauchy）、高斯（Gauss）、雅科比（Jacobi）、亥姆霍兹（Helmholtz）或克尔基霍夫（Kirchhoff）的工作。

对于他的这一段话也许有人会发生疑问：科学是研究事实的，事实就是事实，哪里会有什么风格？关于这一点我曾经有过如下的讨论：

让我们拿物理学来讲吧。物理学的原理有它的结构。这个结构有它的美和妙的地方。而各个物理学工作者，对于这个结构的不同的美和妙的地方，有不同的感受。因为大家有不同的感受，所以每位工作者就会发展他自己独特的研究方向和研究方法。也就是说他会形成他自己的风格。

要尝试阐述上面这一段话，

让我们先从两位著名物理学家的风格讲起。

狄拉克

狄拉克（P. Dirac, 1902-1984）是20世纪一位大物理学家。关于他的故事很多。譬如：有一次狄拉克在普林斯顿大学演讲。演讲完毕，一位听众站起来说：“我有一个问题请回答：我不懂怎么可以从公式（2）推导出来公式（5）。”狄拉克不答。主持者说：“狄拉克教授，请回答他的问题。”狄拉克说：“他并没有问问题，只说了一句话。”

这个故事所以流传极广是因为它确实描述了狄拉克的一个特点：话不多，而其内含有简单、直接、原始的逻辑性。一旦抓住了他独特的，别人想不到的逻辑，他的文章读起来便很通顺，就像“秋水文章不染尘”，没有任何渣滓，直达深处，直达宇宙的奥秘。

狄拉克最了不得的工作是1928年发表的两篇短文，写下了狄拉克方程：

$$(pca + mc^2\beta)\psi = E\psi. \quad (D)$$

这个简单的方程式是惊天动地的成就，是划时代的里程碑：



杨振宁（1922年10月1日—2025年10月18日），中国科学院院士，清华大学教授、清华大学高等研究院名誉院长。

杨振宁是20世纪最伟大的物理学家之一，为现代物理学的发展作出卓越贡献。他与米尔斯提出的“杨-米尔斯规范场论”奠定了后来粒子物理标准模型的基础，被认为是现代物理学的基石之一。

杨振宁与李政道“因对宇称不守恒定律的深刻探索以及由此带来的基本粒子领域的许多重要发现”获得1957年诺贝尔物理学奖，共同成为最早获得诺贝尔奖的中国人。

它对原子结构及分子结构都给予了新的层面和新的极准确的了解。没有这个方程，就没有今天的原子、分子物理学与化学。没有狄拉克引进的观念就不会有今天医院里通用的核磁共振成像（MRI）技术，不过此项技术实在只是狄拉克方程的一项极小的应用。

狄拉克方程“无中生有、石破天惊”地指出为什么电子有“自旋”（spin），而且为什么“自旋角动量”是1/2而不是整数。

初次了解此中奥妙的人都无法不惊叹其为“神来之笔”，是别人无法想到的妙算。当时最负盛名的海森堡（W.Heisenberg, 1901-1976）看了狄拉克的文章，无法了解狄拉克怎么会想出此神来之笔，于1928年5月3日给泡利（W.Pauli, 1900-1958）写了一封信，描述了他的烦恼：

为了不持续地被狄拉克所烦扰，我换了一个题目做，得到了一些成果。

（按：这成果是另一项重要贡献：磁铁为什么是磁铁。）

狄拉克方程之妙处虽然当时立刻被同行所认识，可是它有一项前所未有的特性，叫做“负能”现象，这是大家所绝对不能接受的。狄拉克的文章发表以后三年间关于负能现象有了许多复杂的讨论，最后于1931年狄拉克又大胆提出“反粒子”理论（Theory of Antiparticles）来解释负能现象。这个理论当时更不为同行所接受，因而流传了许多半羡慕半嘲弄的故事。直到1932年秋安德森（C.D. Anderson, 1905-1991）发现了电子的反粒子以后，大家才渐渐认识到反粒子理论又是物理学的另一个里程碑。

20世纪的物理学家中，风格最独特的就数狄拉克了。我曾想把他的文章的风格写下来给我的文、史、艺术方面的朋友们看，始终不知如何下笔。1996年偶然在

香港《大公报》大公园一栏上看到一篇文章，其中引了高适（700-765）在《答侯少府》中的诗句：

性灵出万象，
风骨超常伦。

我非常高兴，觉得用这两句诗来描述狄拉克方程和反粒子理论是再好没有了：一方面狄拉克方程确实包罗万象，而用“出”字描述狄拉克的灵感尤为传神。另一方面，他于1928年以后四年间不顾玻尔（N. Bohr, 1885-1962）、海森堡、泡利等当时的大物理学家的冷嘲热讽，始终坚持他的理论，而最后得到全胜，正合“风骨超常伦”。

可是什么是“性灵”呢？这两个字联起来字典上的解释不中肯。若直觉地把“性情”“本性”“心灵”“灵魂”“灵感”“灵犀”“圣灵”（Ghost）等加起来似乎是指直接的、原始的、未加琢磨的思路，而这恰巧是狄拉克方程之精神。刚好此时我和中文大学童元方博士谈到《二十一世纪》1996年6月号钱锁桥的一篇文章，才知道袁宏道（1568-1610）[[]和后来的周作人（1885-1967），林语堂（1895-1976）等[]]的性灵论。袁宏道说他的弟弟袁中道（1570-1623）的诗是“独抒性灵，不拘格套”，这也正是狄拉克作风的特征。“非从自己的胸臆流出，不肯下笔”，又正好描述了狄拉克的独创性！

海森堡

比狄拉克年长一岁的海森堡是20世纪另一位大物理学家，有人认为他比狄拉克还要略高一筹。他于1925年夏天写了一篇文章，引导出了量子力学的发展。38年以后科学史家库恩（T.Kuhn, 1922-1996）访问他，谈到构思那个工作时的情景。海森堡说：

爬山的时候，你想爬某个山峰，但往往到处是雾……你有地图，或别的索引之类的东西，知道你的目的地，但是仍堕入雾中。然后……忽然你模糊地，只在数秒钟的功夫，自雾中看到一些形象，你说：“哦，这就是我要找的大石。”整个情形自此而发生了突变，因为虽然你仍不知道你能不能爬到那块大石，但是那一瞬间你说：“我现在知道我在什么地方了。我必须爬近那块大石，然后就知道该如何前进了。”

这段谈话生动地描述了海森堡1925年夏摸索前进的情形。要了解当时的气氛，必须知道自从1913年玻尔提出了他的原子模型以后，物理学即进入了一个非常时代：牛顿（I.Newton, 1642-1727）力学的基础发生了动摇，可是用了牛顿力学的一些观念再加上一些新的往往不能自圆其说的假设，却又可以准确地描述许多原子结构方面奇特的实验结果。奥本海默（J.R.Oppenheimer, 1904-1967）这样描述这个不寻常的时代：

那是一个在实验室里耐心工作的时代，有许多关键性的实验和大胆的决策，有许多错误的尝试和不成熟的假设。那是一个真挚通讯与匆忙会议的时代，有许多激烈的辩论和无情的批评，里面充满了巧妙的数学性的挡架方法。

对于那些参加者，那是一个创新的时代，自宇宙结构的新认识中他们得到了兴奋，也尝到了恐惧。这段历史恐怕永远不会被完全记录下来。要写这段历史须要有像写奥迪帕斯（Oedipus）或写克伦威尔（Cromwell）那样的笔力，可是由于涉及的知识距离日常生活是如此遥远，实在很难想象有任何诗人或史家能胜任。

1925年夏天，23岁的海森堡在雾中摸索，终于摸到了方向，写了上面所提到的那篇文章。有人说这是300年来物理学史上继牛顿的《数学原理》以后影响最深远的一篇文章。

可是这篇文章只开创了一个摸索前进的方向，此后两年间还要通过玻恩（M. Born, 1882-1970）、狄拉克、薛定谔（E. Schrödinger, 1887-1961）、玻尔等人和海森堡自己的努力，量子力学的整体架构才逐渐完成。量子力学使物理学跨入崭新的时代，更直接影响了20世纪的工业发展，举凡核能发电、核武器、激光、半导体元件等都是量子力

学的产物。

1927年夏，25岁尚未结婚的海森堡当了莱比锡（Leipzig）大学理论物理系主任。后来成名的布洛赫（F. Bloch, 1905-1983，核磁共振机制创建者）和泰勒（E. Teller, 1908-^注，“氢弹之父”，我在芝加哥大学时的博士学位导师）都是他的学生。他喜欢打乒乓球，而且极好胜。第一年他在系中称霸。1928年秋自美国来了一位博士后，自此海森堡只能屈居亚军。这位博士后的名字是大家都熟悉的——周培源。

海森堡所有的文章都有一共同特点：朦胧、不清楚、有渣滓，与狄拉克的文章的风格形成一个鲜明的对比。读了海森堡的文章，你会惊叹他的独创力（originality），然而会觉得问题还没有做完，没有做干净，还要发展下去；而读了狄拉克的文章，你也会惊叹他的独创力，同时却觉得他似乎已把一切都发展到了尽头，没有什么再可以做下去了。

前面提到狄拉克的文章给人“秋水文章不染尘”的感受。海森堡的文章则完全不同。二者对比清浊分明。我想不到有什么诗句或成语可以描述海森堡的文章，既能道出他的天才的独创性，又能描述他的思路中不清楚，有渣滓，有时似乎茫然乱摸索的特点。

物理学与数学

海森堡和狄拉克的风格为什么如此不同？主要原因是他们所专注的物理学内涵不同。为了解释此点，请看图1所表示的物理学的三个部门和其中的关系：唯象理论（phenomenological theory）（2）是介乎实验（1）和理论架构（3）之间的研究。（1）和（2）合起来是实验物理，（2）和（3）合起来是理论物理，而理论物理的语言是数学。

物理学的发展通常自实验（1）开始，即自研究现象开始。关于这一发展过程，我们可以举很多大大小小的例子。先举牛顿力学的历史为例。布拉赫（T. Brahe, 1546-1601）是实验天文物理学家，

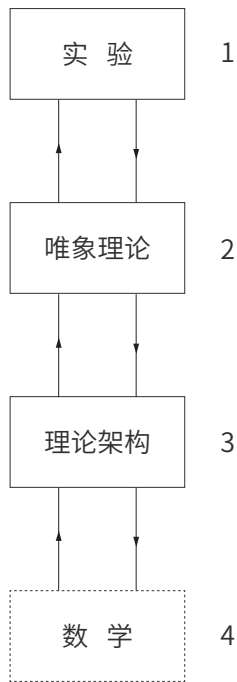


图1 物理学的三个领域

注：爱德华·泰勒已于2003年9月9日去世

活动领域是(1)。他做了关于行星轨道的精密观测。后来开普勒(J.Kepler, 1571-1630)仔细分析布拉赫的数据,发现了有名的开普勒三大定律。这是唯象理论(2)。最后牛顿创建了牛顿力学与万有引力理论,其基础就是开普勒的三大定律。这是理论架构(3)。

再举一个例子:通过18世纪末、19世纪初的许多电学和磁学的实验(1),安培(A.Ampère, 1775-1836)和法拉第(M.Faraday, 1791-1867)等人发展出了一些唯象理论(2)。最后由麦克斯韦归纳为有名的麦克斯韦方程(即电磁学方程),才步入理论架构(3)的范畴。

另一个例子:19世纪后半叶许多实验工作(1)引导出普朗克(M. Planck, 1858-1947)1900年的唯象理论(2)。然后经过爱因斯坦(A.Einstein, 1879-1955)的文章和上面提到过的玻尔的工作等,又有一些重要发展,但这些都还是唯象理论(2)。最后通过量子力学之产生,才步入理论架构(3)的范畴。

海森堡和狄拉克的工作集中在图1所显示的哪一些领域呢?狄拉克最重要的贡献是前面所提到的狄拉克方程(D)。海森堡最重要的贡献是海森堡方程,是量子力学的基础:

$$pq - qp = -ih. \quad (H)$$

这两个方程都是理论架构(3)中

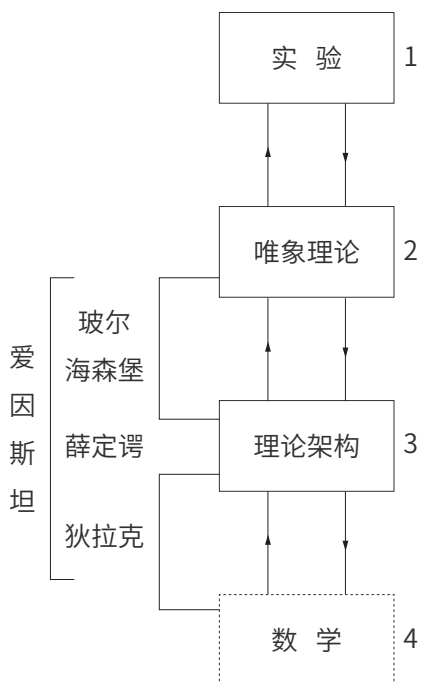


图2 几位20世纪物理学家的研究领域

之尖端贡献。二者都达到物理学的最高境界。可是写出这两个方程的途径却截然不同:海森堡的灵感来自他对实验结果(1)与唯象理论(2)的认识,进而在摸索中达到了方程式(H)。狄拉克的灵感来自他对数学(4)的美的直觉欣赏,进而天才地写出他的方程(D)。他们二人喜好的,注意的方向不同,所以他们的工作的领域也不一样,如图2所示。(此图也标明玻尔、薛定谔和爱因斯坦的研究领域。爱因斯坦兴趣广泛,在许多领域中,自(2)至(3)至(4),都曾做出划时代的贡献。)

海森堡从实验(1)与唯象理论(2)出发:实验与唯象理论是五光十色,错综复杂的,所以他要摸索,要犹豫,要尝试了再尝试,

因此他的文章也就给读者不清楚,有渣滓的感觉。狄拉克则从他对数学的灵感出发:数学的最高境界是结构美,是简洁的逻辑美,因此他的文章也就给读者“秋水文章不染尘”的感受。

让我补充一点关于数学和物理的关系。我曾经把二者的关系表示为两片在茎处重叠的叶片(图3)。重叠的地方同时是二者之根,二者之源。譬如微分方程、偏微分方程、希尔伯特空间、黎曼几何和纤维丛等,今天都是二者共用的基本观念。这是惊人的事实,因为首先达到这些观念的物理学家与数学家曾遵循完全不同的路径,完全不同的传统。为什么会殊途同归呢?大家今天没有很好的答案,恐怕永远不会有,因为答案必须牵扯到宇宙观、知识论和宗教信仰等难题。

必须注意的是在重叠的地方,共用的基本观念虽然如此惊人地相同,但是重叠的地方并不多,只占二者各自的极少部分。譬如实验(1)与唯象理论(2)都不在重叠区,而绝大部分的数学工作也在重叠区之外。另外值得注意的是即使在重叠区,虽然基本观念物理与数学共用,但是二者的价值观与传统截然不同,而二者发展的生命力也各自遵循不同的茎脉流通,如图3所示。

常常有年青朋友问我,他应该研究物理,还是研究数学。我

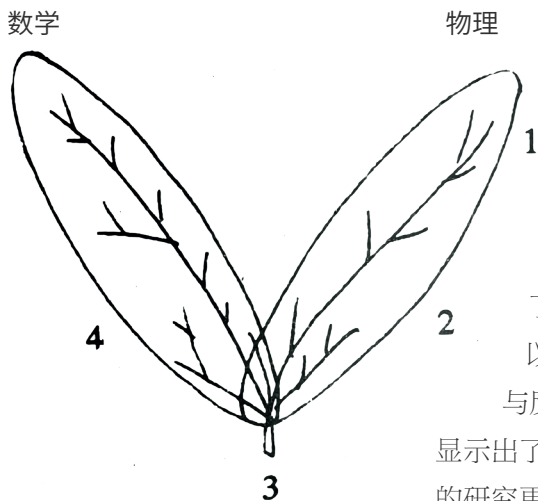


图3 二叶图

的回答是这要看你对哪一个领域里的美和妙有更高的判断能力和更大的喜爱。爱因斯坦在晚年时（1949年）曾经讨论过为什么他选择了物理。他说：

在数学领域里，我的直觉不够，不能辨认哪些是真正重要的研究，哪些只是不重要的题目。而在物理领域里，我很快学到怎样找到基本问题来下功夫。

年青人面对选择前途方向时，要对自己的喜好与判断能力有正确的自我估价。

美与物理学

物理学自（1）到（2）到（3）是自表面向深层的发展。表面有表面的结构，有表面的美。譬如虹和霓是极美的表面现象，人人都可以看到。实验工作者作了测量以后发现虹是 42° 的弧，红在外，紫在内；霓是 50° 的弧，红在内，紫在外。

这种准确规律增加了实验工作者对自然现象的美的认识。这是第一步（1）。进一步的唯象理论研究（2）使物理学家了解到这 42° 与 50° 可以从阳光在水珠中的折射与反射推算出来，此种了解显示出了深一层的美。再进一步的研究更深入了解折射与反射现象本身可从一个包容万象的麦克斯韦方程推算出来，这就显示出了极深层的理论架构（3）的美。

牛顿的运动方程、麦克斯韦方程、爱因斯坦的狭义与广义相对论方程、狄拉克方程、海森堡方程和其他五六个方程是物理学理论架构的骨干。它们提炼了几个世纪的实验工作（1）与唯象理论（2）的精髓，达到了科学研究的最高境界。它们以极度浓缩的数学语言写出了物理世界的基本结构，可以说它们是造物者的诗篇。

这些方程还有一方面与诗有共同点：它们的内涵往往随着物理学的发展而产生新的、当初所完全没有想到的意义。举两个例子：上面提到过的19世纪中叶写下来的麦克斯韦方程是在本世纪初通过爱因斯坦的工作才显示出高度的对称性，而这种对称性以后逐渐发展为20世纪物理学的一个最重要的中心思想。另一个例子是狄拉克方程。它最初完全没

有被数学家所注意，而今天狄拉克流型（Dirac Manifold）已变成数学家热门研究的一个新课题。

学物理的人了解了这些像诗一样的方程的意义以后，对它们的美的感受是既直接而又十分复杂的。

它们的极度浓缩性和它们的包罗万象的特点也许可以用布雷克（W. Blake, 1757-1827）的不朽名句来描述：

*To see a World in a Grain of Sand
And a Heaven in A Wild Flower
Hold Infinity in the palm of your hand
And Eternity in an hour*

它们的巨大影响也许可以用波普（A. Pope, 1688—1744）的名句来描述：

*Nature and nature's law lay hid in night:
God said, let Newton be! And all was light.*

可是这些都不够，都不能全面地道出学物理的人面对这些方程的美的感受。缺少的似乎是一种庄严感，一种神圣感，一种初窥宇宙奥秘的畏惧感。我想缺少的恐怕正是筹建哥德式（Gothic）教堂的建筑师们所要歌颂的崇高美、灵魂美、宗教美、最终极的美。

「本文是作者于1997年1月17日在香港中华科学与社会协进会与中文大学主办的演讲会上的讲词。讲题原为“科学工作有没有风格？”」