

物理学咬文嚼字之六十

自由与束缚

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2014-01-10收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140206

Give me liberty, or give me death.
——Patrick Henry¹⁾

摘要 Free 及与其相反的词如 forced, confined, constrained, coercive, binding, bonding, bound, 等等, 都出现在物理学概念中。自由不过是骨感的想象, 束缚才是丰满的现实。

1793年, 法国巴黎大革命广场, 39岁的罗兰夫人(Marie-Jeanne Phlippon Roland)被押上了断头台。在生命的最后时刻, 罗兰夫人在自由女神的塑像前跪下, 喊出了千古名言“O Liberté, que de crimes on commet en ton nom(自由, 多少罪恶假汝以行)!”对于今天的人们来说, 就象一切美好的概念都有聪明人借以作恶一样, 假自由以行的罪恶并不特别令人惊讶。我在意的是, 许多物理概念也是假自由之名而行于世的: 自由能、自由焓、自由落体、自由作用量、自由度、渐进自由, 等等。哪里来的这么多“自由”存在物, 莫非这物理的世界一如盲目的人民, 也需要自由女神的引导(图1)?

自由, 法语 liberté, 英文照搬为 liberty。该词的拉丁语 liber, 竟然和德语的 Leute (人们, people)是一个词, 这是我没有想到的²⁾。不

1) 不自由, 毋宁死。见于 Patrick Henry 1775年号召美国民众开展独立战争的演讲。——笔者注

2) 洋人的自由、民主是同源词。Democracy, 民主, 其中 demo = people, 汉语的对应为“氓”。参见诗经“氓之蚩蚩, 抱布贸丝”。

——笔者注

过, 这也就好理解为什么 liberal 有“大量的”意思了, 如 a liberal reward(丰盛的回馈)。在英文物理文献中, 以 liberty (liberal)形式出现的自由似乎罕见, 基本上都是以 free (freedom)的形式出现的。Free, 来自德语 frei, 荷兰语形式为 vrij, 按照字典的解释是 to be fond of, hold dear, 就是欢喜、乐意的意思, 有

那种“有钱难买爷乐意”的感觉。

把 free 翻译成自由, 对于 free-lance (free-lancer, 汉译自由职业者)这样的词来说, 是没问题的。手持一把投枪(lance)但没把自己卖给固定买家的人是自由的, 故 free-lance 泛指没有固定买家的、靠本事吃饭的人——他有决定看谁的白眼的自由。在类似 free charge (免



图1 油画《自由引导人民》(La Liberté guidant le peuple, Eugène Delacroix, 1830)



图2 Free fall。无任何辅助或者阻碍的下落

费), duty-free (免税)等词汇中, free 是 without 的意思, 故 fragrance-free (不含香精), additive-free (不含添加剂)的法文对应就是 sans parfum, sans additifs。很多我们随意把 free 翻译成自由的地方, 更确切的意思可能是后一种情形。

最先接触到的含 free 的物理概念是 free fall (法语为 chute libre), 汉译自由下落或者自由落体运动。若从 free 的字面来理解, free fall 似乎是欢天喜地的堕落。物理上谈及 free fall, 在牛顿力学语境中, 指物体所受万有引力是唯一的外力。地球表面上物体的 free fall, 是受地球的吸引造成的, 一点都不自由, 说身不由己倒更确切。台湾有学者认为应把 free fall 译成“无碍降落”, 有道理。不过, 在广义相对论语境中, 重力表现为时空曲率, 所谓的 free fall 就是沿着测地线的运动而已, 没有力可言。自由下落的物体

感受到零重力。在日常词汇中, free fall 也指自然环境下无任何辅助的下落, 如降落伞打开之前的跳伞者或者炸弹所作的运动(图2)。

Free 出现在 free electron, free action 等诸多物理学概念中, 汉语基本上都是用“自由的”来对付。如果我们稍微注意一下的话, 会发现这里 free 应该是 without 的意思。对于一个体系, 比如两个耦合的 (coupled) 标量场来说, free action 为 $S_0 = \int d^4x \sum_{i=1}^2 (\partial_\mu \phi_i * \partial \phi_i - m^2 \phi_i * \phi_i)$, 所谓的 free 就是不包含它们之间的相互作用。加入相互作用项(就是凑出一个双方都有物理量参与的乘积项, 如果量纲不对, 就再添个系数, 如此而已)后, 就能描述它们的 coupling 了。

在 free particle 一词中, free 指粒子不受任何势场的约束, $V(r)=0$, 如真空中的电子就被称为

free electron。但是, 也不绝对。在 free electron laser 一词中的 free electron, 它涉及的可是被加速到近光速的电子束, 该电子束通过一个由磁极交替翻转的两组磁铁提供的周期性磁场, 从而产生相干同步辐射。这里的 free, 可能是说电子在磁场的两端是自由的。在金属的自由电子模型(free electron model)中的电子却是晶体里的价电子。价电子被当成是完全从离子实脱离的, 因此是 unbound electrons。这些没被约束住的电子在晶体的周期势场中的运动就象是真空中自由电子³⁾, 只是质量不同而已, 故可将晶格的影响都纳入电子的有效质量中去。这里的 free electrons 是类比, 实际上谈论的是 unbound electrons。

比较难理解的含 free 的概念是自由能 (free energy), 自由焓 (free enthalpy)。Free energy 来自德语的 freie energie, 相近的说法有 befreite energie (释放的能量), 其中 befreit 是动词 befreien (解放、得自由) 的完成时形式, 比如 “nukleare Energie ist die Energie, die durch die Zersetzung eines Atomkerns auf zwei Atome oder durch die Vereinigung zwei Atomkerne in ein neues Atom befreit wird (核能是通过原子核裂变或者聚变所释放出的能量)”, 以及 “die befreite Energie ist gleich der Differenz der Massen multipliziert mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit (释放的能量等于质量差乘上光速的平方)”。Befreite Energie, 这个词的直接英文翻译 liberated energy (得了自由的能量), 这种表述也常见, 比如 “liberated chemical energy (释放的化学能)”。参照 befreite

3) 以个人有限的社会经验来看, 有体制内的晶体势场里的自由, 没有体制外的真空中的自由。——笔者注

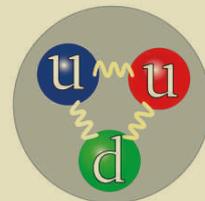
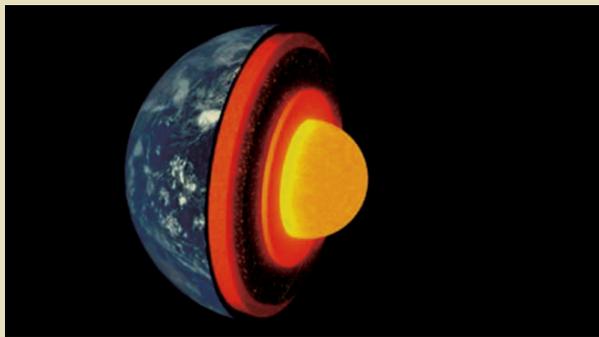


图3 地球、螃蟹与中子的夸克模型。坚硬的从来不过是壳而已

energie(释放的能量)的理解, freie energie(自由能)是指体系中可用来做功的部分能量⁴⁾。等温条件下可用来做功的是 Helmholtz 自由能 F , 等压条件下可用来做功的是自由焓 H , 等温等压条件下可用来做功的是 Gibbs 自由能 G 。它们和内能的关系表现为不同的 Legendre 变换^[1]。注意, 热力学势并非体系的力学意义下的能量, 力学意义下的能量 ε_i , 其和 Helmholtz 自由能是通过下式连接起来的: $F = -\frac{1}{\beta} \ln \sum_i g_i e^{-\beta \varepsilon_i}$, 其中 $\beta = 1/k_B T$, g_i 是能级 ε_i 的简并度。

Free 对应的名词 freedom⁵⁾ 构成的词语 degree of freedom (自由度) 是物理学的一个关键概念。其实 degree of freedom 是个日常词汇, 应该如同其它表示程度的量一样是一定区间里的实数。Isaiah Berlin 论自由度的一段话, 读来颇有教益: “如果自由度是个欲望满足程度的函数的话, 我消除欲望可以与满足欲望同样有效地提升自由。我可以让人们(包括我自己)放弃那些我无意满足的欲望从而得自由”⁶⁾ [2]。但是,

在物理学语境中, degree of freedom 是个正整数, 是动力学系统在破坏加于其上的约束的前提下独立运动方式的个数。Freedom 还出现在 asymptotic freedom(渐进自由)中, 这是一个量子色动力学的概念, 指粒子间的结合随着能量增加和距离减少而渐进减弱(asymptotically weaker)。渐进自由的概念是 1973 年提出的。其实, 此前人们已经注意到场论中相互作用随着距离的减少会发散。由此有了朗道极点的概念, 它定义了理论能描述的最小长度。不过, 这个由发散逼出来的渐进自由似乎也没那么邪乎, 大自然根本就不会犯 $\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r}$ 这样的傻。那些看似穷横的存在, 星球、螃蟹或者核子, 从来坚硬的只是壳, 内核深处则稀松的很(图 3), 愚以为这正是大自然避免无穷大的智慧!

存在是通过相互作用相联系的, 物理学是研究相互作用的学科, 在物理学中谈论自由, 至少跟自由的反面相比, 显得底气不足。有很多与 free (freedom) 相反的词汇都出现在物理学中, 如 forced, con-

straint, confinement, coercion, binding, bond, 等等。

Forced 常见用在 oscillator 上。据说谐振子占据物理学 75% 的江山, 受迫振动(forced oscillation, driven oscillation)自然也很风光。强迫振动的外力常常被表示成周期函数形式, 则 $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f_0 \cos \omega t$ 就成了能描述光场下电子振荡的方程⁷⁾。字面上与 forced 接近的有 coercive。动词 coerce, together+confiner, 强制, 强加约束的意思。该词相关的一个概念出现在电磁学中, 即 coercivity, coercive field, 或者 coercive force。对于一个铁磁性材料, 将其从饱和磁化状态完全去磁所需的磁场强度 H_c 即为 coercive field (矫顽场) 或者 coercive force (矫顽力)。同样的概念和描述可用于铁电材料。矫顽这个中文词很暴力, 总让人想起暴躁老子管教倔强儿子的场景。

在 free space 里作着 free motion, 是多少人的梦想, 但现实是我们只能 living under constraint(在约束下生活)。经典力学的牛顿第二

4) 有点象闲钱, 是扣除日常必需的开销以后可自由支配的那部分钱财。——笔者注

5) 有些地方 freedom 竟然被演化为 freedamn, 可叹。——笔者注

6) 由此看来, 放弃吃草的驴拥有很高的自由度。——笔者注

7) 可以当真吗? 我一遍遍地问自己。——笔者注

定律加上解微分方程，似乎已经可以包打天下了，可还是要发展拉格朗日力学去处理约束下的运动。在拉格朗日力学中，粒子(系)的轨迹由拉格朗日方程的解得到。拉格朗日方程分两类：第一类处理显式表达的约束，通常用拉格朗日乘子法；第二类通过明智地选择广义坐标而把约束纳入到问题中去。每增加一个约束，体系的自由度就减少一个。把一块石头看成不同质点组成的刚体，则在运动中其上质点的构型不变，这就构成了对其运动的一个强约束。给定约束下的优化问题或者演化问题是具有普适性的问题。认定物质是由原子组成的，体系中原子的动能只能是单位的整数倍，玻耳兹曼 1877 年通过求给定粒子数和总能量这两个约束条件下发生频率最高的分布从而得到著名的玻耳兹曼分布公式 $\rho_i \propto e^{-\epsilon_i/KT}$ 。许多学者把这项工作当作量子力学的开始，愚以为有道理。约束体系的路径积分和量子化问题从来都是难题，此处不论。

在谈论渐进自由的时候遇到的一个和 free 相反的词是 confine，名词形式为 confinement。Confinement，周朝的“画地为牢”可作一解，即约束到一个较小的空间里，汉译“限域”。如果要为纳米科技选择唯一的一个关键词，愚以为非

confinement effect (限域效应)莫属。在大块材料中全局运动的价电子会因为材料尺度变小到一定程度(小于德布罗意波长)而感觉不自在，此时限域效应就起作用了，材料就会表现出尺寸依赖的特殊性质。Confinement effect 同样也表现在人这样的大尺寸体系：当电梯门关上的时候，一对陌生的男女马上就因限域效应而局促不安。

与 free 相反的形容词还有 binding, bonding 和 bound。动词 bind, bond, bound 还有 band, 都是绑定、约束到一起的意思。但是这几个词用法有微小差别。Bond energy, 汉译(化学)键能，是指将两个原子绑定到一起而余出来的能量(你需要同样多的能量才能把这个化学键打开)，一般为 eV 量级；而 binding energy 则是指自由电子被束缚到原子的能级上而余出来的能量(你需要同样多的能量才能把这个电子从原子中击出)一般为几个到数千 eV。Bound 是 bind 的过去分词形式，bound states, 汉译束缚态。Bound 作为动词本身，其过去分词形式为 bounded，出现在数学中，意为有界的，反义词为 unbounded。

一般教科书中关于物理学的讲授是很有趣的：它从莫须有开始。力学上来学牛顿第一定律，可这个世界上根本就没有匀速直线运动；

电磁学从静电学开始，这个世界上也没有静电荷。这些看似简单的概念，是对现实抽象后的升华，是 ideal concepts。这些升华后的抽象概念或者图像被作为出发点教给初学者，有教育的策略在里面，但我总觉得有误人子弟之嫌。进一步地，在这个由相互作用联系的世界里，free particle 在 free space 中的 free motion，也只存在于物理学家的想象中。作为远离平衡态的存在，作为一种社会性的生物，人对自己生活的不自由状态之不满是再自然不过的事情。可能就是因为约束太多了些，自由也就成了人类极富感召力的口号。但严格说来，这个世界上根本没有自由，庄子的“泛若不系之舟”那般的自在，也就是在心里想想罢了。

参考文献

- [1] 曹则贤. 物理, 2012, 41(9): 610
- [2] Berlin I. Four essays on liberty. Oxford University Press, 1969. 原文如下: If degrees of freedom were a function of the satisfaction of desires, I could increase freedom as effectively by eliminating desires as by satisfying them; I could render men (including myself) free by conditioning them into losing the original desires which I have decided not to satisfy

拓扑狄拉克半金属



拓扑狄拉克半金属是一种全新的奇特拓扑量子材料。这种材料的体电子形成了三维的狄拉克锥结构，所以可以看作是“三维的石墨烯”。另外，由于这种材料的电子结构具有非平庸的拓扑性质，它也有和拓扑绝缘体类似的表面态。这些独特的电子结构在最近的高分辨光电子谱实验中得到了证实。封面图中是 Na_3Bi ，第一个被实验证实的三维拓扑狄拉克半金属的能带结构：内部的线性色散是由体电子形成的狄拉克锥；表面态电子则形成外部的(线性)色散。该工作已被 *Science* 接收，并被选作 *Science Express* 提前在线发表，同时还被 *Nature News* 作为研究亮点进行报道。

(牛津大学物理系 陈宇林 供稿)