

物理学咬文嚼字之四十三

左右可有别？

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

君子居则贵左,用兵则贵右¹⁾.
——老子《道德经》

摘要 左右是个常见的源自日常生活的科学概念. 英文物理文献中同左右之分有关的概念有 handedness, helicity, spirality, chirality 和 parity, 且关于左(left, link, gauche, sinister, nigh)、右(right, recht, droit, dexterous)的写法也是多样并存的局面. 左右的对称性及其破缺在自然界得到了最广泛的表现.

有一种感觉,对事物的描述时常会用到贴近生活的概念或者形象,以便更多的人能够轻松地理解. 不管是严酷的政治还是严格的自然科学,至少是到目前为止还都在遵循着这样的习惯. 不过,很快我们会明白,贴近生活的概念如果被应用到太多不同的语境中,那么对其理解可能会变得不那么轻松. 一个随“手”拈来的例子就是左、右的概念.

小时候(上世纪七十年代)念书,那时候在穷乡僻壤能见到的就那么几本书,常常遇到一些跟左右有关的概念,比如“左倾冒险主义”、“左倾盲动主义”、“左倾机会主义”,以及“右倾机会主义”、“右倾投降主义”,“右倾分裂主义”(毛泽东《实践论》, 1937),等等. 机会主义有左有右,有些人还竟然形左实右、假左真右,那么到底哪样是左,哪样是右,实在不是我们这些乡下穷孩子掰手指头能分清楚的. 及至稍大一点学物理,又遇到了什么左手感应定则,右手螺旋定则,再后来又有了螺旋性(helicity 还是 spirality?),手性(handedness 还是 chirality?), polarization²⁾和宇称(parity),更是觉得这些关于左右的概念还真真是个严肃的问题.

日常生活的左右,来自我们有两只手的事实. 这两只手之间的关系,其实是相当微妙的. 把两只手相对叠在一起,大致能重合,但是靠转动和平移不能让两只手重合,于是左右手被称为是镜面对称的. 这说的是手的外观. 其实我们知道我们两只手是很不一样的,大部分人的右手更有力、更灵活;左手灵活有力的人被当作另类,被称为左撇子. 可见左右又是不对等的. 对等、对称与否,要看着眼点在哪里,不过左右可用作一些二元体

系或性质的标签(tagging),则是无疑的.

政治上左右派或者左右翼的说法源于大革命前的法国. 1789年,法国国民大会成立,开始掌管国家事务. 国民大会开会时,贵族成员坐在大厅的右侧,观点偏保守;革命者成员坐在大厅的左侧,观点偏自由. 两派观点分明,遂有左翼、右翼的分别. 不过,细心的读者可能注意到,阅读相关的史料很难弄清楚那议事房到底哪边算右,哪边算左,因为从前看还是从后看,这左右可是调过来的. 这是理解左右概念的关键处,值得关注.

左、右,相应的英文为 left/right, 德语为 link/recht, 法语 gauche/droit, 拉丁语 sinister/dexter, 在英文文献中都可能遇到. 在这些词汇所寄生的文化中,左右又都有第二层含意(a secondary layer of meanings). Right 常意味着正确、正义、正当的、灵活的,而 left 意味着不吉祥的、险恶的、邪恶的、笨拙的³⁾,等等. 这两层意思交叠在一起,当然会引起一些误解⁴⁾. 当然,在科学文献中,左右的概念应该是清晰的.

各种文化中左右概念的差别,源于人类左右手之间在灵活性、力度等方面的差别. 左右概念在不同文

1) 此处“左”意为谦卑、卑下,“右”则是老子不断强调的“不得已而用之”. ——笔者注

2) Polarization 这一个词,在中文物理学中被分别翻译成了极化和偏振两个词,而且被用得好像井水不犯河水似的. 此等翻译,贻害无穷! ——笔者注

3) 英语中会用不同词源的左右来体现不同的意思. 左代表邪恶,由“Left hand serves the darkness”一句可见端倪(语出 Dan Brown, the Lost Symbol, Doubleday (2009). p446). ——笔者注

化中的意义延伸,有区别,但更具相通的地方.中国人认为左的不正,处于低级的地位,所以说“旁门左道”,“辅佐”;右为正,地位高,所以说“一时无人能出其右”,“天佑之”,等等.南亚一些地方,左手是拿来专门做龌龊事的,右手专门用来拿吃的,右手被认为是洁净的!在这个地方左右手用法不对,可能会引起麻烦.西方人也以右为正,所以右总是具有褒义,如“at right place, with right people, doing right things (在正确的地方和合适的人一起做正当的事情)⁵⁾”.在Michaelangelo的名画《创造亚当》中,上帝通过将右手食指碰触亚当左手的食指而赋予后者以生命(图1).



图1 油画《创造亚当》(The Creation of Adam, Michaelangelo)

英文文献中提及左右多种语言混用,可能不太容易察觉.英文的 left, right 就是来自德语的 link, recht, 在左旋的表达之一 levorotatory 中还能看到 link 的影子. 法语的左, gauche, 在英语中意味着 lacking grace, esp. social grace; awkward; tactless, 即不优雅, 糟糕. 好像还有脾气古怪, 不合群的意思, 比如“He (von Neumann) was somewhat gauche and not quite the type of ‘leader’ (他(冯·诺依曼)有点不合群, 不是那种领袖类的人物)”. 法语的右(droit)也出现在英文中, 取权利、法律层面的意义. Droit 使用形式之一是 adroit, 取从容、灵活之意, 如 adroit handling of an awkward situation (灵活掌控糟糕局面). 另一个词为 maladroit, mal + adroit, 意思是糟糕、笨拙(awkward, clumsy). 这容易让人想起汉语的不正即是歪. 源自拉丁(希腊)语的左右, 后面再说.

一些性质有二值特征(图2), 可以用左右来加以区别, 此即为手性(手征), 英文为 handedness. Handedness 在日常英语中指左右手在力度、灵活性方面的偏颇. 一般人的右手更好使(dexterous. 拉丁语, 本意是右侧的. 名词 dexterity 有些词典里干脆就说是灵活性), 属于 right-handed, 希腊语为 δεξιόχειρας(dexterous + chiral, right-handed). 也有一些人左手更好使一些, 是 left-handed(αριστερόχειρας). 还有人左右手都好使, 这是 ambidexterous(两手皆右). 左右手都行, 那能

耐可就大了, 中文里有“左右局面”的说法也许就是这个道理. 有人两手都挺灵活, 不过能干的事情各有不同, 这称为 mixed-handedness. 两手都不好使的那叫 ambisinister 或者 ambilevous (两手皆左). 这时的 handedness 和 chirality(手性, 来自希腊语的手, χεῖρ, χέρι), laterality(侧重)同义. 人类两手不对等, 也许是故意打破左右对称性的. 进化会强化动物占优势的行为, 而淘汰居于劣势的特点. 人类保持一部分“左撇子”, 一定有它的道理, 或者进化不同层次上有很多的破缺机制在起作用吧.

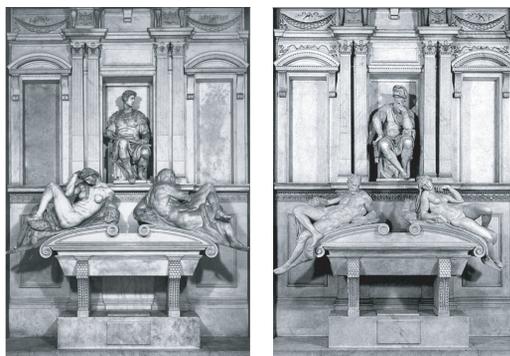


图2 Michelangelo 雕塑里的二值世界(左与右, 男与女, 欢乐与忧愁, 神界与尘世)

自然界中二值特征很普遍, 因此 handedness 是个非常重要的概念. 首先遇到这个概念是在中学物理课上, 关于电磁学一些现象的描述会用到手性的概念. 学生们不明白, 是因为书里没写明白. 我们生活在三维空间中, 需要三个线性不相关的矢量才能完备地描述空间中的几何关系. 两个非共线的矢量可以决定一个平面, 若这个平面也要加上方向标签的话, 则有两种可能. 由此, 我们明白了矢量叉乘的奥义, $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ 和 $\mathbf{B} \times \mathbf{A}$ 正好是用顺序给矢量叉乘的两种可能贴上了标签, 且有 $\mathbf{A} \times \mathbf{B} = -\mathbf{B} \times \mathbf{A}$. 对矢量叉乘结果 $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ 之方向的约定, 沿用的是右手定则, 即将右手拇指直立, 其它四指沿从 \mathbf{A} 到 \mathbf{B} 的方向弯曲, 则拇指所指方向为 $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ 的方向. 高中电磁学中学习的右手螺旋定则实际反应的是 Biot-Savart 定

- 4) 有个英文的驾校学员和教练的对话, 可供一笑. 学员: Turn left (左转)? 教练: Right (是的/往右)! 学员: Right (往右/对吗)? 教练: Yes, turn left (对的, 左转). 两层意思是很容易给弄拧的. 另一个利用 left, right 两层意思的例子是关于“脑残”的定义: Your brain has two parts; one is left, and another is right. Your left brain has nothing right, your right brain has nothing left (您的大脑分成两部分: 一部分为左(left), 一部分为右(right). 您的左脑没有一点 right 的(右的, 对的)地方, 您的右脑啥也没 left (左的, 留下). ——笔者注
- 5) 这句话实在是不好 rightly 翻译. ——笔者注

理,即 $\mathbf{B} \propto \frac{d\mathbf{I} \times \mathbf{r}}{r^3}$, 此处 \mathbf{B} 是磁场, 包含矢量叉乘的事实⁶⁾. 而左手定则涉及的是通电导线在磁场中的受力, 因为电荷在磁场中的力由 Lorentz 公式 $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 给出, 而在金属中造成电流的是电子, 带负电荷, 因此就方向来说, $\mathbf{F} \propto -\mathbf{I} \times \mathbf{B}$, 所以遵循左手定则 (图 3). 这里的左手定则和右手定则, 英文为 left-hand rule 和 right-hand rule.



图 3 关于电流产生磁场的右手定则和导线在磁场中受力的左手定则

描述电磁波也是用到右手定则的一个地方: 电磁波的电矢量、磁矢量和传播方向 (Poynting 矢量) 构成右手定则的关系, 电磁波沿 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 方向传播. 在一般的材料中, 电磁波的电矢量、磁矢量和传播方向满足右手定则 (form a right-handed system). 光从真空进入这样的材料, 入射方向和出射方向在法线的两侧 (图 4). 1967 年, Veselago 理论上研究了具有负折射率的材料, 其后在 1996 年前后具有负折射率的结构被制造出来^[1,2]. 这种光学材料被称为左手性材料 (left-handed materials). 光从真空进入这样的材料, 入射方向和出射方向在法线的同侧 (图 4) 手性材料 (chiral material) 是近年得到关注的 metamaterial (日后会专文介绍) 之一.

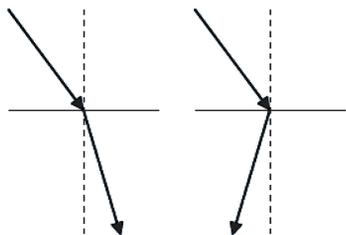


图 4 光在正常材料(左图)和左手性材料(右图)表面上的折射

电磁学意义上的 handedness, 除了电矢量、磁矢量和 Poynting 矢量之间的右手定则, 它的另一个意义是同 polarization 相联系的, 这时的描述可以用 helicity (螺旋性) 这个词. 电磁波的偏振 (polarization) 可用电场矢量在 (x, y) 平面上的变化表示. 采用 Jones 矢量形式, 一束光波可表示为 $|\Psi\rangle = \begin{pmatrix} |\Psi_x\rangle \\ |\Psi_y\rangle \end{pmatrix} \propto$

$\begin{pmatrix} \cos\theta e^{ikz} \\ \sin\theta e^{ikz+\alpha_0} \end{pmatrix}$, 偏振态取决于两个分量模的相对大小 (由参数 θ 决定) 和相位差 α_0 . 若分量的模相等 ($\theta = \pi/4$), 且相位差为 $\alpha_0 = \pi/2$, 则 $|R\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} e^{ikz}$ 和 $|L\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} e^{ikz}$ 分别为左旋圆偏光和右旋圆偏光,

英文为 left-handed (right-handed) circularly polarized light. 当然也可以用逆时针和顺时针来贴标签. 偏振光通过一些介质如石英晶体时偏振面会偏转, 这是旋光 (optical rotation) 效应; 当然, 造成的偏振面偏转有逆时针和顺时针方向两种可能性, 因此这旋光晶体就分为左旋光的 (levorotatory) 和右旋光的 (dextrorotatory). 在植物学上, 一些植物器官如卷须也被标记为左旋的和右旋的, 不过用词为 sinistrorse 和 dextrorse. 左旋糖 (levulose), 右旋糖 (dextrose), 和左旋形式 (laevo-form), 右旋形式 (dextro-form) 这些词中都是用的拉丁语词头. Sinistrodextral 意思是从左到右.

在一些书本中, 光波的偏振和光子的偏振的说法都有. 光子的角动量为 $l=1$ (单位 Planck 常数), 但因为是无质量粒子的原因, 它只有两个 ($[+1, -1]$) 而不是三个 ($[+1, 0, -1]$) 角动量分量, 因此可以用手性 (这里是 helicity, 汉译螺旋性) 描述, 即光子具有左旋和右旋两种状态, 对应 helicity 的本征值分别为 1 和 -1 . 1924 年, 玻色证明若光子的能量简并度为 2, 则从经典统计能导出 Bose-Einstein 分布. 光束的偏振态和光子的手性 (helicity) 之间是什么关系, 笔者一直没弄明白, 不敢妄言.

与光子相似, 中微子也有 helicity (螺旋性). 中微子的哈密顿量为 $H = c\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}$, 算符 $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} / |\mathbf{p}|$ 明显和哈密顿量对易, 是守恒量, 且本征值为 ± 1 , 因此可作为中微子的 helicity 算符. 我们知道, helicity 和观测方向有关, 如果中微子是有静止质量的, 则其速度低于光速, 就存在从前面和后面观察一个中微子螺旋性的理论可能, 那么一个中微子的螺旋性就会随着观察者角度不同在 $+1$ 和 -1 之间变换. 也就是说, 中微子螺旋性是否反转, 是同中微子是否具有静质量相关联的^[3]. 当然, 这样来看螺旋性也和中微子

6) 用矢量表示磁场是物理发展过程中的阶段性认识. 实际上, 它不是矢量, 因为空间反演下磁场的方向符号不变, 而作为矢量的电场却是要变号的. 有些地方把磁场称为轴矢量 (axial vector). 电场和磁场空间性质的不同说明在 Maxwell 方程中的电场和磁场不具有可类比性. 基于同电荷类比得来的磁单极的概念, 显然不是 on sound footing. 再者, 矢量分析不具有数学上的严格性, 对物理学的表达也带来一些其它负面影响, 提请读者注意. ——笔者注

的速度(最近所谓的中微子超光速测量引起了一些讨论)表达有关^[4]. 赶上中微子的接近光速以看到中微子的螺旋性反转是不可能的,但如果中微子是它自己的反粒子,则间接测量有可能.

对自旋 1/2 粒子来说,螺旋性(helicity)和手性(chirality)是不同的两个性质. 螺旋性是粒子自旋在动量方向上的投影,即上文的 $\sigma \cdot p / |p|$; 而手性是四分量 Dirac 旋量在粒子波函数之和或差之上的

投影, 由专门的手性算符 $\gamma_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 表示.

对于反中微子,手性和螺旋性的本征值是相反的.

上文提到 helicity, 源自 helix, 汉译螺旋、螺线. 但英文的 helix 和 spiral 中文有时都会随意地被称为螺旋, 它们之间是有差别的. 柱状弹簧那样的结构是 helix. 所谓的 DNA 双螺旋结构(double helix), 就是这样的形象(图 5). Helix 可以由带电粒子在磁场中的运动描述, 注意到 Lorentz 力的形式 $F = qv \times B$, 粒子的运动实际上可分解为 $v_{\perp} \times B$ 平面内的旋转和 v_{\parallel} 所决定的匀速直线运动, 而 v_{\parallel} 和 B 是同向还是逆向就决定了运动造成的螺线的两种 helicity,

$$\eta = \frac{v_{\parallel} \cdot B}{|v_{\parallel}| |B|} = \pm 1.$$

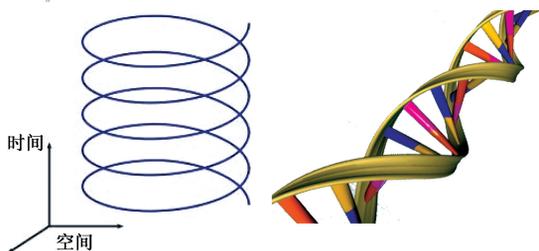


图 5 螺旋 helix 的数学形象与 DNA 双螺旋(double)结构

数学上 spiral 是从一点向外旋转着渐行渐远的曲线, spiral 作为动词就是盘旋的意思. 大自然中生长的许多事物, 从大的星系, 小到一个蜗牛甚至微米大小的自组装点阵^[5,6], 都可能表现出 spiral 结构(图 6). 在三维空间中存在的近一维(线状的)和近二维(带状的)物体, 低维结构占据高维空间, 折叠(folding)或者卷曲是必然, 甚至是生存的智慧(不弯腰, 易折断呀)(图 7). Folding, spiral 以及图 5 中的 double helix, 都因此获得了一定的刚性, 增加了存在下去的可能. 这一点, 好像没得到充分的认识.

一个单纯的 spiral 可以是顺时针的, 也可以是逆时针的. 一个平面上的 spiral 其实无所谓顺时针还是逆时针的, 因为换到另一侧看顺时针就变成了逆时针



图 6 Spirals. 从星系, 厘米大小的蜗牛到微米大小的应力自组装点阵^[5,6]都表现出螺旋结构



图 7 卷曲成螺旋, 一种存在的智慧. 左图: 粒子径迹; 右图: 植物的卷须

的. 一些蜗牛身形是关于平面对称的, 它们的螺线本质上是二维的, 所以无所谓其螺线是顺时针还是逆时针的, 左旋的还是右旋的(图 6). 具有锥形 spiral 外观的蜗牛就不一样了, 它的螺旋性具有了绝对的意义(图 8). 按说, $\eta = \pm 1$ 两种螺旋性是对称的, 没什么差别, 蜗牛应该左旋、右旋各半才对, 而实际情况是一种蜗牛大多只有一种螺旋性, 不同种的蜗牛会两种螺旋性都有. 什么使得螺旋对称性破缺了呢? 有趣的是破缺机制不在生长层面之下, 而在其上. 不同手性的蜗牛的器官是镜面对称的, 这使得不同手性的个体之间的生殖力学变得艰难. 这样经过自然选择以后, 一种蜗牛就差不多剩下一种螺旋性了. 如果是植物的话, 就没这个问题. 与动物不同, 植物的生殖行为不会受其个体对称性(matching 的需求)影响, 因此其左旋和右旋出现几率各半, 如松果的斜列螺旋(图 9)和微纳米自组装的斜列螺旋^[6].



图 8 具有(+1, -1)两种 helicity 的蜗牛. 一种蜗牛会偏好一种螺旋性

斜列螺旋, 即 parastichous spirals, 这是一种同 Fibonacci 数列(1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, ...) 相联系的结构, 结构由分立的单元如向日葵的种子, 雏菊的小花(floret), 菠萝、松果的鳞片等构成. 它们既可看成是一组顺时针的螺旋, 又可以看作是一组逆时针的螺旋, 因此是 parastichous spirals. 这样的螺旋结构, 螺旋数必须是 Fibonacci 数列中相邻的两个数, 如



图9 具有斜列螺旋结构的松果,两种手性的发生几率各半.原图的说明很有意思: Something **sinister**: the pine cone on the **left** is in the “**lefty**” form; that on the **right** is **dexter**, or “**righty**”[7]

5 和 8,可以记为 5×8 . 若 5×8 表示顺时针螺旋数为 5,逆时针的螺旋数为 8,则 8×5 表示顺时针螺旋数为 8,逆时针的螺旋数为 5. 若将 5×8 的花样标记为左旋的,则 8×5 的花样为右旋的;当然,也可以反过来. 这就说,这也是一类有手性的结构. 目前关于 parastichous spirals 哪样算左旋的,哪样算右旋的,没有定论. 对于微纳米结构和植物,这样的左旋和右旋之间没有区别,因此从种群的角度看会以大致各半的几率出现. 但是对于一个具体的菠萝,向日葵,或者应力花样,它们可不会像量子存在那样取两种状态的叠加;必须作二选一的抉择. 到底是什么原因决定了它选择了两种手性结构之一,即 what tips the chirality,还一直是个谜. 在粒子物理、手性分子合成、手性晶体生长方面,研究者都会问这个问题[8-11]. 可以肯定的是,在生长单元或者更低一点的层次上的一些难以控制的偶然性因素决定了生成物左旋的或右旋的形式. 这种情形和量子力学的隐变量(hidden variable)理论有些共通的地方.

用 chirality 表示的手性,是非常普遍的概念,数学、物理、化学、生物中都能见到(图 10). 数学上有专门的手性代数(chiral algebra)[12]. Chiral algebra 源于数学物理,是共形场论的核心. 手性代数研究的对象是量子的,相应的经典对象称为 Coisson 代数,由经典场空间上的局域泊松括号定义. 在化学领域,存在许多分子的或晶体的结构,其不等同于它们的镜象,因而是手性的. 虽说左右旋的分子结构是对称的,但在环境中它们和其它物质间的相互作用可能是不同的(人体偏好用右旋糖),因此有必要给这些物质贴上明显的手性标签,如左旋肉碱,右旋葡萄糖等. 手性结构的研究在化学和生物化学方面具有重要的地位,2001 年度的诺贝尔化学奖就授予给了这个领域的科学家.

手性问题曾在物理学史上写下了重重的一笔. 有文献指出手征性是弱相互作用的特征. 不过弱相互作用

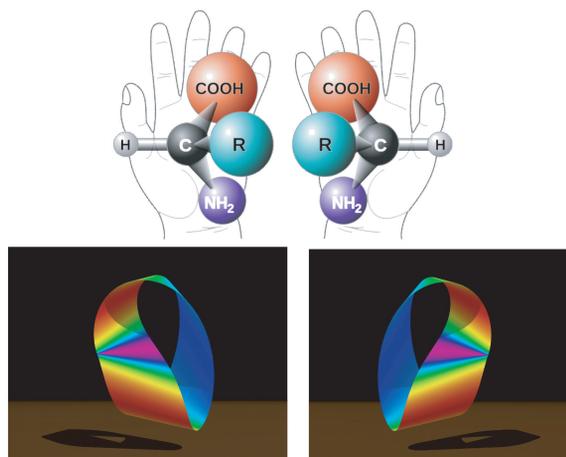


图 10 手性的存在(chiral objects). 氨基酸属的两种对映体⁷⁾和 Möbius 带及其镜象

用里面提到的粒子遵循的对称性是宇称守恒,宇称(parity)的本征值为 ± 1 ,这一点和 helicity, chirality 一样. 但是,parity 涉及的是粒子波函数的时空变换, $P^2 |\Psi\rangle = e^{i\phi} |\Psi\rangle$,即两次宇称变换给波函数最多带来一个相位上的改变,从这一点来看,它和 helicity, chirality 还是有区别的. 1954-1956 年间,出现了 θ - τ 之谜,其实 θ, τ 是同一种粒子,但是它衰变成不同数目的 π 粒子, $\theta \rightarrow \pi + \pi, \tau \rightarrow \pi + \pi + \pi$ ⁸⁾, 这里两个 π 的宇称是 $+1$,三个 π 的是一 -1 . 宇称不守恒了. 1956 年,李杨提出弱相互作用宇称不守恒的设想,后来为吴健雄女士于 1957 年用 Co60 的 β -衰变实验所证实. 宇称不守恒的提法,对物理学家的冲击是非常大的. Pauli 坚持时空对称性,他在写给 Weisskopf 的信中写到^[13]:“我不相信上帝是一个软弱的左撇子,我可以跟任何人打赌,做出来的结果(电子的角动量分布)一定是左右对称的. 我看不出相互作用的强度和镜面对称性之间有什么逻辑联系.” Pauli 坚信时空对称性,让人想起 Buridan 的驴子⁹⁾. 可怜的 Buridan 的驴子(图 11),因为面前的草料放置具有严格的宇称,它无法决定从哪里下口,竟然只能挨饿(其实一旦它决定了从哪里下口,就能给草料带来对称破缺). 所幸的是,大自然不是

7) 对映(结构)体, enantiomer, 来自 enantios, 希腊语, opposited 的意思,正好用手性描述. ——笔者注

8) 这里忽略了 τ^\pm, π^\pm, η 等细节. ——笔者注

9) J. Buridan 是法国哲学家,提倡道德决定论的哲学. Buridan's ass, 或者 Buridan's donkey, 就是为了讽刺 Buridan 的哲学提出来的——如果驴子按照“选择离它最近的草料”的原则生活的话,则它面对两堆对称的草料时会饿死. 这实在说明了对称性破缺对物理学家和驴是多么重要. ——笔者注

10) 弱相互作用 parity 不守恒和蜗牛偏向单一 helicity, 其机理出现的相对层面不一样,也许是个有趣的话题. 机理既可能出现在对象 sub-层面,也可能出现在 super-层面. ——笔者注

Buridan的驴子,它允许对称的破缺,从而表现出惊人的多样性¹⁰⁾. 或者,也许就不存在对称性,就像不存在数学的圆一样. 用数学的理想的概念束缚了对自然的理解,算是一种作茧自缚(自然可以不受人类所提炼的自然规律的约束吧!). 标准模型通过把弱相互作用表达为手性规范作用从而纳入了宇称不守恒. 据信超弦理论在找到 Calabi-Yau 紧致化后,可以具备手征性,笔者不懂,恕不多言.



图 11 可怜的 Buridan 的驴子,因为草料具有严格的左右对称性,无从下口

本文讨论了和手之左右有关的一些概念如 handedness, chirality, helicity 和 parity, 也给出了一些英文文献中左右的不同写法, 希望有助于读者. 限于水平, 不足之处甚多. 比如“the nigh horse”中的 nigh, 除了表示“时空上的近”以外, 它还有“on the left”的意思, 不知和它对应的“ontheright”是哪个

词, 盼有识者告知.

参考文献

- [1] Veselago V G. Sov. Phys. Usp. ,1968, 10(4): 509. 俄文原文发表于 1967 年
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1996, 76: 4773
- [3] Goldhaber A S, Goldhaber M. Physics Today, 2011, (5): 40
- [4] Wang Kelin, Cao Zexian. Wave Packet for Massless Fermions and its Implication to the Superluminal Velocity Statistics of Neutrino, to be published
- [5] Li C R, Cao Z X. Science, 2005, 309: 909
- [6] Li C R, Ji A L, Cao Z X. Appl. Phys. Lett. , 2007, 90: 164102
- [7] Fleming A J. Nature, 2002, 418: 723
- [8] 孟杰. 物理, 2009, 38(2): 108. What breaks the left-right symmetry?
- [9] Hermann Weyl. Symmetry. Princeton University Press, 1952
- [10] Amouri Hani, Gruselle Michel. Chirality in transition metal chemistry, Wiley, 2008
- [11] Amabilino D B. Chirality at the nanoscale. Wiley-VCH, 2009
- [12] Beilinson Alexander, Drinfeld Vladimir. Chiral Algebras, the American mathematical Society, 2004
- [13] Atmanspracher H, Primas H. (Eds.). Recasting Reality. Springer, 2010. 原文是 I do not believe that God is a weak left-hander and would be prepared to bet a high amount that the experiment will show a symmetric angular distribution of the electrons (mirror symmetry). For I cannot see a logical connection between the strength of an interaction and its mirror symmetry (January 17, 1957)