

物理学咬文嚼字之八十三

简单与复杂

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-12-31 收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20170208

La semplicità è l'ultima sofisticazione.¹⁾

——Leonardo da Vinci

对于真正的知识来说, 危害最大的就是使用含混不清的概念和字眼。

——托尔斯泰

摘要 简单性从来不简单, 复杂性一如既往地错综复杂。Complex, complicated, complexity, complexion, complexification, 还有 symplectic, quaplectic, 都在说什么?

1 Simple

不知何时起, 笔者经常能读到关于物理学之简单性(simplicity of physics)的论说。对于对物理学始终不明所以的笔者来说, 这简单性一说直如五里雾, 让人一时摸不着头脑。简单, 单指组成单元只有一个, 简的意思是少、少易, 这和德语的 einfach (一重)完全一致。英文的简单是 simple, 来自古法语, sim-(one) + plo (fold) 字面上也是“一重”的意思。Einfach (一重)的反义词是 mehrfach (多重), simple (one-fold)的反义词是 manifold。罗素那样懂哲学拿文学诺奖的数学家兼物理学家拥有 manifold wisdom (多重智慧), 一个黑白红道通吃的精英人们私下里会夸奖他们是 manifold villain (多面流氓)。有趣的是, 名词 manifold 现在在数学上变成了一个重要概念, 对应德语的

die Mannigfaltigkeit 一词。该词由黎曼于 1854 年引入, 那时他指的是嵌入在 R^n -空间中的 n -重展开的(n -fach ausdehnt)几何对象。汉译“流形”不知是否出自译者的创意。

世界可以是简单的, 但我们对世界的理解不能满足于简单。头脑简单的人(simpleton)是会遭人嘲笑的。伽利略在他的《关于两种主要世界体系的对话》一书中, 给那个为地心说辩护的角色起的名字就是 Simplicio。Simplicio, 那就是 simpleton, 意大利人哪里会看不出来, 所以梵蒂冈的大佬就觉得受到了奚落。伽利略被勒令检讨, 而后被软禁在家, 这同布鲁诺的遭遇相比, 算是捡了个大便宜。国人有嘲弄年轻人 too young too simple 的, 遂有今日随处可见的准成语“图样图森破”。数学家用 simple, semisimple 修饰的概念, 比如李群(Lie group), 一点都不简单。李群(Lie group)可能是让许多人都头疼

的概念。李群可根据其代数性质分为 simple, semisimple, solvable (可解的), nilpotent (零势的), 和 abelian (阿贝尔的)。数学家们客气地称一类李群为 simple Lie group, 可它竟复杂得没有被普遍接受的定义(unfortunately, there is no generally accepted definition of a simple Lie group)! 目前, 一般认为连通的、非阿贝尔的, 其每一个闭合连通的正规子群要么是单位元(不变操作)要么是群本身的那么一类李群, 是 simple 的。至于 semisimple Lie group, semisimple 就说明它不是那么 simple。Semisimple Lie group 是其李代数为简单李代数之积的那些李群。

物理学家津津乐道的简单性原理(the principle of simplicity), 也同样不易理解? 狄拉克 1939 年曾有关于数学与物理的关系的文章, 论及简单性和复杂性^[1]。数学应用于物理, 要求用来表述运动定律的方程

1) Simplicity is the ultimate sophistication, 据说是达芬奇说的。此句或对应中文的大道至简。

形式简单(数学家会不会认为这是因为物理学家数学懂得少的缘故?)。简单形式的方程在经典力学中看似很成功, 这为物理学家提供了 a principle of simplicity。这简单性是运动定律的简单性, 可不是物理现象的简单性。牛顿的引力理论后来为爱因斯坦的广义相对论所取代。从高级数学的角度来看, 爱因斯坦的引力理论比牛顿的要简单, 但这要赋予简单性特别的、微妙的意义。相对论的数学对大多数人来说还是蛮复杂的, 但我们还是需要它, 狄拉克把这归结于其拥有 great mathematical beauty: 在狭义相对论时空连续统的变换群从伽利略群变成了洛伦兹群, 而后者相对于前者是美的。据说广义相对论比起狭义相对论, 美的增加有限。简单性原则为数学美的原则所取代, 这两者有时是一致的。所谓的数学美, 狄拉克似乎是愿意将之归结为变换的美, 虽然变换的美也不好定义。不过, 数学的美也罢, 简单性也罢, 可能不过是那么一说而已。狄拉克方程 $(i\gamma \cdot \partial - m)\psi = 0$ 看起来可简单了, 但人们说它是 deceptively simple

或者 deceptively simple (欺骗性地简单)。玻尔兹曼的熵公式 $S = k \log W$ 也简单, 但懂行的会说 it is disarmingly simple (致人麻痹大意地简单)^[2]。这些其实都是委婉的说法, 对于不愿深究的人来说, 一切都是简单的。正所谓浅者见浅, 深者见深。

Simple, simplex, 字面上是 one-plo (一重的)。依此类推, two-plo 的是 double, duplex, three-plo 的是 triple, triplex。单饼是 simplex 的, 千层饼, 应该是 milleplex 的(图 1), 而“刘郎已恨蓬山远, 更隔蓬山一万重”^[3]中的一万重, 那应该是 decamilleplex 了。Googolplex 的意思是 10^{100} -重的。Googol 就是大数 10^{100} , 10 自乘 100 次, 其正确的汉译就应该是“百度(100次)”。有钱的文盲签支票时把 googol 写成了 google, 于是如今就有了 google 这个词。谷歌这个莫名其妙的汉译怎么端详也没有动词的意思, 所以人们还是说“google 一下”。中文的“百度”, 据说是来自“众里寻他千百度”, 如此说反倒失去了和 googol 天然的亲戚关系。如果只是把一些

单元组合到一起(compound), 而不明指多少重, 那就是 compounded 或者 complex 的。

2 Complex

中文的复杂对应英文的 complex 和 complicate。Complex 来自拉丁文的 com+plectere (to weave, to braid, together), 而 complicate 来自拉丁文的 com+plicare (to weave, to fold, together)。但是 complex, 作形容词和名词, 似乎更多强调是多单元交织在一起的事实, 而 complicate, 作动词和形容词, 更多强调折叠、纠缠到一起的状态, 作形容词时更多用到的是 complicated 的形式^[3]。

一个 complex 系统由单元间的相互关联(inter-dependencies)来表征, 而一个 complicated 系统则由其层次(layers)加以表征。Complex 的用法非常复杂(complicated)。Complex 作为名词在精神分析中指同某个对象相联系的冲动、想法和情感的纠缠体, 如弗洛伊德的 Oedipus complex, 荣格的 Electra complex, 此处 complex 被译成情意结^[4]。有人评《功夫熊猫 2》, 说“火器来了, 功夫走了, 天朝大国从此萎靡受气, 在以华洋交恶之后的近代为背景的武侠中, 这是一个巨大的肿块, 或曰‘情结’”, 这情结就是 complex。由 complex 衍生出名词 complexity (复杂性), 和 complexion, 而 complexion 竟然也可以当动词用, 有 complexioned 的说法。Complexion, 汉译肤色、脾气、性质, 但是必须记住它一直是在说所涉及的对象是 complex 的(多单元的、多侧面



图1 单饼, simplex 饼; 千层饼, milleplex 饼

2) 出自李商隐的《无题》。这首诗最打动我的一句是“书被催成墨未浓”。

3) 另有一个词, sophisticated, 也被汉译成“复杂的”。这个词源于 sophistry, 聪明人的把戏, sophisticated 可理解为 highly complex or refined。

4) Oedipus complex, 恋母情意结; Electra complex, 恋父情意结。

的), 比如“put a different complexion on things”首先应该理解为“事物的构成”全变了。这一点, 当 complexion 被用于物理问题时就更明白了, 例如在“each permutation (of 10^{24} degree of freedoms) still counts as a distinct microstate (‘complexion’) of the system with that energy profile.”^[2]这句中, 体系的微状态也可以名之为 complexion, 就是在强调它是由许多单元构成的一个整体; 而在例句“...They must have pondered matter's irreducible complexions—its elements (他们肯定想到过物质之不可约的构成——它的元素)”中^[3], 这复杂的 complexion 会明确指向元素⁵⁾。不过, 相对于 complex 的元素还是 simplex。庞加莱曾解释(几何上)如何从 simplexes 构造多维的 complexes, 他给我们演示了(simplexes)之组装所依据的规则可以用矩阵来描述^[4]。

Complex 作形容词对应的抽象名词为 complexity。Complicity 虽然也来自 complex, 但它的意思是团伙犯罪、共谋, 不要和 complexity 弄混了。复杂性问题的研究是当前的科学时尚, 有的研究所干脆就命名为 institute of complexity。

3 Complex number

Complex 强调复合构造, a system with many parts。所谓的复数, complex number, 就是有两节的数。如果把复数写成 $z=x+iy$, 并

且把 i 理解为 $i*i=-1$, 则相应的 x, y 就被理解为实部(real part)和虚部(imaginary part)。由此有人会忘记 i 不过就是个记号而陷入关于虚、实的蹈虚讨论, 就不能理解为什么 imaginary number is real (虚数是实的)。认识到 complex number 包含两部分, 不妨把它写成 (x, y) , 则那个 $i*i=-1$ 实际上对应的是这种二元数之乘法规则 $(a, b)*(c, d)=(ac-bd, ad+bc)$ 的一个特例 $(0, 1)*(0, 1)=(-1, 0)$ 而已。

Complex number, 或者说 binarion, 的两部分是按照一个代数规则粘接到一起的, 它就和表示欧几里得平面的坐标组合 (x, y) 有些区别。最简单的, $z=x+iy$ 代表的复平面和欧几里得平面 R^2 就不完全是一回事儿。复平面域上的复变函数 $f(z)=u(x, y)+iv(x, y)$, 其解析性的 Cauchy—Riemann 条件为 $\partial u/\partial x=\partial v/\partial y, \partial u/\partial y=-\partial v/\partial x$, 从这里应该看到复数乘法规则的身影。量子力学的波函数, 是复函数, 但不是复变函数。有人说“to turn it into the ‘real’ world, the norm of the complex number is to be used (为了把波函数带入真实世界, 就用上了复数求模)”, 有点太单纯(simple-minded)了。复数的各个部分本来就是 real 的, 就波函数而言, 求模也足以把它带入真实的物理世界——波函数的诠释还一直是一些物理学家在忙着的活计。

由 complex number 中的 complex 还衍生出动词 complexify 和 com-

plexification 名词, 光看这字就知道它够复杂的。在数学上, 一个向量空间的 complexification, 复化, 就是将其从实数域扩展到复数域。Clifford 代数 $Cl_{p, q}(R)$ 的复化得到的是 $Cl_{p+q}(C)$, 狄拉克旋量就是 $Cl_{p+q}(C)$ 基本表示中的一个元素^[5]。

4 Symplectic 与 quaplectic

为了描述一类同 complex 有深刻渊源的数学结构, 仿照 complex number 中 complex 的意思, 伟大的外尔(Hermann Weyl)⁶⁾构造了 symplectic 一词。据说构造 symplectic 依据的是希腊语 $\sigma\upsilon\mu$ (sym) + $\pi\lambda\epsilon\kappa\tau\iota\kappa\acute{o}\varsigma$ (plektikós), 不过它的拉丁语转写也应该是 com+plectere, 所以可以说 complex 和 symplectic 就是一个词。Symplectic 一词传入中国, 其意思未加辨识, 只用“辛”字转写了 sym- 糊弄了事。笔者初见辛群与辛几何(辛拓扑, describing the geometry of differentiable manifolds equipped with a closed, nondegenerate 2-form), 从字面上看是千思不得其解。这样对付科学的态度, 足以解释此地科学的现状。

据外尔自述, 他一开始论及 line complexes (线簇, 线辫?)用的是“complex group”, Dickson 则称之为“Abelian linear group”。Line complexes 是用反对称双线性形式为零来定义的, 注意上文提及的 complex number 是用特殊的乘法定义的。但是, complex group 很容易

5) 元素就是元素。不可以急切地将之等同于今天的化学元素。一个 complexion 整体不妨碍指向其构成的元素, 这是英文的一个优点, 一个不同于汉语的地方。

6) 我愿不厌其烦地提及伟大的外尔(Hermann Weyl), 是因为注意到外尔的名气不如爱因斯坦的名气大可能是因为他的学问比爱因斯坦高很多、也难理解得多的原因。和爱因斯坦一样, 外尔是另一个对相对论和量子力学都有重要贡献的人。当然, 外尔对科学的贡献不局限于相对论和量子力学这样不需要多少数学的 simple 问题, 他还是顶级的数学家。他的文章一般人看不懂, 他的名气不够大, 他本人要负全部责任。

被认为其隐含着同 complex number 之间的联系, 因此外尔才自创了 symplectic 一词以示区别^[6]。Symplectic 联系的关键词是反对称(antisymmetric), 由哈密顿方程而泊松括号, 就能建立起哈密顿力学同辛几何的关系了。

与 complex group, symplectic group, 有关的一个概念是 quaplectic group, 这是一个和玻恩的互反原理^[7]相联系的概念, 字面上的意思是四辘辫子群⁷⁾。玻恩的互反原理要求物理定律在变换 $\{t, e, q, p\} \rightarrow \{t, e, p, -q\}$ 或者 $\{t, e, q, p\} \rightarrow \{-e, t, q, p\}$ 下是不变的^[8]。这要求一个由三维坐标、一维时间, 加三维动量和一维能量的八维空间。同单粒子的扩展相空间(七维)相比, 这里多了一个能量维。玻恩猜想存在关于这个八维空间之线元的不变性, 不变变换构成的群就是 quaplectic group^[8, 9]。这可同四维时空中线元的变换不变性所对应的洛伦兹群作类比。不过, 玻恩的这个方案似乎不成功。

5 结语

中学时学辩证法, 实在不知道所谓的矛盾双方的辩证关系在说什么。参详近年来在物理学文献中读到的关于 simplicity 和 complexity 的论述, 恍惚对辩证关系有了点了解。复杂性指其组成部分通过多种方式相互作用(interacting in multiple way), 遵从局域规则, 因为没有合适的高层次的指令定义其中各种可

能的相互作用。用大白实话说, 就是人们还没能力, 或者还没找到正确的、关于整体的描述方式。而简单性, simplicity, referring to simplex, or as a whole, 这说明简单性需从整体层面上去寻求。举例来说, 宝塔菜, 如果一点数学不用而只盯着菜头看, 它是 complex 的; 如果明白它具有自相似结构(self-similarity), 且同一尺度上菜瓣儿的排列方式是斐波纳契斜列螺旋花样(Fibonacci parastichous spirals), 这样的理解需要两个看似不相干的概念, 就是 duplex 的; 如果有一天我们能将 Fibonacci parastichous spirals 和 self-similarity 从数学上统一了, 那宝塔菜的花样就是 simple 的了(图 2)。不过, 完美的理想的数学单纯地描述的, 都不是真实的。

物理若能上升为规则、定律就是简单的, 但它面对的自然现象是复杂的。这复杂性的源头在体系之内, 把宇宙的无限复杂性归咎于初始条件的无限复杂性, 这样就将之移出了数学物理讨论的范围, 这种作法无助于对宇宙复杂性的认识。物理学是美学简单性和功能复杂性, 其在简单性和复杂性之间取得微妙的平衡。复杂性并不必然把物理引向死胡同, 恰恰是问题的复杂性才使得其解有简单的途径(But it is precisely the complexity of the



图 2 宝塔菜, romanesco broccoli, 乍一看是 complex 的, 懂了自相似和斐波纳契它是 duplex 的。希望有一天它能看起来是个 simplex, 是 simple 的

problem that allows a simple approach to its solution)^[10]。这正是对多粒子体系有统计物理的写照。我们若是弄懂了物理, 它就简单了(Physics must be simple once we understand it all)^[11]。物理学家面对自己的研究对象时, 常常念叨着简单性原则而对复杂的现象一筹莫展, 这么多年的超导理论研究大约就是这种局面。没办法, 物理学确实太难了。不过, 有一类人如外尔, 就是“能把简单的事情弄复杂了、把所有复杂的事情弄简单了的人(the man who makes all simple things complicated and all complicated things simple)^[12]”, 据说把复杂事情看简单了是更具有决定性意义的, 这可是真本领! 要做到这一点, 则要能象外尔一样, 总是从根部看问题(always takes up the problem at its root)^[12]。谁不想拥有这种本领呢, 只是作为这种本领之根基的数学一般物理学家是不具备的, 而具有这些数学的数学家如今也是凤毛麟角, 何况他们还远离物理的世界呢。

参考文献

[1] Dirac P A M. The Relation between Mathematics and Physics. Proceedings of the

Royal Society (Edinburgh), 1939, 59: 122—129. In: Pais A. Playing With Equa-

tions, the Dirac Way. Kursunoglu B N and Wigner E P(Eds.). Paul Adrien Mau-

7) 存在辫子群, braid group, 的概念。

- rice Dirac: Reminiscences about a Great Physicist. 1990. p.110
- [2] Coopersmith J. Energy: the subtle concept. Oxford University Press, 2010. pp.345—346
- [3] Ball P. Life's Matrix. University of California Press, 2000. p.117
- [4] Fauvel J, Flood R, Wilson R(Eds.). Mobius and his band. Oxford University press, 1993. p.118
- [5] 维基百科, spinor 条目
- [6] Weyl H. The Classical Groups: Their Invariants and Representations. Princeton University Press, 1939. p.165
- [7] 曹则贤. 物理学咬文嚼字之七十八: Reciprocity——对称性之上的对称性. 物理, 2016, 45(7):469
- [8] Morgan S. A Modern Approach to Born Reciprocity. PhD Thesis. University of Tasmania, 2011
- [9] Govaerts J, Jarvis P D, Morgan S O *et al.* World-line quantization of a reciprocally invariant system. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2007, 40: 12095
- [10] Vignale G. The beautiful invisible, Oxford University Press, 2011. p.53. 中译本: 至美无相. 曹则贤译. 中国科技大学出版社, 2013
- [11] Fujita T. Symmetry and its Breaking in QFT. Nova Science Publishers, Inc., 2007. in preface
- [12] Foote R. Mathematics and Complex systems. Science, 2007, 318:410

基于无烟煤软碳负极材料的低成本钠离子电池开发成功

环境污染问题日益突出, 风能、太阳能等清洁能源的利用越来越受到人们的关注, 但是这些能源是间隙性的, 限制了其发展和广泛应用, 大规模储能技术是解决可再生能源高效利用瓶颈的关键技术。锂离子电池是一种非常重要的储能技术, 广泛应用于便携电子设备和新能源汽车上, 随着电动汽车、智能电网时代的到来, 锂离子电池大规模发展受到锂资源短缺的瓶颈制约。与锂相比, 钠储量丰富、分布广泛、成本低廉, 并且与锂具有相似的理化性质, 因而钠离子电池的研究再一次受到科研界和工业界的广泛关注。与锂离子电池相比, 钠离子电池的能量密度通常较低, 虽不太适合应用在对能量密度有较高需求的便携式电子设备和电动汽车领域, 但适合应用于对能量密度要求不太高、对成本敏感的低速电动车和通讯基站、家庭储能、电网储能等领域。高性能电极材料的开发对实现钠离子电池的商业化应用至关重要, 特别是高性能、低成本的负极材料仍是制约钠离子电池实用化的瓶颈。

在众多报道的钠离子电池负极材料中, 高度有序的石墨类软碳负极材料储钠容量较低(通常低于 100 mAh/g), 而高度无序的硬碳材料由于具有高的比容量和长循环寿命等优良的综合性能而被认为是最有应用前景的一种负极材料。中国科学院物理研究所李云明博士生、胡勇胜研究员等利用水热方法得到了一种硬碳微球,

物理新闻和动态

接着又利用棉花作为前驱体通过一步碳化法得到了一种硬碳微管, 虽然硬碳具有优异的储钠性能, 但是其高昂成本限制了产业化应用。接着他们提出在软碳前驱体沥青中加入第二相例如硬碳前驱体, 利用二者之间的相互作用得到了一种无序度较高的非晶碳材料, 并且这种复合前驱体具有较高的产碳率(60%左右), 作为钠离子电池的负极材料, 其展现了高达 250 mAh/g 的比容量、优异的循环稳定性和倍率性能。

最近, 他们在钠离子电池碳基负极材料上取得了突破, 采用成本更加低廉的无烟煤作为前驱体, 通过简单的粉碎和一步碳化得到了一种具有优异储钠性能的碳负极材料。裂解无烟煤得到的是一种软碳材料, 但不同于来自于沥青的软碳材料, 在 1600 °C 以下仍具有较高的无序度, 产碳率高达 90%, 储钠容量达到 220 mAh/g, 循环稳定性优异。最重要的是在所有的碳基负极材料中具有最高的性价比。其应用前景也在软包电池中得以验证, 以其作为负极和 Cu 基层状氧化物作为正极制作的软包电池的能量密度达到 100 Wh/kg, 在 1 C 充放电倍率下容量保持率为 80%, -20 °C 下放电容量为室温的 86%, 循环稳定, 并通过了一系列适于锂离子电池的安全试验。低成本钠离子电池的开发成功将有望率先应用于低速电动车, 实现低速电动车的无铅化, 随着技术的进一步成熟, 将推广到通讯基站、家庭储能、电网储能等领域。

(中国科学院物理研究所 胡勇胜 供稿)