

物理学咬文嚼字之二十四

Duality : a telling fact or a lovable naïveté ? *

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

色即是空,空即是色,色不异空,空不异色。
——《心经》

“I have been unable to achieve the sharp formulation of Bohr 's principle of complementarity !”
——Albert Einstein

摘要 存在(entity)要有清晰的 identity ,此为“一”;引入两个存在之间的相互作用,或关联、或对应,此为“二”精彩从此开始。Dual ,duality ,dualism 之类的概念在数学、物理和哲学上随处可见,后两词的汉译对偶性、两面性、双重性、二元性、二象性难以做到以偏概其全。将微观物质加上 wave-particle duality 不过是当时西方哲学上的习惯性幼稚,技术上的无奈是不可以当作物理的实在的。

存在之作为存在能被认识到,就要有一定的个性,可以一个一个地分辨开来。“一”,单元,乃万物之始。在数学上,象“0”作为加法的单位元,“1”作为乘法的单位元,或者其他的广义 identity element 或 identity operation (同等操作),都具有特殊的地位。在两个个体间引入了相互作用,世界于是变得精彩起来。我们人类关于自然的基本定律(fundamental laws)就是基于存在四种相互作用的认识上的。这样,给定一个有 N 个全同粒子组成的体系,则体系的动力学性质由粒子的动能和势能决定,其中动能可写成 $\sum_i \frac{1}{2}mv_i^2$ 的形式,是单体的,势能则可写成 $\frac{1}{2} \sum_{i,j} V_{ij}$ 的形式,是两体的(binary)。¹⁾我印象中,基于 binary 势能的物理世界,其复杂程度就够我们对付的了。所以,把多粒子体系的势能写成 $V(r_1 ,r_2 \dots r_n)$ 的形式并以此为基础构造物理学的努力,并不常见。

如同中文中存在“对”;“双”;“两”;“偶”等关于“二”的不同表达一样,关于“二”的英文词表达也很多,包括 couple ,couplet ,pair ,duad ,dyad ,duet ,duo ,twain ,twosome ,double ,doubleton ,deuce 等等。常见的是 two ,同德语的 zwei 是近亲。上文中的

binary potential 的字头“bi”,以及 diode(二极管)的字头“di”,dyad 的字头“dy”都是 double ,双倍的意思。象 dual ,deuterium(同位素氘,原子核包含一个质子,一个中子,所以很“二”)等词可能有拉丁血统,同法语词的“二”(deux)有关。同 dyad(两个矢量的直积),binary 和 dual 相联系的物理学、数学词汇比比皆是。本篇只就 dual 做详细些的探讨。其中,值得关注的是同 dual 相关的 dualism ,它是影响量子力学初期发展的重要哲学思想基础之一。Dual ,du-

* 试图将这个题目改造成中文让我很为难。“Duality”,如文中要阐述的那样,被译成了“二象性”;“二元性”;“对偶性”等貌似不同的词汇,作为题目自然不能择其一而不顾其余。“a telling fact or a lovable naïveté”,大意是“这是一个能有些说道的事实呢还是反映了某些学家的哲学幼稚呢”,用中文太长而且直白得很不恭敬。Naïveté 是法文词,也写成 naïveté ,那个带两点的“i”是要发长音的。应编辑部要求,特作此注释——笔者注

1) 注意表达式中 $1/2$ 的不同。动能表达式中的 $1/2$ 属于动能表达的固有性质,而势能表达式中 $1/2$ 来自于对 (i,j) 的求和两次重复的事实。若将势能写成 $\sum_{i<j} V_{ij}$,就没有 $1/2$ 这个系数了。注意,表达式 $\frac{1}{2} \sum_{i,j} V_{ij}$ 或者 $\sum_{i<j} V_{ij}$ 中 $i \neq j$ 并不能排除 $r_i \neq r_j$ 。这样,若将粒子看成质点,则势能项包含趋于无穷大灾难的种子。——笔者注

alism 的中文翻译很乱,其中文翻译会在适当的地方个别给出。

二由一加一构成(the sum of one and one),但“加”可理解为一个物理的操作,则“加”的效果取决于“加”的具体内容。有时候,两个不同内涵的个体通过某种关系构成了对应关系,则说两者是互为 dual(对偶)的。比如,一对通过婚姻契约 couple 的男女,之间就构成了 dual relation,双方互为对方的 dual(配偶)。Dual relation 在数学、物理方面的一个简单例子可在规则凸多面体中见到。对于凸多面体,其顶点数 V ,面数 F ,和边数 E 应满足欧拉(Euler)关系 $V + F - E = 2$ 。注意,顶点数 V 和面数 F 是相加的关系,则若存在顶点数为 V 、面数为 F 、边数为 E 的凸多面体,则一定也存在顶点数为 F 、面数为 V 、边数为 E 的凸多面体。这两个多面体之间存在 duality,是互为 dual 的。图 1 中为五个规则多面体,其中,正六面体和正八面体是对偶的,正十二面体和正二十面体是对偶的,正四面体因为顶点数和面数都是 4,是自对偶的(self-dual)。同对偶多面体(dual polyhedra)类似还有对偶铺排(dual tessellation),比如平面的六角铺排(石墨晶格)和三角铺排(fcc 结构(111)面上的原子排布)就是 dual 的。容易验证,六角格子的倒格子是三角格子,而三角格子的倒格子是六角格子。简单立方的倒格子还是简单立方格子,所以是 self-dual 的。大家看到,这里两套格子,或者两个多面体之间的 duality,是有实在的数学和物理内容的。

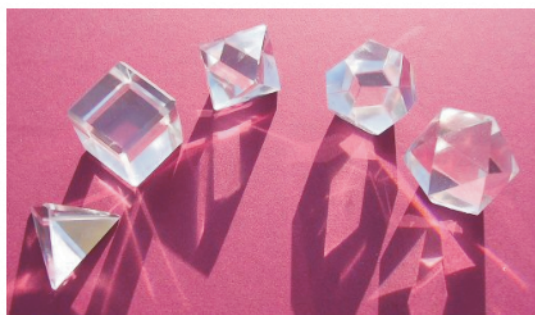


图 1 规则多面体(Platonic solids)

对偶空间(dual space)是一个重要的数学概念,它散见于物理学各个领域的数学描述中;不过因为它常常不被特意强调或者是披上了其它外衣的缘故,也许有人对这个概念还觉得生疏。代数对偶空间的定义很简单,给定矢量空间 V ,其对偶空间就是定义在 V 上的所有线性泛函的集合 V^* ,设 x 是 V 中的矢量, V^* 要求满足如下线性关系

$$(\psi + \varphi)(x) = \psi(x) + \varphi(x)$$

$$(a\psi)(x) = a\psi(x).$$

我们熟知的 Fourier 变换实际上定义了一对对偶空间(dual space)。量子力学中,坐标空间的波函数同动量空间波函数之间的变换就是 Fourier 变换,但那里被称为 Jordan 变换。将一个坐标空间里的高斯分布作 Fourier 变换,可得到一个动量空间的高斯分布,两个分布的宽度成反比。此对数学家来说非常平凡的结果曾经作为所谓不确定性原理(uncertainty principle)的推导。研究对偶空间的好处是,在一个空间中散落于各处的一个物理性质,其可能在对偶空间是落在一个或少数几个点上的。一国之公民散落在各个地区的大量家庭里,作住户空间到党派空间的 Fourier 变换,可能会发现全国人民分布于几个很少的孤立点(不同党派)上,这样对该国政治形态从党派角度的描述就能简洁明快一些。作为坐标空间函数的势能项常常用 q -空间形式给出就是这个原因。物理学中常遇到的一个简单的 Fourier 变换例子是在光学和凝聚态物理常见的散射(衍射)问题。注意到在晶体学中,给定实空间中的格子 R ,则关系式 $e^{2\pi i \vec{k} \cdot \vec{R}} = 1$ 定义了一个长度量纲为 L^{-1} 的 K 空间的格子,两套格子是 reciprocal²⁾的,dual 的,故也有 dual lattice 的说法。这个定义实际上来自周期性格子 Fourier 变化的性质,可惜许多教科书未加指明。对于任意的原子分布集合(周期性格子是特例),物理上可以从散射的 Fraunhofer 极限来定义倒格子,即由复散射振幅 $F(\vec{g}) = \sum_j f_j(\vec{g}) e^{2\pi i \vec{g} \cdot \vec{r}_j}$,其中 $f_j(\vec{g})$ 是原子的散射因子,得到的散射强度的分布 $F^*(\vec{g})F(\vec{g})$ 就直观地给出了倒格子的图像(未必是有序的点阵)。透射电镜技术的关键概念就是这样的实空间分布(原子像)和动量空间分布(衍射斑点)之间的对偶关系(图 2)。Fourier 分析的威力远超笔者的想象力。实际的衍射问题,涉及的都是有限空间的 duality 变换,带入了远比纯数学形式复杂得多的实际问题。相关问题吸引了许多优秀科学家,如何得到忠实的分布信息就看研究者的功夫了。A. M. Cormack 就是因为 Fourier 分析方面的功力(用于 X 射线 CT 技术的发明)获得了 1979 年的诺贝尔

2) Reciprocal lattice, 汉译倒格子,没能反映出 reciprocal 的意思。Reciprocal relation 也同样是贯穿数学、物理、哲学和日常生活表达的一个重要词汇。容另议。——笔者注

生理或医学奖. 他自己写到:“(在本人找到问题的

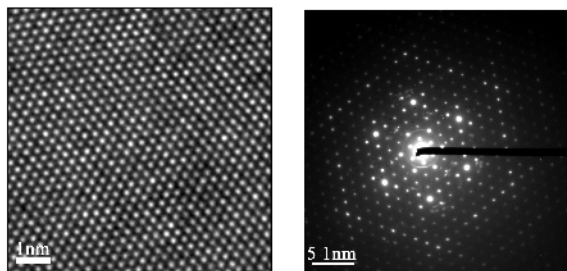


图2 左图:透射电子显微镜获得的 $S(110)$ 面的原子像;右图: Mn_2O_3 沿 $[111]$ (zone axis) 的电子衍射花样. 两者的区别是,晶体的原子像具有空间平移对称性,而衍射花样在空间上是平移对称的,但当计入强度时,则没有平移对称性了. 后者更有效地揭示了晶体的对称性

解)十四年以后,我发现 Radon 早在 1917 年就解决了这个问题.”学好 Fourier 变换对物理学家的重要性,由此可见一斑.

在物理学领域,一个有趣的现象是,象 Fourier 分析以及固体物理中遇到的空间铺排等问题中都存在实在的 duality,但似乎很少有课本会明确地(explcitedly)加以陈述. 如果提起 duality,可能很多人的第一个反应是关于微观物质的波粒二象性(wave-particle duality),以及玻尔为了从哲学的角度支持波粒二象性而提出的所谓互补性原理(principle of complementarity). 波粒二象性这个基于当时欧洲典型的哲学幼稚病的概念,在今天的量子力学课本或研究论文中仍然时常出没,不能不令人惊叹^[1-2].

在讨论波粒二象性之前,有必要弄清楚所谓的“波”和“粒子”到底指的是什么. 电子(原意为琥珀上带的东西;我再强调一遍,西文 electron 上没有“子”的形象或含义^[3])和光子(photon)的粒子(particle)图像的形成经过一个演化的过程. 光最初的粒子形象是颗粒(corpuscule),就象微小的冰雹从天而降. 光作为粒子,photon,的形象的确立是在光电效应之后,爱因斯坦给出的解释是光以能量单元的形式为固体所吸收并激发出电子. 而电子的粒子形象的建立是基于磁场下电子被偏转的事实. 偏转的电子能转动真空管中的小风车,说明它带动量,并且通过碰撞将动量传递给了风车. 这里,所谓电子或光子的粒子形象,还是个不讲究尺度(dimension)的存在,如同经典力学里所谓的质点.

但是,把电子当作无尺度的粒子是很危险的. 两个尺度为零的粒子发生作用,就可能出现 $r \rightarrow 0$; 则作用势 $V(r) \propto \frac{1}{r^n}$ ($n \geq 1$) 就会变得无穷大,这是一类

物理学灾难的起源. 对点粒子形象带来的这个灾难的一个规避方案是引入弦论. 但用一维弦的振动模式来代替本就不是零尺度的粒子,是否是合理有效的方案,笔者学浅,不敢妄议. 不过薛定谔的想法,即各种基本粒子不过都是“form”(形式而已)^[4],也许更接近真实:粒子有硬核,但却不是实体,粒子的大小由探测粒子(probing particle)同其相互作用来决定. 关于电子大小的不断向下修订似乎证实物理学界是一直采纳了这个观点的,它反映的哲学是,一个存在的性质是在同其它具体的存在发生相互作用时表现出来的. 当然,这个“form”形象数学上不是容易描述的.

那么“波”的形象又是什么样的?对光的波动说的需求来源于干涉现象的观察,人们关于波的直观形象是石子投入池塘所荡起的涟漪(图3). 不过,涟漪的数学描述可是非常困难的,实际上当物理学教科书谈论波的时候,它常常是等同于理想琴弦振动的解. 琴弦振动的方程是一维波动方程 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2$

$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, 其解为正弦函数形式 $\sin(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t + \phi)$ 或者余弦也行), 或者在引入复数以后写成 $e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t + \phi)}$ 的形式. 三维波动方程的解为球面波 $\frac{A_0}{r} e^{i(kr - \omega t + \phi)}$. 杨

式双缝干涉图像就是用 $\sin(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t + \phi)$ 函数的叠加解释的,而球面波常用于粒子散射问题的处理.

此外,函数 $e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}$ 还被赋予了沿一个被波矢 \vec{k} 规定的空间方向上(但波矢 \vec{k} 不在坐标空间中,而在坐标空间的 dual space 里!)飞行的自由粒子束的图像,在垂直于该方向的平面内是均匀分布的. 单个粒子在沿一个方向上的全空间里的概率分布,在垂直于该方向的平面内均匀分布的束,这显然和我们关于光子和电子的认识及形象预期不符. 就算是自由的电子,也应该在空间上是有限的吧. 于是有人基于关于傅里叶分析的知识提出了波包作为粒子形象的想法(我只见到过一维的表示. 就算把电子看作波包,也应该是三维的吧?),因为对于有限范围 $[0, L]$ 内的函数,哪怕不是光滑函数,都是可以做傅里叶展开的. 所谓波包作为电子、光子的波动图像,本质上还是要用到正弦函数的简单性而已. 其实大家可能已经注意到了,二维波动方程比一维和三维的都难解,于是我们大家的头脑里也就少了作为二维波动形式的电子或光子的形象. 后来,孤立子(soliton, 又称孤立波, solitary wave)的研究逐渐走

入大家的视野 ;由于孤立子在水面上首先被发现 ,能传播且在碰撞后能保持其形态 ,一度也曾被当作是电子或光子的形象 .其表达用到了 sech (hyperbolic secant) 函数 ,比 $\sin(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t + \phi)$ 的形式要复杂那么一点 .其实 ,被赋予自由粒子形象的 e^{ikx} 函数 ,描述孤立子形象的 $\text{sech}(x)$ 函数 ,以及可作为完美波包的高斯分布函数 ,在物理世界中的聚首 ,是由它们三者之间的深刻但却简单的联系所决定的 :即 $\text{sech}(x)$ 函数和高斯分布函数都是关于 e^{ikx} 函数 self-dual 的 .我总有个揣测 ,所谓物理图像 ,是依赖于物理学家能掌握的数学水平的 ,那么他们宣称描述了物理真实的真实性就值得探讨了 .



图3 波 ,来自水面的重要物理概念原型 .水滴或石子击打池塘 ,泛起层层涟漪 ,此为光之波动学说概念图像的源泉

光的波动性建立在经典的光的双缝干涉实验上 ,而所谓电子的波动性则建立在电子束经镍晶体散射的斑点状强度分布上的 ,后者由 Davisson 和 Germer 于 1927 年完成^[5] .关于更大一点尺度的物质之波动性的验证 ,小分子束的双缝干涉完成于 1930 年^[6] , C_{60} 分子的双缝干涉完成于 1999 年^[7] ;不过 , C_{60} 分子实验中的分布花样依赖于对 C_{60} 分子在双缝后面的先离化后探测^[7] ,若把那个花样解释成物质波动性的结果 ,则是对量子力学中的所谓 Welch-weg 哲学³⁾——关于量子世界奇异性的一个证据——的一个抡圆了的巴掌 .这些经典实验的解释都是用的 \sin 函数 ,但是 \sin 函数却只能部分地解释双缝干涉现象 ,比如明暗相间条纹或者斑点的出现 ,如此而已 .对整个记录下的花样的精细而微的描述 ,当然是给出一个关于远处屏幕上的强度分布 $I(x, y)$ (图 4) ,简单的 \sin 函数就显得吃力了 .重要的一点是 ,把一个固体屏幕上记录(先不管记录原理)下来的某个信号当作是入射到其上的电子或光子的量子力学意义上的分布是没有坚实物理基础的 ;一个值得注意的事实是 ,电子的尺度是远小于 pm 量级的 ,而一个固体记录下单个电子的痕迹却

不会小于 2\AA ,即固体表面上一个原子占据空间的

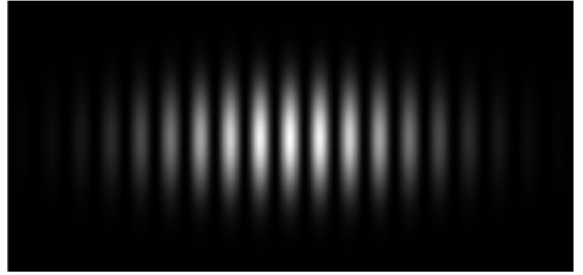


图4 双缝干涉花样 .将电子或光子理解成 \sin 函数形式的波并不能解释这样获得的强度分布 .重要的是 ,不管是显影板还是移动的固体探测器 ,其获得的强度分布应为同一个描述电子或光子与具体记录器件之间的相互作用的卷积^[8] .而这个相互作用正是量子力学要理解的问题 ,且同样会出现侧重于波动性或粒子性解释的局面

尺度 ! 因此 ,所谓单电子双缝衍射实验凭屏幕记录的诠释 ,要留神别走得太远 !^[8]

现在 ,我们看到 ,到 1927 年前后 ,人们已经学会了区别看待电子、光子等微观物质的性质了 :光电效应中的光子 ,康普顿散射中的光子和电子 ,磁场下偏转的电子 ,都被看作是质点似的粒子 ,而经固体散射的电子和 X 射线光子都被看作波 ,用 \sin 函数表示或代替 .光子和电子之类的微观物质似乎具有了 particle-like 和 wave-like 的双重品格 .为了说明这种双重品格 ,人们引入了波粒二象性 (wave - particle duality) 的概念 .这里的 duality 并不象动量空间的波函数与坐标空间的波函数之间的 dual 关系 ,而只是口头表达的一个事物之两面 (类似一个硬币的两面 ,没有必然的关联) 的意思 .但不久由 wave - particle duality 玻尔发展出了互补原理 ,认为物质既表现出粒子性 ,也表现出波动性 ,但却不可以同时表现出两种性质 ,而我们对微观世界的图像当依赖于由这两种观点所得结果的互补 .互补性原理被认为是玻尔对量子力学的一个重要贡献 ,是哥本哈根诠释的组成部分 .不过 ,玻尔最开始提出互补原理时指的是“时空坐标化 (space - time coordination)”和“因果律的确定 (claim of causality)”之间的互补 ,当然这和 wave - particle 性质之间的互补有一定的关联 .

3) 英文写法为 which-way (哪条路径) .指在光子、电子等的双缝干涉实验中 ,若在双缝和记录屏幕之间对光子、电子探测以确定到底是通过哪个狭缝过来的 ,则干涉条纹就消失了 .无数的教科书和论文不假思索地转述这个故事是物理世界的一大奇观 .——笔者注

然而,认为物质具有波粒二象性从一开始就不那么令人信服.除了粒子和波的图像本身太过简单以外,这个概念还遭遇许多其他困难.(1)这个 duality 来源于我们描述物理时所采用的连续和分立两种方式之间的 duality,是一种技术(technical)上的分别.连续的描述采用了微分方程(同数学的分析相接近),而不连续描述人们似乎只能借助于日常语言(同数学的算术相接近).麦克斯韦方程组描述了光,但是其中没有粒子性的身影(2)人们不可能设计出一个只涉及物质的粒子性或波动性之一侧面就足够提供令人满意描述的实验(there is no experimental arrangement in which one of these two pictures alone is sufficient to provide a satisfactory description of phenomena)^[9,10].一个有趣的例子是,双缝干涉据说能验证光的波动性,但是确定存在干涉条纹的测量设备,比如光电倍增管,恰恰利用的是光电效应.而我们知道,光子的概念就是因为这个所谓证明了光的粒子性的效应而提出来的.利用粒子性行为(诠释)得到某种意义的波动性,但却把粒子性和波动性当作截然不同的、互补的两种性质,逻辑上是说不过去的(3)其实,sine 函数或别的波的形式对双缝干涉的描述在使用单光子(据说第一个实验完成于1909年)和单电子(第一个实验完成于1974年)获得干涉花样后就显得难以自圆其说了(图5).为此,Dirac 提出了光子自干涉的概念,具体内涵是什么,笔者未能领会,遗憾.

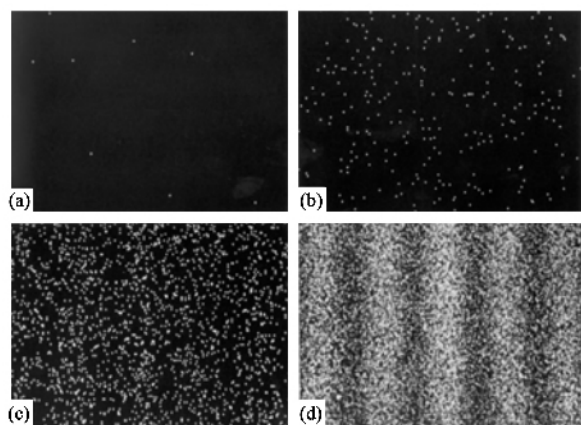


图5 单电子双缝干涉实验中对到达电子的记录.显然,是不同时刻的单个被记录行为的经典累加而非量子叠加,给出了人们要理解为波动性之结果的明暗相间条纹.图片出自 <http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>

互补性原理同玻尔的一些其他关于量子力学的表述一样,今天看来对理解量子力学并无助益.1949

年,爱因斯坦就直白地写到他至今也不能获得对玻尔的互补性原理的清晰表述(原文见题头).把光子、电子等存在理解成既不是波也不是粒子,或者既是波也是粒子,都于事无补.后来,Gamow 新造了 wavelcle 一词(也有文献说是 Eddington 造的),并强调“电子既不是波也不是粒子,而是全新的事物(an electron is neither a wave or a particle...It is something else completely.)”^[11]

波粒二象性的哲学基础是 dualism,汉译二元论,同 monism(一元论)和 holism(整体论)相对照. Dualism,按照字典的解释,指双重存在的状态;一分为二的分法;任何建立在双重原则上,或作二元区分的基础上的体系.与波粒二象性类似的主观-客观 dualism,物质-精神 dualism,思维-肉体 dualism,善-恶 dualism 等词汇充斥着西方哲学,尤其是德国哲学.它反映的是西方人将事物的两面当作对立的极端的思维方式,其所依赖的简单二分法如同中国高考文理分科的依据,是一种哲学常见幼稚病.其思想起源可追溯到中世纪的信条“duplex veritas”,即两种论断,虽然它们的逻辑合取会导致明显的矛盾,却可能都为真(that two theses, though their logical conjunction leads to a flat contradiction, may be both true)!笔者以为,事物固然会表现出极端的且都为真实的两面,但就像硬币的两面图案印到一张纸上不等于拥有一个硬币一样,把质点形象的粒子性和 sine 函数形象的波动性加到一起并不能给出电子、光子等微观物质的物理真实.光经过双缝表现出同光到达金属表面时不一致的性质,逻辑上并不能得出光子患有人格分裂的结论.微观物质就是微观物质,所谓的“粒子性”,所谓的“波动性”,其间的 duality 也罢,矛盾(contradiction, inconsistency)也罢,不过是我们认识上、描述上的 duality 和矛盾,而不是物质的本性!我们所采用的质点或 sine 函数形式的图像,其实同真实的自然是不切合的(All these are counter the nature of reality),不可以把人类认识的局限性强加于认识的对象,把技术上的无奈当作物理的实在!

互补原理可能陷入的一个危险是自一个图像出发会“互补”出一些原本不存在的内容来.丹麦心理学家 Edgar Rubin 就构造了名为“花瓶幻觉”的这样一幅画(图6).也许作者的本意是(或者大自然只存在)在白纸上画一个黑色花瓶(两个黑色人脸),所谓的人脸(花瓶)不过是我们视觉的错觉(或者 reasoning 的附加结果).虽然,采用一定的偏见,人



图6 Edgar Rubin's Vase Illusion. 从图中能看到颜色互补的两个人脸和一个具有旋转对称性(虽然只是在平面上)的花瓶

们能从这幅画中看到两张脸或者一个花瓶来,但这幅画却不等于两张脸和一个花瓶的互补。

东方智慧总希望在对立中寻求其统一的本原或努力将之调和。所谓“福兮祸所依,祸兮福所存”,体现的就是不把对立的性质看作分立存在的哲学。就人而言,善变两面派⁴⁾手腕的人其内心深处也是具有一套完整自洽的人格的。在弱小面前的飞扬跋扈和在强权面前的卑躬屈膝,都是同一个人内心深处浑然一体的人格之自然流露,并不必然伴随切换的艰涩。我这种说法是有科学依据的。二象性的说法对应的数学表述是 Heaviside 台阶函数,一侧为“0”,一侧为“1”,泾渭分明。其实,存在很多形式的自“0”连续且迅速地变换到“1”的开关函数,Heaviside 台阶函数不过是极限情况而已(图7)!

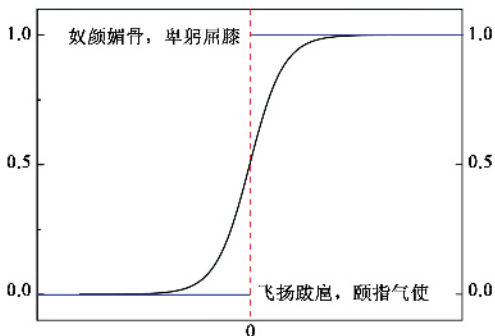


图7 Heaviside 台阶函数(蓝色)是多种开关函数(黑色)的极端化。对立的两个极端常常是平滑地连接着的一个完美整体(见网刊彩图)

微观物质的波粒二象性是人为地安上去的两种面貌,那是因为人们只会处理质点的简单运动和 Sine 函数的变化,等后来人们对双曲函数有点理解能力,观察到水面上的孤立波后,孤立子式的粒子存在也就变成了一种可接受的存在图像了。按照作家韩少功的说法,这是典型的“街上卖什么药就得什么病”的症状。佛家讲究的认识之最高境界是“入不二法门”,显然同用 duality 糊弄事是两种不同的哲

学态度。《维摩诘经·入不二法门品》云：“如我意者,于一切法无言无说,无示无识,离诸问答,是为入不二法门。”文殊师利问维摩诘：“我等各自说已。仁者当说,何等是菩萨入不二法门?”维摩诘默然不应。文殊曰：“善哉善哉。乃至无有文字语言,是真入不二法门。”如何是微观物质的图像,如果作为教师不允许采取默然不应态度,那么言说时当在深入思考和充分了解细节之后吧!善哉。

参考文献

- [1] Ghose P, Home D. Foundations of Physics, 1996 26 943
- [2] Duncan A, Janssen M. Pascual Jordan's resolution of the conundrum of the wave - particle duality of light. Preprint submitted to Elsevier Science, 2008
- [3] 曹则贤. 物理 2009 38 276[Cao Z X. Wuli(Physics) 2009, 38 276(in Chinese)]
- [4] Schrödinger E; Nature and Greeks' and ' Science and Humanism'. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- [5] Davission C, Germer L H. Nature, 1927, 119 558
- [6] Estermann I, Stern O, Molekularstrahlen B V. Zeitschrift für Physik, 1930 61 95
- [7] Zeilinger A et al. Nature, 1999, 401 :680
- [8] 曹则贤. 物理 2008 37 815[Cao Z X. Wuli(Physics) 2008, 37 815(in Chinese)]
- [9] Grünbaum A. The Journal of Philosophy, 1957 54 717
- [10] Bitbol M, Schrödinger's philosophy of quantum mechanics, Springer, 1996
- [11] George G. One Two Three... Infinity. Bantam Books, 1961

更正

《物理学咬文嚼字之二十:准、贗、虚、假》的注脚2“Soliton 最先是作为一种浅水波被发现的。这个词被汉译成孤立子是天大的误会。我猜想部分地是把其词源 solitary(团结的、结实的、稳定的)误认为

4) “两面派”一说源远流长。元朝末年,元军和朱元璋领导的义军在黄河以北展开了拉锯战。老百姓苦不堪言,谁来了都要欢迎,都要在门板上贴上红红绿绿的欢迎标语,来得勤换得也快。豫北怀庆府人生活节俭,于是想出了个一劳永逸的办法:用一块薄薄的木板,一面写着欢迎元军的“保境安民”,另一面写上欢迎义军“驱除鞑虏,恢复中华”。哪方来了,就翻出欢迎哪方的标语,既省钱又方便。但想不到这个方法后来竟惹出大祸。一次,朱元璋的大将常遇春率军进驻怀庆府,进城见家家门口五颜六色的木牌上满是欢迎标语,心里挺高兴。可是突然一阵狂风刮来,木牌翻转,暴露了反面欢迎元军的标语。常遇春大怒,下令将凡是挂两面牌的人家都满门抄斩。现在常说的“两面派”就是从怀庆府“两面牌”演变而来。——笔者注

是 sole 所造成的”,其内容是完全错误的.我是把 solitary 同 solidaire (solidary), solitarité (solitariness) 弄混了. Solitary 就是孤立的、孤独的、离群索居的意思.我所犯糊涂的想法是基于两个孤立波碰撞后保持形状的特性,望文生义地把 solitary 混同了 solidary 和 solidaire (团结,为了共同利益走到一起)了.法语孤立波 l'onde solitaire 同“l'onde solidaire”发音都是一样的,这可能是我脑子里一直混淆 soliton

概念的原因. Solidary, 按电子版 dictionary.com 的解释,是“characterized by or involving community of responsibilities and interests”的意思,但我也搞不懂为什么 Merriam-Webster online dictionary 都不收 solidary 这个形容词.谨向广大读者致歉!

中国科学院物理研究所 曹则贤

· 物理新闻和动态 ·

高温超导体中电子角色在实空间和抽象空间之间的转换

在某些铜氧化物中,当局域于晶格原子的电子成为可移动,材料便显现出超导电性.上述过程所涉及的是电子角色在实空间(r 空间)和抽象空间(动量空间 k 空间)之间的转换.最近,来自美国康奈尔大学的 Y. Kohsaka 等,采用新发展的 r 空间和 k 空间同时成像的电子显微技术,研究了高温超导体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 的电子结构.他们发现,当以减少电荷载流子密度的方式逼近材料的绝缘态(Mott 绝缘态),在 k 空间退局域的 Cooper 对减少到零,它们被在 r 空间对称(平移和旋转)破缺的局域(电子或孔穴)质能隙态所取代.

传统的金属具有大量的传导电子,它们以波的形式弥散于整个晶体中.在理想情况下,可以认为,其中的波与波之间没有相互作用,而电子的量子态可以用波矢 k (正比于电子动量)来表征.电子降低自身能量的倾向以及 Pauli 不相容原理,使得在 k 空间只有能量小于 Fermi 能级的位置被占据.在超导金属中,上述理想状况被破坏,在 Fermi 面上两个动量刚好相反的电子得以配成 Cooper 对,以至于宏观数量的 Cooper 对可以凝结到单一量子态—发生超导.因此,超导现象可以仅仅借助于动量空间来理解.然而,在铜氧化物中,电子间的库仑排斥作用相当强,有时足以使电子局域于一个个原子格点,形成所谓 Mott 绝缘体,这导致不可能仅从动量空间的角度理解高温超导体.为弄清机制,曾进行了大量实验,这包括:角分辨光发射谱,扫描隧道显微镜/扫描隧道谱.不过,这些实验的不足在于:光发射谱仅仅针对动量空间,而扫描隧道实验探测的仅仅是实空间.

Kohsaka 等通过傅立叶分析技术,将扫描隧道实验获得的实空间(电子密度驻波)图像转换成动量空间的波矢,从而辨认出 Fermi 面中与超导密切相关的片段.在动量空间的节(nodal)方向,Cooper 对的束缚能为零.实空间驻波与拆散超导 Cooper 对的低能激发相联系,而观察到的实空间中电子密度的周期性畴结构,则对应高能的质量能隙态激发.激发能低与高的分界值,对掺杂程度不敏感,但随着载流子密度减小, Fermi 面中超导相关片段的尺寸必定迅速减小.

(戴闻 编译自 Nature 2008 454 :1062,1072)

一个新材料的亮相——石墨烷

英国曼彻斯特大学由 A. Geim 和 K. Novoselov 教授所领导的研究组在 2004 年开发出一种奇异的材料“石墨烯(graphene)”.这种材料是由碳原子构成的二维晶体,它具有良好的导电、导热性能,它虽然很薄,但强度却很高.有关石墨烯材料的性能,本刊曾在 2008 年第 4 期的“物理新闻和动态”栏中介绍过有关的内容.经过 5 年的努力,这个研究团队又在 2009 年 2 月份的《Science》上发表了一篇新的论文,介绍他们制成的又一新材料——“石墨烷(graphane)”.石墨烷是在石墨烯晶片内的每一个碳原子处吸附一个氢原子所构成,制造工艺相当复杂,难度很大.它首先要将氢分子打破,使其分解为 2 个氢原子,而分解氢分子需要较高的温度,但高温又极易破坏石墨烯的晶态结构.所以研究组是先让氢分子进入石墨烯晶体结构内,再利用放电的方法使氢分子电离为氢原子,并驱动氢原子向碳原子方向漂移,最终吸附在每个碳原子的周围.研究组测定了石墨烷的结构,发现晶片并不平直,而是类似于钻石晶体,晶片表面有一定的起伏度.

研究组还测试了石墨烷的其他物理性能,发现石墨烷是一个不导电的绝缘体,但仍保持有较高的强度.因此可以用它来作为液态气体的贮存罐,特别是用它来贮存液态氢,这样在长途运输液氢燃料时具有安全、省钱和节能的优点.

石墨烷材料的诞生使 A. Geim 教授确信,利用石墨烯晶片作为基本框架,然后在元素周期表中选取需要的原子来使碳原子吸附,就可产生出一系列的石墨烯化学衍生物,对这些化学衍生物进行调节,即可改变它们的电性质.按照实际的需要,可使它们分别成为良导体、半导体或绝缘体.这对电子工业来说具有极大的实用价值.石墨烯化学衍生物的另一优点是它具有可逆性,只要对材料加热就能让吸附在碳原子上的其他原子脱离而重新转变为石墨烯.

(云中客 摘自 Science, 1 February 2009)