

物理学咬文嚼字之七十六 绑定

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-01-11收到

† email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160410

Mit dem genius steht die Natur in ewigen **Bunde**
Was der eine verspricht, leistet die andere gewiss.

——Friedrich Schiller, *Columbus*¹⁾

Have you not wept together with your wife?

If not you missed that **bond** that joins forever²⁾.

——Ludwig Boltzmann, *Beethoven im Himmel*

兰艾同荣，望秋则槁。虽在束薪，终是芳草。

——[清]朱鹤龄《广志》

摘要 事物是相联系的，联系同存在一样都是物理的对象。Band, bend, bind, bond, bund(bundle, bindle)及相关词汇，为我们描述着数理化各门学问中的各色联系。

1 引言

牛顿的第三定律断言，作用等于反作用(For every action, there is an equal and opposite reaction³⁾)。可怜这句话，到了中文的中学课本就变成了作用力等于反作用力，不知这里的力从何来。作用总伴随着反作用，实际上是说主导这个世界的是相互作用(interaction)。既然是interaction，那么描述这个action的不管是什么样的物理量，它一定是相对距离 $|r_i - r_j|$ 的函数。则对于变换 $r_i \mapsto r_i + r_0 + v_0 t$ ——这个变换包

括了朴素相对论和伽利略相对论的内容——相互作用不变。不同存在通过相互之间的作用结成了共同体，由两体而少体而多体，形成了一个纷乱复杂的世界。可以想见，事物之间的结合必然是人类关注的要点，也必然是自然科学研究的主要对象。

英文中强调结合、联系的词有很多。有趣的是，band, bend, bind, bond, bund(bundle, bindle)这一组同源词遍历了(a, e, i, o, u)五个单元音，且均是物理、化学亦或数学中的重要概念。它们之间的内在联系和细微差别，值得认真对待。

2 Band

Band 作为名词，汉译条、带、箍等等，此时一定要记得这些条儿、带儿、箍儿是用来连接、绑定(bind)别的东西的。这样，就容易理解为何band有团伙的意思了，不管是musical band(音乐团体)，还是punk band(痞子团伙)，都是由某种力量绑定(bind, tie)在一起的群体。Band本身也作为动词用，表示用带子之类的东西捆扎或者给候鸟等动物用环状的东西作标记。由动词band衍生的名词bandage，汉译绷

1) 席勒诗《咏哥伦布》：上苍与天才紧相连；此者有承诺，彼亦有所为。——笔者注

2) 此为Fritz Rohrlch对玻尔兹曼的谐趣诗《天堂里的贝多芬》(*Beethoven im Himmel*)的英译中的两句：你没和妻子哭过长夜吗？要是没有你就错失了将你们永远拴牢的纽带——笔者注

3) 著名的Least-action-principle，汉译为最小作用量原理。虽然一般力学书上有action的表达式，并且通过变分法求最小值得到Euler-Lagrange方程，但是，如果我们记得这个所谓原理的思想本源是“世界是被用最少的动作创造的”，就知道此概念正确的翻译应该是最少动作(作用)原理。把action翻译成作用力或者作用量，都为用中文理解物理学人为地设置了障碍。——笔者注

带，不知是不是音译。有趣的是，bandage本身也可以当动词，就是用绷带包扎的意思。

在物理学上，有frequency band(频带)，bandwidth(带宽)的概念。因为频率是个连续可变的量，系统对电磁波的响应一般来说会涵盖一定的频率范围，则此范围内的频率，就其可以被响应来说，是一伙的，因此可以冠之以“band”的称呼。光是电磁波，不过在光被证实是电磁波之前已经有了band of light(光带)的说法。1665年，牛顿将一个三棱镜放入一束自窗户射入的光线的路径上，发现白光经三棱镜后被展开成了彩色的band of light(图1)，牛顿由此判定白光是不同颜色的光的混合。

涉及band的另一重要物理学概念是energy band(能带)。上世纪中期当量子力学被应用于解固体物理问题时，发现在周期势场下电子的能量呈带状分布，即在某些能量值之间有密密麻麻的哈密顿量本征值分布，而在某些能量值之间则不会出现哈密顿量的本征值。由此，发展起了固体的能带论(theory of energy band)。固体能带论的一个了不起的成就是给了固体的导体—绝缘体之分一个初步的解释，这个初步的解释引出了半导体的概念。半导体给人类社会带来了翻天覆地的变化，其根本点在于通过能带工程(energy band engineering)可以设计它的导电性质。

3 Bind

Bind(bound, bound)可作为及物动词和不及物动词用，例句如sands and cement bind strongly(沙子与水泥结合得很牢固)，to bind a book(装订

一本书)。说到装订书，物理世界最伟大的书籍装订工(bookbinder)要数法拉第了。法拉第14岁时到书店去worked as a bookbinder, bound books for Davy(当书籍装订工，为戴维装订书籍)。法拉第在做工之余不忘自学，且利用地利之便到英国皇家学会去听讲座。1812年，法拉第把一本300余页的他自己记录并装订好的戴维讲座笔记交给了戴维，从而获得了到皇家学会为戴维作助手的机会——一个伟大的科学天才从此踏上了研究的舞台。

Bind构成的一个重要物理概念是binding energy(结合能)。两个个体，bind together，如果结合后的形态能量较低，则这样的结合是稳定的。体系之结合前后状态的能量差，被称为binding energy(这个定义同样适用于bonding energy，见下文)。电子同原子核结合成原子，一堆原子结合在一起构成一块固体。将电子从固体中释放出来所需的最低能量，即光电效应涉及的逸出功(work function)，其实是固体中电子的最小结合能。原子内能级几乎不受原子化学环境的影响，且不同原子的内能级或同一原子的不同内能级在数值上的差别一般来说大于由化学成键(chemical bonding)造成的改变，因此可以作为元素的指纹。

X-射线光电子谱就是测量光电子的动能从而判断电子在样品中所处内能级的能量，从而确定样品的元素成分的。同样地，核子通过强相互作用结合成原子核。原子核的质量总小于构成原子核之质子和中子质量的总和，这之间的

质量差，通过爱因斯坦质能方程换算成的能量差，就是原子核的binding energy。为了表示语境的区别，这里我们会用nuclear binding energy加以区分。Nuclear binding energy对原子核质量数，或者核子数，的依赖关系呈两端低中间高的态势(图2)，这让人类拥有了聚变和裂变两种利用核能的方式，也就有了用氢弹和原子弹两种方式自我毁灭的奢侈。

Bind的过去分词形式为bound，因为来自bind，因此有命中注定了、被某事绑架了的意思，如is bound to fail(注定失败，绑在失败上了)，is bound up with research(投身科研)。注意，千万不要把作为bind过去式、过去分词的bound同动词bound混淆了。动词bound，

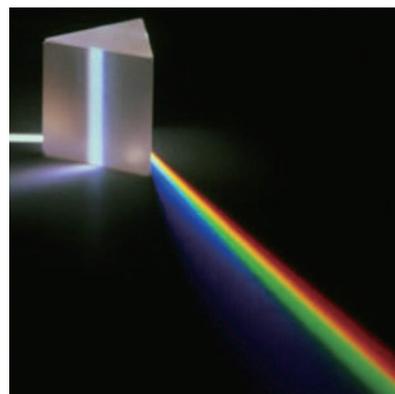


图1 白光经三棱镜折射后分成了彩色的光带

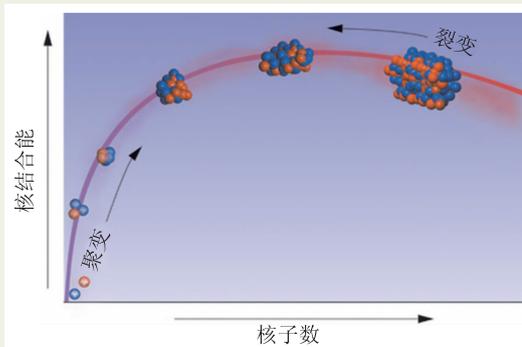


图2 核结合能对核子数的依赖关系

其来自拉丁语动词 *bombitare*, 是弹跳 (*bounce*)、弄出动静 (*bomb*, *buzz*) 的意思; 其二来自拉丁语名词 *bodina*, *botina*, 是限制的意思, 见于名词 *boundary* (边界)。

4 Bond

Bond, Webster 字典把其名词的解释指向 *band*, 把其动词的解释指向 *bind*, 可见它们之间的亲缘关系。*Bond*, 似乎更强调联系, 如 “The bond between Fourier transform and epicycle theory”, 说的是傅里叶变换同托勒密的本轮理论 (见下文) 之间的思想联系, 后者比前者要早一千多年。而在 “There he (Hermann Weyl) read Hilbert's Foundations of Geometry, a tour-de-force of the axiomatic method, in comparison to which Kant's ‘bondage to Euclidean geometry’ now appeared to him naïve” 一句中, *bondage* 意味着密切联系, 甚至有依附的意思。康德之 “密切联系欧几里得几何” 在读了希尔伯特的《几何基础》之后的外尔眼里, 当然有点小儿科。此外, 毛姆的名著 *Of human bondage* 汉译为《人性的枷锁》。

两种原子有结合到一起的倾向, 且这种结合会带来化学性质上的变化, 因此这种结合 (的实体、的倾向、的状态) 被称为 *chemical bond*。*Chemical bond*, 汉译化学键, 如同许多别的英文概念汉译所犯的严重错误一样, 它把原文中抽象的、软

性的内容落实为一个硬邦邦的实体。汉语的键, 是插销一类的东西, “横曰关, 竖曰键”, 当初翻译者可能是为 H—H, O=O 中的那些横杠找到了 “键” 的译法。形象固然形象, 贴切也算贴切, 可是 *chemical bond* 不光是 H—H, O=O 中的那些横杠呀。A *chemical bond* is an attraction between atoms (化学键是原子间的吸引), 在量子化学的语境中 *chemical bond* 可能会表现为波函数的叠加。英国化学家戴维是第一个提出化学键是纯粹的电性质的人 (这句话很别扭, 就是因为我们把 *chemical bond* 翻译成了化学键)。后来我们知道, 原子之间形成化学键实际上是源于电子的转移行为, 参与成键的电子被称为 *bonding electrons*。两个原子结合到一起的状态, 其能量相比于此前的游离状态要低, 这之间的差额即是 *bonding energy* (键合能, 成键能)⁴⁾, 一般在几个 eV 的量级。所谓的可见光的波长下限, 实际上就是由 H, C, N, O 等原子之间键合能所决定的: 400 nm 的紫光, 对应的光子能量约为 3.5 eV, 这足以打破生命体中的化学键了。有读者可能注意到了, *chemical bond* 也包括分子间的相互作用, 整体上电中性的分子也可能因为电偶极矩相互吸引而结合到一起⁵⁾。*Bond* 描述的是抽象的联系, 毛姆的《月亮与六便士》有句云: “Sooner or later the human being in you will yearn for the common bonds of humanity (早晚你体内的那个人儿会渴望人类社

会的普遍联系)”, 可资为证。由此句可见先前把 *Of human bondage* 译成《人性的枷锁》有值得商榷处。

5 Bund (Bundle, bindle)

Bund, 作为名词有联盟的意思。其英文形式用处不多, 在 *united states* (合众国), *united kingdom* (联合王国), *Swiss confederation* (瑞士联邦)⁶⁾ 之类的概念中它似乎已为其它词给替代了。倒是德语形式的 *Bunde* 整天被联邦德国人给挂在嘴上, 如 *Bundestag* (联邦议会), *Bundeskanzler* (联邦总理), *Bundesliga* (联邦联盟)⁷⁾, 等等。

和 *bund* 接近的是 *bundle*, 这个词可是学数学物理者必然要弄懂的概念。*Bundle* (*binden* > *bond* > *bundle*), 把若干东西捆扎在一起, 汉语对应的词汇包括 “捆”、“束”、“丛”等, 取决于具体捆扎的东西。几根柴火捆到一起, 那是 “束薪”, 几根猪肉捆到一起那是 “束脩”。猪肉在古代属于紧俏物资, 一束就算重礼, “束脩” 作为学费也就够意思了, 所以有 “子曰: ‘自行束脩以上, 吾未尝无诲焉’”, 意思是那些主动把学费交来的人, 我可是都教了的啊。与此相对, 柴火遍地都是, “束薪” 就成了穷酸的符号。汉朝的朱买臣 “担束薪, 行且诵书”, 这穷酸相就惹恼了夫人坚决离婚了事。单身者被誉为光 (草) 棍儿, 那将草棍儿捆扎在一起的 “束薪”, 古时就用来喻男女成婚。

4) 不管是 *binding* 还是 *bonding*, 一旦绑定到一起, 再想分开总要付出代价的。——笔者注

5) 把一团电荷产生的电场表示为点电荷、偶极矩、四极矩等不同阶上近似之和, 是一种数学上的策略。但是, 把复杂分子间的相互作用限制在电偶极矩的层面, 而且还进一步分为永久电偶极矩之间的 *Keesom force*, 永久电偶极矩同诱导电偶极矩间的 *Debye force*, 以及瞬时诱导的电偶极矩间的 *London dispersion force*, 实在看不出对具体的物质体系有何实用的可能性。——笔者注

6) 瑞士联邦, 就是 *Swiss Confederation*, 拉丁语为 *Confoederatio Helvetica*, 故其互联网域名为 *ch*。咱们中国, *China*, *cine*, 用的域名是 *cn*。——笔者注

7) 联邦德国的足球联盟。——笔者注

《诗·唐风·绸缪》有句云：“绸缪束薪，三星在天。今夕何夕，见此良人。”束薪今天演化成了11.11，其精神是一贯的。日常英文中bundle的用法和汉语没什么区别，例如a bundle of belongings(一捆儿家什)，the optical fiber bundle(光纤束)，以及“the energy always comes in discrete bundles⁸⁾ ((在量子力学中)能量总是以分立的小捆儿的形式到来的)”，“light exists in discrete particle-like bundles(光以分立的、类似粒子那样的小捆儿的形式存在)”。Bundle，在俚语中也拼写为bindle，此时的意思为铺盖，正所谓a bundle of belongs。Bundle少了对单个事物的足够重视，因此bundle作为动词在英文中有bundle away，bundle off，即“草草地打发出去”的用法。

“束”的概念，常见于汉语对物理对象的表述中，如“一束粒子”，“一束光线”，但这些常用法对应英文的beam。Beam(baum>boom>beam)一词来自德语的Baum(树)，指树干部分，用来承重，在建筑、机械等领域beam被译为“梁”。当我们谈论a beam of light时，它是对拉丁语columna lucis的翻译，意为“光柱”。在射影几何中我们谈论“线束”时才指的是line bundle，那里的一束线常常是汇聚的，如spinors in three dimensions are points of a line bundle over a conic in the projective plane(三维的旋量是一个线簇在投影平面内的一个圆锥曲线上的点)。这样的线束、线簇，德语会用Liniendbüschel一词。Büschel, Busch, 即英语的bush，灌木丛。这个“丛”字，会被用来翻译fiber bun-

dle的bundle。Fiber bundle，这个数学、物理上非常重要的概念，汉译为纤维丛。在现代数学和物理中，bundle几乎到了被滥用的地步，试读如下例句就能找到这种感觉：“In the language of vector bundles, the determinant bundle of the tangent bundle is a line bundle that can be used to ‘twist’ other bundles w times(用矢量丛的语言来说，切丛的判别式⁹⁾丛是可以用来扭曲别的丛 w 次的线丛)。”

什么是纤维丛呢？纤维丛是这样的结构 (E, B, π, F) ，其中 E 是从空间(total space)， B 是底空间(base space)， F 是纤维，而映射 $\pi: E \rightarrow B$ 为丛投影(bundle projection)。大家熟悉的莫比乌斯带就是一个线段(纤维)在圆(底空间)上的纤维丛。纤维丛原来是微分几何里的概念，后来在物理中派上了大用场。为了描述一些复杂的物理情形，有必要引入一些坐标基，但这些坐标基和常用的表示时空的坐标又没有简单的关系。结果是，我们在时空的每个点上添加一丛纤维，其由用来描述物理对象的坐标基构成。比如对于足球场上运动员所处的位置，我们可以在其上添加一个描述其速度、高度等因素的矢量空间，那就是足球场上每一点上的纤维。其实，纤维丛的概念应该是个很朴素的概念，长满胡萝卜的一块田地就是对纤维丛最好的图解(图3)。

纤维丛理论为

相对论的表述带来了极大的方便。狭义相对论断言，光速是运动速度的上限。在时空的每一点上，速度矢量，即时空点上的切空间里的矢量，被限制在半径为 c 的球内，也就是说时空这个底空间上的纤维(速度空间)是一个球。纤维为 n -球的纤维丛被称为球丛(sphere bundle)。笔者以为，挂满球形水珠的毛膏菜可以用来比喻狭义相对论的纤维丛。爱因斯坦的广义相对论要求更大对称性的理论，其对称性在切丛上。与此相对应，非阿贝尔规范场论也要求另一类型的、更大的对称性，那是建立在一个基于李群的丛上的对称性。约在1975年前后，人们认识到规范场就是纤维丛上的联络，这再一次证明了数学的不可理喻的有效性^[1, 2]。

A bundle of lines 或者 a bundle of vectors 给我们带来了丰富的几何语言。如果是 a bundle of circles(一大捆儿的圆)又会怎样？两千多年前，希腊人托勒密(Claudius Ptolemy)就用圆环套圆环的路子天才地为我们演示了数学的奇妙。为了解释行星的运动轨迹，托勒密引入了epicycle-on-deferent的体系，其中的



图3 胡萝卜地，天然的纤维丛

8) Energy in discrete bundles, 就是这么个说法，这个“小捆儿”里没有结构。——笔者注

9) Determinant, discriminant, 这些词的汉译问题一直就没被认真讨论过。——笔者注

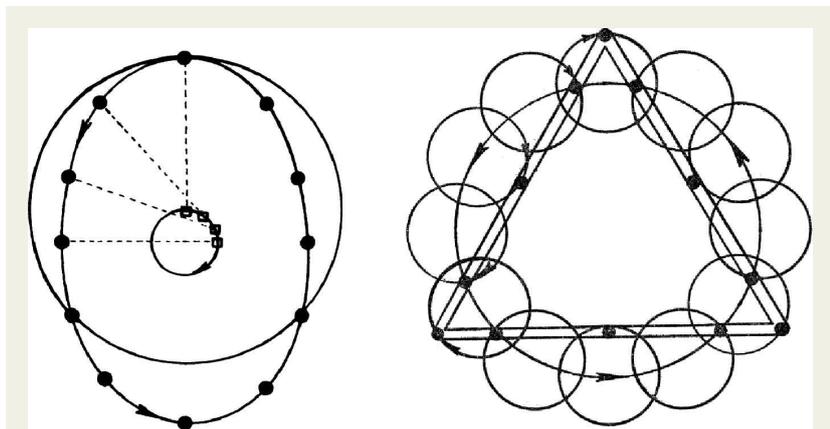


图4 使用一个 epicycle 不仅能构造出椭圆, 还能构造出三角形

deferent 被汉译为均轮, 其实是一个绕固定点转动的圆(动词 defer 的本意是屈从); epicycle, 外圆, 汉译本轮, 此圆自身转动着且其圆心是在别的圆(均轮或者别的水轮)的圆周上。用这个 epicycle-on-deferent 体系托勒密轻易地就构造了行星的轨道, 把地心说发展到了高峰。后来, 法国人傅里叶为了解决圆盘上温度分布的问题发展了圆+圆的数学技术, 这就是傅里叶分析。傅里叶分析的威力有多大, 笔者的观点是, 抽掉了傅里叶分析可能根本就没有现代物理。傅里叶分析一开始时人们很难接受, 因为大家觉得用正弦、余弦这些圆的函数怎么可能凑出尖锐的函数分布呢! 这样的想法, 是因为对 epicycle-on-deferent 的威力不了解造成的。不要说用 a bundle of epicycles, 即人们嘲笑托勒密体系或者傅里叶分析时所说的要用到“一大捆儿的圆”, 其实仅用一个圆套圆就能模拟出三角形来, 这实在有点出人意料¹⁰⁾(图4)。

6 Bend

Bend 作为动词, 其为人们熟知的意思是弯折、弄弯、向…屈服等意思, 比如 lenses bend rays of light (棱镜弯折光线), to bend another's will to one's wishes(强人所难)。可是你看看它的样子, 它分明是 band, bind, bond 和 bund 的兄弟, 怎么会没有连接、结合的意思呢? 实际上, bend 还就是连接、绑定的意思的, 比如 to bend a signal flag onto a halyard(把信号旗绑到帆索上); 相应地, 其作为名词的意思是“绳结”, 即 knot, 只是这用法太冷僻了些。那么, bend 是怎么获得了“弯折、弄弯、向…屈服”等意思的呢? 设想你将一个绳子连到(bend)一根木棍的两头, 如果绳子相对来说是短的(to confine with a string), 则你绑了一张弓(bend a bow)。那根棍子向绳子屈服, 就成了弯折的了。将一种材料同另一种材料绑

定, 当长度不能同步变化时, 整个结构就有绑定效应了(bend), and it bends(变弯了)。基于此原理, 可以用两种膨胀系数不同的金属做成热水器的电开关。

7 结语

西文的 band, bend, bind, bond 和 bund(bundle, bindle), 同出一源而意思相近, 在各种不同的语境中正确地使用这些词汇实属不易。其实, 中文的连接、联接、链接, 联结、连结这些词, 也不是那么容易弄得清楚其不同用法的。有趣的是, 这两组来自截然不同的两种文化的词, 其于细微处的复杂性却不乏共通之处。人类文化对“连接、联系”的格外关注, 说明对世间万物的联系曾付出过深入、系统的考虑。而这广义的联系, 正是物理学之最普遍的内容。知道微分几何的纤维丛(fiber bundle)就是规范场论中的联络(connection), 曾让科学家们莫名其妙了一阵儿, 不过就算仅从字面来看, 类似概念指向的不同事物有些内在的瓜葛, 也是容易理解的。

参考文献

- [1] O'Raifeartaigh L. The dawning of gauge theory. Princeton University Press, 1997
- [2] Yang Chen-Ning. Einstein's impact on theoretical physics. Physics Today, 1980, 33(6): June, 42

10)关于任何一个数学或者物理的概念, 都有太多我不知道和不懂的内容。此为一例。——笔者注