

ETYMOLOGIKON FÜR PHYSICA LEARNERS CHINOISES

物理学咬文嚼字

卷四

曹则贤 著

中国科学技术大学出版社

ETYMOLOGIKON FÜR PHYSICA LEARNERS CHINOISES

物理学咬文嚼字

卷四

曹则贤 著

中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

物理学咬文嚼字. 卷四/曹则贤著. —合肥:中国科学技术大学出版社, 2019. 2
ISBN 978-7-312-04624-7

I. 物… II. 曹… III. 物理学—名词术语—研究 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 298940 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026

<http://press.ustc.edu.cn>

<https://zgkxjsdxcbs.tmall.com>

印刷 安徽国文彩印有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

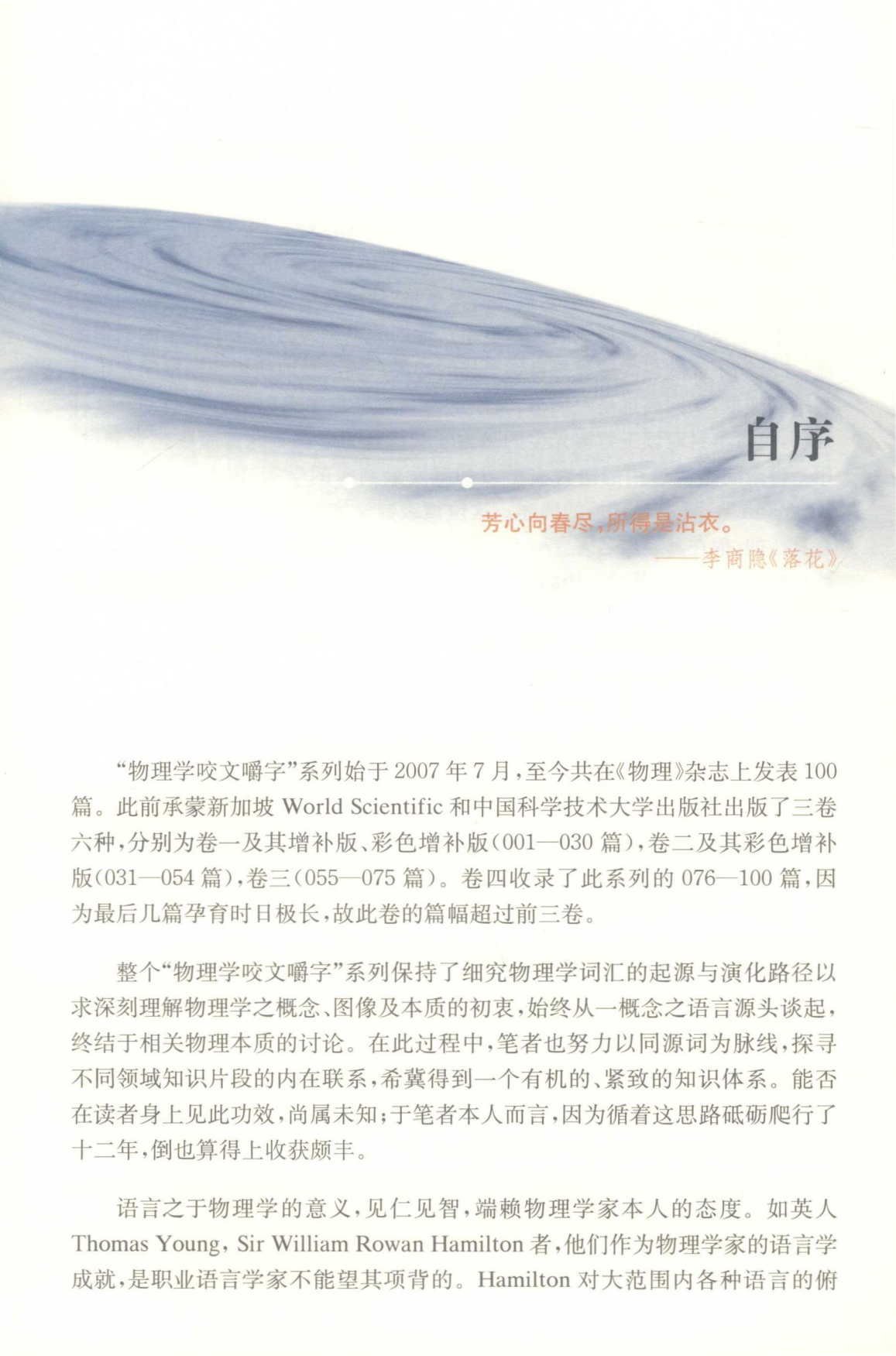
印张 22.25

字数 399 千

版次 2019 年 2 月第 1 版

印次 2019 年 2 月第 1 次印刷

定价 88.00 元



自序

芳心向春尽,所得是沾衣。

——李商隐《落花》

“物理学校文嚼字”系列始于2007年7月,至今共在《物理》杂志上发表100篇。此前承蒙新加坡World Scientific和中国科学技术大学出版社出版了三卷六种,分别为卷一及其增补版、彩色增补版(001—030篇),卷二及其彩色增补版(031—054篇),卷三(055—075篇)。卷四收录了此系列的076—100篇,因为最后几篇孕育时日极长,故此卷的篇幅超过前三卷。

整个“物理学校文嚼字”系列保持了细究物理学词汇的起源与演化路径以求深刻理解物理学之概念、图像及本质的初衷,始终从一概念之语言源头谈起,终结于相关物理本质的讨论。在此过程中,笔者也努力以同源词为脉线,探寻不同领域知识片段的内在联系,希冀得到一个有机的、紧致的知识体系。能否在读者身上见此功效,尚属未知;于笔者本人而言,因为循着这思路砥砺前行了十二年,倒也算得上收获颇丰。

语言之于物理学的意义,见仁见智,端赖物理学家本人的态度。如英人Thomas Young, Sir William Rowan Hamilton者,他们作为物理学家的语言学成就,是职业语言学家不能望其项背的。Hamilton对大范围内各种语言的俯

视，焉知不是其写意地创造数学与物理方程——数学和物理其实也是语言——的预演和铺垫？次者如 Κωνσταντίνος Καραθεοδωρή（卡拉泰奥多里），这位希腊人用德语写成的论述热力学第二定律表述问题的论文——该篇论文完成了热力学的公理化表述——也是德语言的名篇。爱因斯坦称赞牛顿“也是了不起的语言学家”，杨振宁先生夸奖狄拉克的文章是“秋水文章不染尘”，被赞者固然文字隽永，这夸人者也是顶级的文章里手。他们的思想因为化作了文字的涓涓细流，才滋润了无数也渴望窥探自然奥秘的心灵。细读爱因斯坦和杨振宁先生等名家的文章，学问高远是一回事，文字的清新流畅也予人以另一重触动。这种触动，笔者本科时读王竹溪先生的热力学和统计力学课本时曾朦胧感觉到过。用一种未能熟练运用的语言去学习和阐发最高深的学问，由此而来的惶恐，Hermann Weyl 有最动情的描述。这位顶级数学家在物理学领域的成就是鲜有其匹的，他在其经典名著 *The Classical Group*（经典群）一书的序中用英语、德语写下了这段不断被引用的话：

The gods have imposed upon my writing the yoke of a foreign language
that was not sung at my cradle.

Was dies heissen will, weiss jeder,

Der im Traum pferdlos geritten.

（神为我的写作套上了陌生语言的枷锁，那不是在我的摇篮边哼唱的语言。

那是一种什么感觉，

每一个在梦中纵马奔腾其实还胯下无马的人，

都明白。）

Hermann Weyl 接着写道：“Nobody is more aware than myself of the attendant loss of vigor, ease and lucidity of expression.（没人比我更清楚由此可能造成的表达之严谨、从容和明澈的减损了。）”有人戏谑地评价这一段，说“where Weyl apologies eloquently for his lack of eloquence in writing English（Weyl 用流畅的英语抒发了他用英语写作缺乏流畅感的感叹）”。

Weyl 担心使用外语可能造成表达之严谨、从容和明澈的减损，这重担心的
此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

境界,笔者是达不到了。然而,在学习物理和用英文撰写论文的时候,那种 pferdlos geritten 的惶恐感却是刻骨铭心的。因为物理学不是在也讲 sung at our cradles 的那种语言的头脑中被构思的,不是以 sung at our cradles 的那种语言首先被表述的,我们中国人学物理、做物理,便无形中多了一个 yoke of a foreign language。

希望鄙人的“物理学咬文嚼字”系列能为大家打破 yoke of foreign languages 的努力稍尽绵薄。若它真的能显出一点点儿这功效,则笔者在撰写期间的所有抓耳挠腮便有了意义。必须声明的是,本系列中的所有错误,都是作者因为才疏学浅、马虎大意造成的,而与宇宙内禀的时空结构、作者所处的时代背景或者其他任何具体因素都不相干。作者为其中未能避免的错误预先致歉,并恳请读者朋友们批评指正。

是为序。

2018年5月14日于北京



目录

i | 自序

- | | |
|------------|--------------------------|
| 1 之七十六 | • 绑定 |
| 12 之七十七 | • 黑、暗的物理学 |
| 23 之七十八 | • Reciprocity——对称性之上的对称性 |
| 43 之七十九 | • 阶级与秩序 |
| 54 之八十 | • 特别二的物理学 |
| 68 之八十一 | • 物理学中的括号文化 |
| 77 之八十二 | • 超的冲动 |
| 83 之八十三 | • 简单与复杂 |
| 93 之八十四 | • Energy |
| 104 之八十五 | • 重与轻 |
| 114 之八十六 | • 导引 |
| 124 之八十七 | • 何反常之有？ |
| 133 之八十八 | • Bubble & foam |
| 145 之八十九 | • Parity |

155 | 之九十

177 | 之九十一

187 | 之九十二

196 | 之九十三

206 | 之九十四

216 | 之九十五

225 | 之九十六

232 | 之九十七

242 | 之九十八

261 | 之九十九

301 | 之一百

344 | 跋

• 化学元素之名

• 线

• 城邦与统计

• 可爱的小东西们

• Se luere

• 紧绷的世界

• 推之成广义

• Conceiving concepts for conceptualization

• Phase; a phenomenon

• 西文科学文献中的数字

• 万物皆旋

• 关于科普——兼为跋

Mit dem genius steht die Natur in ewigen
Bunde.

Was der eine verspricht, leistet die andere
gewiss. ①

—Friedrich Schiller, *Columbus*

Have you not wept together with your wife?
If not you missed that bond that joins forever. ②

—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 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。

② 此为 Fritz Rohrich 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。

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 reaction^①)。可怜这句话,到了中文的中学课本中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。

① 著名的 Least-action-principle, 汉译为最小作用量原理。虽然一般力学书上会有 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。

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,一般来说系统对电磁波的响应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)。二十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。

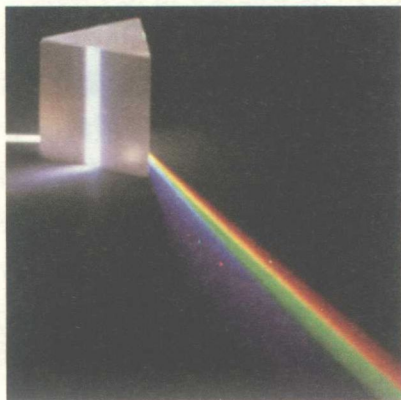


图 1 白光经三棱镜折射后分成了彩色的光带

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去所需的最低能量, 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。原子的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。

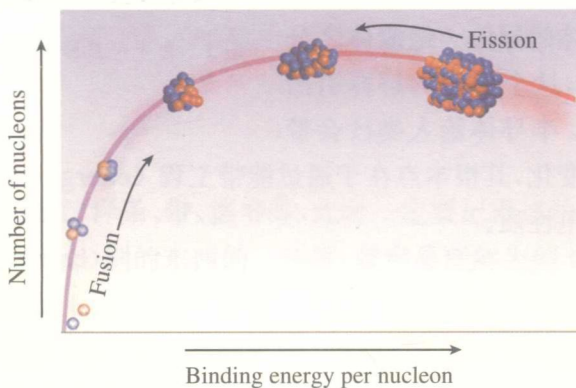


图 2 核结合能对核子数的依赖关系

Bind 的过去分词形式为 bound, 因为来自 bind, 故有命中注定了、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, 其一来自拉丁语动词 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 $\text{H}-\text{H}$, $\text{O}=\text{O}$ 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 $\text{H}-\text{H}$, $\text{O}=\text{O}$ 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)^①, 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 3.0 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

① 不管是 binding 还是 bonding, 一旦绑定到一起, 再想分开总是要付出代价的。

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^①。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)^②之类的概念中它似乎已为其他词给替代了。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^③), 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 > bondel), 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”,几条咸猪肉捆到一起那是“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。《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

① 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。

② 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。

③ 联邦德国的足球联盟。

捆儿家什), the optical fiber bundle (光纤束), 以及“the energy always comes in discrete bundles^①((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”时指的才是 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 Linienbüschel 一词。Büschel, Busch, 即英语的 bush, 灌木丛。这个“丛”字, 会被用来翻译 fiber bundle 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^②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 是丛空间 (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

① Energy in discrete bundles, 就是这么个说法, 这个“小捆儿”里没有结构。

② Determinant, discriminant, 这些词的汉译问题一直就没被认真讨论过。

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,挂满球形水珠的茅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。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]。



图3 胡萝卜地,天然的纤维丛

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 deferent 被汉译为均轮,其实是一个绕固定点转动的圆(动词 defer 的本义是屈从);epicycle, 外圆(骑在圆上的圆),汉译本轮,此圆自身转动着且其圆心是在别的圆(均轮或者别的本轮)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(Joseph Fourier, 1768—1830)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^①(图 4)。

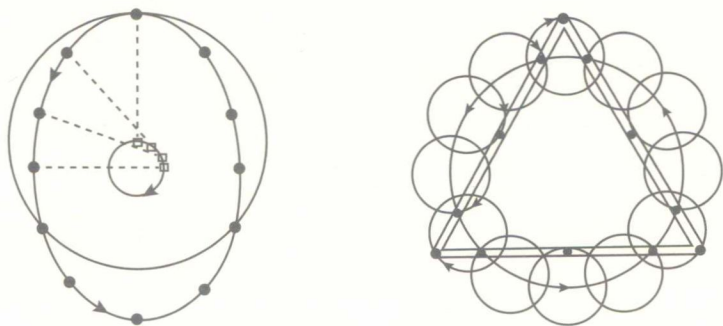


图 4 使用一个 epicycle 不仅能构造出椭圆,还能构造出三角形

6. Bend

Bend 作为动词,其为人们熟知的意思是弯折、弄弯、向……屈服,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,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(bend)效应了, 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。

^① 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。