

手性起源与氨基酸的低温相变¹⁾

王文清 盛湘蓉

(北京大学技术物理系, 北京 100871)

摘要 组成人体蛋白质的 20 种氨基酸的手性, 近年来被认为是由类似于 BCS 理论中的二级相变所引起. 本文将物理学中用于解释生命现象的特殊问题——手性起源的有关理论及规律作一简要的评述.

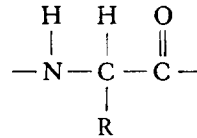
关键词 手性起源, 二级相变, BCS 理论

Abstract Chirality among the twenty amino acids which make up the proteins may be a consequence of a phase transition which is analogous to that due to BCS superconductivity. We present a brief review of the physical theory and laws used to elucidate the biological phenomena of the origin of chirality.

Key words Origin of chirality, second-order phase transition, BCS superconductivity

为什么生命的基本物质蛋白质只由 L 氨基酸组成, 核酸 RNA 和 DNA 只由 D 糖组成? 物理学是研究物质世界普适规律的学科, 怎样把物理学的普适规律与生命现象的特殊规律统一起来, 是当今自然科学的最前沿. 蛋白质分子是由 20 多种氨基酸连接而成的共价多肽链. 其连接的基本方式是肽键.

如将蛋白质的晶格结构简化为下列形式:



晶格中的 H 可以给出电子, 其行为像金属氢^[1].

怎样用物理学规律来阐明和解决为什么人体蛋白质只由 L 氨基酸组成呢? 1991 年萨拉姆^[2] (A. Salam) 提出一个新概念, 由于 Z^0 相互作用, 电子与电子耦合形成库珀对, 在临界低温下玻色凝聚, 使 D 氨基酸向基态 L 型产生二级相变, 造成生命起源中对称性破缺. 学说中述及下列物理理论及规律.

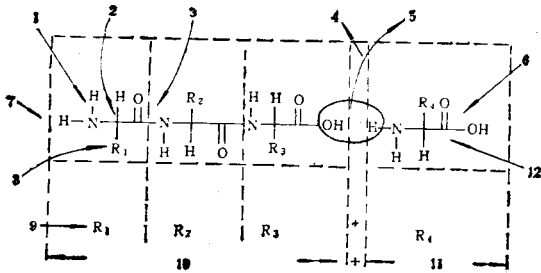


图 1 蛋白质分子氨基酸连接的共价多肽链图^[13]

1. N 末端; 2. α 碳; 3. 肽键; 4. 脱水形成肽键; 5. 水; 6. C 末端; 7. 多肽主链; 8. 侧链; 9. 氨基酸残基; 10. 多聚体; 11. 单体; 12. 游离氨基酸

1 规范场理论^[3]

1918 年韦耳 (H. Weyl) 尝试建立统一场论时, 引进了规范 (gauge) 概念. 按照广义相对论, 时空是弯曲的, 不同时空点的长度标准不

1) 国家科委基础研究高技术司和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目.
1994 年 7 月 14 日收到初稿, 1994 年 10 月 14 日收到修改稿.

同。韦耳试图通过物理规律不因时空量度标准改变的原理，建立统一场论。他的努力虽未获成功，但却由此建立了时空不同量度之间的变换关系，被称作定域规范变换。

1920年量子力学建立后，人们认识到规范变换有定域和非定域之分。例如，描述微观系统的波函数 Ψ 可以写为

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = e^{i\alpha}\Psi(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

相因子 α 可以任意改变，而对于力学量的观测无影响。这种变换的不变性是与时空无关的变换，是非定域的规范变换。按照量子力学的规律，一种变换的不变性导致存在着一种守恒的物理量。上述规范的守恒量是电荷，即变换中系统的电荷保持不变，满足电荷守恒定律。如将相因子与电荷联系起来，(1)式波函数在每一个时空点上的相位正比于电荷，即

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = e^{iea(\mathbf{r}, t)/\hbar c}\Psi(\mathbf{r}, t). \quad (2)$$

按照量子力学要求，这个变换下的不变性导致存在一个矢量场——电磁场，它与带电粒子的相互作用就是电磁相互作用。这是一种与时空相关的定域规范变换，数学上用 $U(1)$ 来表示，传递电磁相互作用的量子是光子。

数学上将适合于交换定律的群称作交换群，也叫阿贝耳群，以纪念挪威数学家 N. H. Abel. $U(1)$ 又称么正变换群，这种群的先后两次变换是可以对易的，所以是阿贝耳群。

到了50年代，由于许多新粒子发现，它们之间的相互作用复杂。1954年杨振宁和米尔斯(Mills)提出非阿贝耳规范场理论，考虑了质子、中子和 π 介子的同位旋变换。同位旋转动变换构成 J 参量的 $SU(2)$ 群，它是不可对易的非阿贝耳群。由同位旋不变性理论和 $SU(2)$ 对称性的要求，必须引进三个矢量规范场。这些规范场的量子，自旋是1，同位旋是1，电荷分别是+1，-1和0。杨-米尔斯场的量子之间有直接的相互作用，而光子间无直接相互作用。该理论的核心思想为，存在一种对称性就自动要求存在一种场，而且场可以有多个分量。人们可以应用该理论研究粒子的内部对称性。

2 对称性自发破缺

对称性是个重要概念，对称性对应守恒律。对称性的破坏，一定反映相应守恒律的破坏。已知电磁相互作用是一种阿贝耳规范作用，当进一步将杨-米尔斯非阿贝耳规范理论应用到弱相互作用时，遇到了困难。

电磁相互作用是通过光子传递，光子静质量为零，电磁相互作用是长程的；而弱相互作用是短程的，传递弱相互作用的矢量玻色子(通常称中间玻色子)要有很大的质量。但严格对称的规范理论，要求矢量玻色子静质量必须为零，这是第一个困难。第二，弱相互作用宇称不守恒，表明其内部对称性有某种特殊的性质，引进弱同位旋作为弱相互作用的内部对称性，要求中间玻色子有带电的和中性的。将光子作为弱相互作用的中性的中间玻色子，结果与实验矛盾而被否定。

到了60年代，格拉肖(S. L. Glashow)首先认识到要统一弱相互作用和电磁相互作用，内部对称性必须扩大，除弱同位旋外还要加弱超荷，他提出用 $SU(2) \times U(1)$ 内部规范对称性，统一弱相互作用和电磁相互作用。中间玻色子应有4个，两个带电，两个不带电。光子是其中的一个中性的中间玻色子。但中间玻色子的质量问题仍未解决。

1960南部阳一郎等提出对称性自发破缺的概念，即物理规律本身是对称的，但物理系统所处的基态是简并的，在同一个基态能级有许多种不同的状态。实际的物理系统只能处于基态中的某一个状态。在这个特定状态下所发生的现象，将不显示物理规律固有的对称性。这里物理系统并没有受到外界干扰，对称性自发破坏，称对称性自发破缺。南部等人设想，物理规律原来具有手征对称性，即自旋为1/2的费米子，有左旋与右旋之分，分属于两个对称群，有不同的变换规律，这样费米子质量应为零。一旦手征对称性自发破缺，原来无质量的2个分量的费米子可以合并为一个具有4个分量的

核子,从而获得质量,同时还出现一个零质量的玻色子。

1961年,戈得斯通(J. Goldstone)根据相对论量子场论,揭示出连续对称性自发破缺,导致出现零自旋零质量的玻色子,称 Goldstone 粒子。1964年,黑格斯(P. W. Higgs)指出,规范对称性的自发破缺,Goldstone 粒子并不表现出来,而是通过规范变换被吸收到规范玻色子之中,成为它的纵分量,并使得规范粒子获得质量。这个过程称 Higgs 机制,该机制不仅使规范粒子可以获得质量,而且保存了规范理论可以重整化的性质。

3 电弱统一理论

温伯格(S. Weinberg)和萨拉姆先后于1967年和1968年采用了格拉肖的 $SU(2) \times U(1)$ 规范对称性,相应的量子数为弱同位旋 I 和弱超荷 Y ,并且应用了对称性自发破缺机理,得到了一个可以重整化的电弱统一的规范场理论。该理论对应的规范场有4个独立的分量,场的激发态表现为4种规范玻色子。属于 $U(1)$ 规范场的是 B^0 ,属于 $SU(2)$ 规范场的是 W^+, W^- 和 W^0 。这些规范粒子质量是零,自旋是1。由于这是两个互相独立的规范变换群,因此有两个独立的规范耦合常数, $U(1)$ 群是 g_1 ,与 B^0 对应; $SU(2)$ 群是 g_2 ,与 W^+, W^- 和 W^0 对应。这个理论的最重要假设是,除了费米子和规范玻色子之外,还存在着充满全空间的一种特殊的场,称黑格斯场,场的激发态显现为黑格斯粒子,其自旋为零,弱同位旋是 $I=1/2$ 的二重态,弱超荷是1。所有的场处于能量最低态(基态),即真空态,因此在真空中,黑格斯场也应处于能量最低态。特别是对其他场,处于基态时每种场的场量都是零;但黑格斯场的势能 $V(\varphi)$ 随黑格斯场的场量 φ 变化,是绕 Z 轴旋转对称的曲面^[5]。当 $\varphi=0$ 时,处于正中心点的势能是个极大值,而势能最低处是一个旋转对称的环形的谷。现实的物理真空只能处于环形谷中的某一点,于是原来的对称性不能保

持,这就是对称性自发破缺。由于对称性自发破缺, B^0 和 W^0 的另一线性组合,表现为 Z^0 粒子, Z^0 和 W^+, W^- 都获得很大质量,成为弱相互作用的媒介粒子。

电弱统一理论,解释了电磁相互作用和弱相互作用的许多实验事实,并作出两点预言:(1)存在中性流弱相互作用,其强度与带电流弱相互作用是同一量级;(2)传递弱相互作用的中间玻色子是 W^+, W^- 和 Z^0 粒子。其质量由实验确定,分别为 $m_W = 80.3 \pm 0.3 \text{ GeV}$, $m_Z = 91.163 \pm 0.031 \text{ GeV}$,与理论预期值符合甚佳。该理论获得巨大成功。为此,格拉肖、温伯格和萨拉姆获1979年诺贝尔物理学奖。

4 生命起源与 Z^0 粒子

W 粒子和 Z 粒子都是超高能物理的基本粒子,他们与生命起源有何联系呢?迄今为止认为生命起源分三个阶段:宇宙演化、前生物化学进化和生物进化。(1)宇宙演化包括宇宙早期历史,在宇宙产生后 10^{-12} s,发生从强子物质态到夸克、胶子等离子体的相变,使电弱作用由于相变分为电磁相互作用和弱相互作用。温度达到 250 GeV ^[1],传递弱中性流的载体粒子 Z^0 获得质量。(2)大约数十亿年后,行星形成,早期宇宙演化期的夸克凝聚为质子和中子。在宇宙大爆炸后几十万年,电子间的重合就进行了。未来生命的分子早在地球起源前就已形成。(3) 3.8×10^9 年前进入生物进化阶段,包括核酸多聚体的复制和蛋白质的合成。

经典上认为一个手性分子及其镜面对映体能量相等,但弱相互作用宇称不守恒使L和D型分子能差为 $3 \times 10^{-19} \text{ eV}$,其中最重要的是由 Z^0 玻色子所传播的弱中性流短程力。室温下使L氨基酸(D糖)比D氨基酸(L糖)多 $1/10^{17}$ 。(因为 $10^{-17} \approx 3 \times 10^{-19} \text{ eV} / 300 \text{ K}$)。如此小的概率,化学家怀疑能否造成单一手性机制。物理学家Kondepudi和Nelson根据弱

1) 单位规定 $\hbar = c = k_B = 1, 1 \text{ K} = 10^{-4} \text{ eV}$ 。

中性流对非平衡化学体系自发手性对称性破缺计算也不尽如人意。

萨拉姆认为必须借助量子力学协同效应,在临界低温下,由于玻色凝聚,D型氨基酸向L型相变,并设想在低温(或高密度如中子星)下,在原始宇宙空间,早在地球形成前,氨基酸的手性选择就已进行。

5 BCS 理论

当 C,H,O, N 等原子结合成氨基酸晶体时,H原子外层的电子发生共有化,每个原子在去掉共有化电子后成为正离子,它们在空间排列或具有一定周期性格子叫晶格点阵,共有化的自由电子叫电子气。

在晶体中,H原子的电子除了受本身原子核的作用外,还要受其他原子核及电子库仑位能影响。电子是费米子,受泡利不相容原理制约,在0K下,去占领一个又一个越来越高的能级,最后占领的能级称费米能级 E_F 。用量子力学设想电子间存在的库仑排斥作用,在临界低温下 (T_c),可以由传递 Z^0 子所引起的吸引,超过电子间库仑斥力,在电子间出现一定净剩的吸引相互作用而形成库柏对,发生动量空间的玻色凝聚。当氨基酸晶体一旦进入超导后,H原子的电子出现两种相:一是正常自由电子相;另一是超导电子凝聚态。电子结成库柏对和能隙的出现,是整个电子系统的集体效应,一对电子间的吸引作用不是两个电子加上一个晶格就会存在,它是整个电子体系与全体晶格离子相耦合而发生的,耦合强弱决定于所有电子的状态。当温度不同时,导致电子气中电子状态分布的变化,从而影响能隙的大小和电子对的结合程度。

电子对是由 Z^0 子引起吸引而结合的,由 $2\Delta(0) = 3.53k_B T_c$ 。知道,电子对的结合能 $k_B T_c \sim 10^{-3} - 10^{-4} \text{eV}$ 量级。利用测不准关系,可估计形成电子对的两个电子间距离 $\zeta \sim 10^{-4} \text{cm}$,为晶格长度 10^4 倍。说明电子对在空间中延展范围很大,它不象正常电子那样完全不

相关地独立运动,而存在着一种关联性, ζ 代表存在这种关联效应的空间尺度。如果在超导体表面上附上一层足够薄的正常金属,那么它将和超导体一起进入超导态产生邻近效应,尽管它单独存在时是不会超导的^[6]。

6 D 氨基酸的二级相变

假定氨基酸单晶中的H原子行为类似于金属氢,当金属H从正常态转变到超导态时,在临界温度 T_c 会发生跳跃式突变,萨拉姆根据电弱统一理论,假设存在 Higgs 场,用量子力学理论计算, T_c 大约在 250K。为了验证上述思想,1994年4月,王文清、盛湘蓉与陈兆甲、杨宏顺科研组合作^[7],选择了D与L能差大 ($6.3 \times 10^{-19} \text{eV}$) 的缬氨酸 (Val),采用差分绝热连续加热量热法测定了 D-Val 和 L-Val 单晶的 $C_p \sim T(K)$ 图。实验结果表明, C_p 与 T 成正比, D-Val 在 $270 \pm 1 \text{K}$ 有明显 λ 相变。用升温法和降温法 (0.5K/min) 反复实验,及以 L-Val 作参比测定 D-Val 单晶的 $C_p \sim T$ 图, T_c 重复出现。实验排除了水汽、结晶水及杂质的影响, D和 L-Valine 单晶 X 衍射数据表明,在 T_c 前后, D-Val 晶格结构无变化。对人体中含有的其他 18 对 D 和 L 氨基酸的比热测定工作尚在进行中。我们认为, D-Val 比热的异常可能是由于 H 原子上的电子由正常电子转变为超导电子所引起的。

生物体内存在着超导体吗? 一直是个引人入胜的问题。1971年克柏报道,具有高浓度胆固醇的神经纤维的某些部分,在生理温度下有超导性。后人进一步报道,实验证实胆酸、脱氧胆酸、石胆酸,胆烷酸钠盐的抗磁性分别在 30K, 60K, 130K, 277K 起突然变化,突变时原子晶体结构没有变化,本质上应是由电子引起的^[8]。氨基酸本身是绝缘体,如果不同氨基酸的 T_c 在 250K 左右,那表示存在着高温超导区,即材料整体是绝缘体,但材料本体内,分散着小的超导区,称为零星超导体 (fractional superconductor)。还有人认为,就脱氧核糖核

酸 (DNA) 的分子结构而言,可能产生所谓的激子超导电性。

21 世纪是个充满理想与幻想的时代,让我们进一步探索自然界的秘密,去揭示生命的奥秘。

参 考 文 献

- [1] A. Salam, *Phys. Lett.*, **B288**(1992), 153.
- [2] A. Salam, *J. Mol. Evol.*, **33**(1991), 105.
- [3] 尤广建, 经典物理与现代物理, 陕西人民教育出版社, (1993), 239—245.
- [4] 高崇寿、曾谨言, 粒子物理与核物理讲座, 高等教育出版社, (1990), 156—172.

- [5] A. Salam, *Chemical Evolution: Origin of Life*, Edited by Cyril Ponnampuruma and Julian Chela-Flores, Proceeding of the Trieste Conference on Chemical Evolution and the Origin of Life, 26—30 October 1992, 101—117, A. Deepak Publishing 1993, Hampton, Virginia USA.
- [6] 张裕恒、李玉芝, 超导物理, 中国科学技术大学出版社, (1991), 373.
- [7] W. Wenqing, S. Xiangrong, Y. Hongshun et al., presented to Conference on the Structure and Model of the First Cell, Trieste, Italy, 29 Aug. 1994.
- [8] 章立源, 超导体, 科学出版社, (1992), 30—53; 115—116.

关于发展“冶金内耗”¹⁾

戴 景 文

李 尚 诣

(东北大学理学院, 沈阳 110006)

(冶金工业部科技司, 北京 100711)

摘要 冶金内耗,旨在系统地研究钢铁等金属材料的弹性能量耗散谱,以实现内耗在冶金工业的广泛应用;研究内耗与金属属性及制做过程的本质联系,以促进物理冶金学进一步向原子层次发展。它是一门把滞弹性物理同金属材料及其科学发展紧密结合起来的应用内耗。文章从金属材料发展中的理论—实践的联系状况,从材料性能和金属内耗两者的物理本质,以及从滞弹性物理学和金属材料及其科学的发展和需要等方面,讨论了发展“冶金内耗”。

关键词 内耗,冶金

Abstract The internal friction in metallurgy is an applied research field closely combining the physics of anelasticity and the development of metallic materials and metal science. Its objective is to achieve the wide application of internal friction to the industry of metallurgy by systematical studies of the dissipation spectrums of elastic energy in iron, steels, and other metals, and to further the development of physical metallurgy to atomic level by studying the nature of the relationship between the internal friction and the properties of metals and their production process. The present paper discussed the developing internal friction of metallurgy based on the state of the association between the theory and the practice in the development of metallic materials, on the nature of the properties and the internal friction of metals, and on the advancement and requirement of the physics of anelasticity and metallic materials and metal science.

Key words internal friction, metallurgy

1 金属材料及其科学发展的要求

金属是对人类社会发展和现代物质文明产

生巨大影响的重要材料。在人类史上,曾以铜、铁等金属划分时代;而在当代,冶金则是经济、

1) 1994年11月9日收到初稿,1995年1月23日收到修改稿。