



超导超流能隙因素理论初探

王德奎 (Wang Dekui)

绵阳日报社, 绵阳, 四川 621000, 中国, y-tx@163.com

摘要: 1914年昂尼斯做实验将铅丝做成闭合圆环, 放在磁场中让磁场的方向垂直于环的圆平面, 然后让铅环浸在液氮中降温, 当线圈进入超导态后, 去掉外磁场, 这时在闭合超导线圈内感生出一个感应电流。由于超导电阻为零, 这个电流更精致的实验用磁强针放在铅环中心证明: 线圈中的电流经过几年的时间也没发现有丝毫的衰减。温度极低, 环路电流与南极出北极进的磁力线转动, 这是典型的三旋空间现象。即三旋量子数, 体旋对应温度, 面旋对应电流, 线旋对应磁场。三旋是微观领域物质的一种固有属性, 但多个世纪以来却无人联系这个隐秩序。

[王德奎 (Wang Dekui). 超导超流能隙因素理论初探. *Academ Arena* 2022;14(8):71-79]. ISSN 1553-992X (print); ISSN 2158-771X (online) <http://www.sciencepub.net/academia>. 09. doi:[10.7537/marsaaj140822.09](https://doi.org/10.7537/marsaaj140822.09).

关键词: 超导、超流、能隙、三旋、凝聚态、软物质

一、不是软物质类似软物质

1938年, 卡皮查和艾伦等同时发现了He II超流。He II能以每秒几厘米的速度流过两块压紧的抛光玻璃表面所形成的缝隙。而对复杂体系运动规律的认识, 是21世纪科学的主要目标之一。

在自然演变平衡组成的可见物质世界里, 最基本的元素是氢。氢又转化为其它元素, 最接近的是氦。液氦的流动性极大, 能渗透气体进不去的小孔, 这就是超流现象。另外, 液氦还能使一些导电的金属物体具有超导现象。1914年昂尼斯做过一个实验: 他将铅丝做成闭合圆环, 放在磁场中让磁场的方向垂直于环的圆平面, 然后让铅环浸在液氮中降温, 当线圈进入超导态后, 去掉外磁场, 这时在闭合超导线圈内感生出一个感应电流。由于超导电阻为零, 这个电流是否可以长期保持下去呢?

后来有人重新更精致地做了这个实验, 用磁强针放在铅环中心, 证明线圈中的电流经过几年的时间也没发现有丝毫的衰减。温度极低, 环路电流与南极出北极进的磁力线转动, 这是典型的三旋空间现象。即三旋量子数, 体旋对应温度, 面旋对应电流, 线旋对应磁场。三旋是微观领域物质的一种固有属性, 但多个世纪以来却无人联系这个隐秩序。

所谓超导现象就是在一定的低温下, 金属的电阻率突然变为零, 电子的运动速率保持不变, 永远以某一个速率运动下去, 这种现象在低温物理研究中称为超导现象。所谓超流现象就是在低温液体的流动现象里, 液体流过很细的导管不用任何压力, 液体就能顺利地管子的一端流进, 并且流到另一端, 这种现象在低温物理现象中称为超流现象。

发生超流和超导现象, 当然不是某种物质的一个单

体行为, 而一定是多体行为, 即是该物质的一种系综现象。而单体可称“球量子”或“环量子”, 一般的先验图像和经验图像类似“颗粒物质”。20世纪相对论和量子力学对物质世界新认识的开拓, 深入研究了“硬物质”如金属、半导体及各种功能物质, 然而却存在另一类型的物质, 其运动规律和行为主要不是由量子力学和相对论的基本原理直接导出。例如, 与一般硬物质如金属、陶瓷等的运动变化规律有许多本质区别的软物质。

软物质也称软凝聚态物质, 是指处于固体和理想流体之间的物质, 一般由大分子或基团(固、液、气)组成, 如液晶、聚合物、胶体、膜、泡沫、颗粒物质、生命体系等。其颗粒物质既类似固体, 流动时又像液体、气体, 运动规律很复杂; 而且颗粒物质可涵盖各类分离态物质, 如沙石、泥土、矿物、粮食等, 以致公路上车辆流动也可作为研究对象。

软物质概念出现之前, 一般将液体分为简单液体和复杂液体两大类。1991年诺贝尔奖获得者、法国物理学家德热纳用“软物质”一词概括复杂液体等一类物质, 得到广泛认可, 近年软物质物理已成为一门新的学科领域。软物质如橡胶、人造纤维、墨水、洗涤剂、饮料、乳液及药品和化妆品等, 与人们生活密切相关, 在技术和生产上有广泛应用背景; 又如生物体细胞、体液、蛋白、DNA等, 也是多学科交叉的研究领域, 更是通向研究生命体系的桥梁。软物质是复杂体系, 其基本特性是对外界微小作用的敏感和非线性响应、自组织行为、空间缩放对称性等, 与固体和液体有不同的运动规律。

例如有人研究颗粒物质及胶体的相互作用和动力学, 对固体粉末与液体混合物体系的电流变液, 通

过改变施加的电场强度，可连续调节其软硬程度。软物质如拉伸橡皮，其恢复力是熵力所致，与拉伸弹簧的恢复力明显不同；又如双亲分子的界面作用与其他物质界面也有很大差别；而生命物质的活性也不能用普通物质的运动规律去理解等。

把超流和超导看成软物质类似颗粒物质的现象，我们联系三旋理论有一种方法，例如在类圈体上用经线和纬线画出网格，我们称这些网格为转座子。即把类圈体分成环段，环段上又分格，做成一种象魔方式的魔环器；当然这种网格是可大可小的，任取一网格或一点都能在类圈体上或随类圈体，绕过类圈体内中心圈线所构成圆面的圆心的轴旋转，或绕中心圈线旋转。在类圈体上，如果把这种“颗粒物质”类似的网格和点块称为转座子，这种转座子式的颗粒物质也既类似固体，流动时又像液体、气体，并且有结成群体效应的运动，以及它的网格图形的形状和摆布是有规律可循的。一般说来，作平凡线旋的网格是方形，作不平凡线旋的网格是菱形。如设转座子结成群体效应的运动以方形和菱形分别示意类圈体的两种转座子网格，如是方形，既能左右运动又能上下运动；如是菱形却不能，因为这种横竖运动会是尖对尖，两斜边同时都受到压力，无法整齐运动下去，只能作斜向运动。

但如果说方形的转座子图案一定作平凡线旋运动，菱形的转座子图案一定作不平凡线旋运动，那也不对。因为区别平凡线旋与不平凡线旋至关重要是环绕数，即斜向网格的连续边线至少是要绕环圈一周的封闭线。一般地说，方形网块的一边是平行于类圈体内中心圈线的摆布，就只能作平凡线旋，也能单独作面旋。菱形网块或方形是斜向摆布，是否是作不平凡线旋，就要检查是否有环绕数；但有一点是肯定的，它们不能单独作面旋，它的面旋是同线旋结合在一起的。

这种网格形状和摆布的锁定性，决定转座子运动是层面性的，这同超导电性不十分依赖于超导薄层间的三维耦合，表示出较明显的二维机理相联系。其次，如玩呼拉圈可以在身体上下运动一样，三旋图象还能说明这种严格的二维限制，对于电子对这样的小三旋圈，在有穿过平面的线旋流线的的作用且温度低到 T_c 或以下时，也能从一个平面层相干地通过约瑟夫逊效应隧穿到另一平面去，而对单个电子则不能。

根据上面对三旋转座子的最佳网络为方形或菱形的研究，寻找高温超导体首先应该注意层次斜方晶格一类的材料，因为它们接近于一种理想的宏观量子效应。如果电流是通过这种晶面，那么和外电路接通后，就构成了圈态，而在这段物质的电路上就易于形成不平凡线旋。

不平凡线旋已结合了面旋和线旋，这正是通过电和

磁的宏观量子现象显示出来的。其次体旋，粗略地讲是一种翻动，它和宏观的温度效应相连；温度越高，碰撞、翻动越大，这不利于电子对的贯注与配合协调。所以高温超导，从宏观来说，要选择不利于翻动的晶格。三角形网络在面旋、线旋上不如正方形运动有序已被排除在外，而正方形和其它正多边形相较，它的趋圆性最小，所以不易翻动，因此从三旋的宏观数理分析来看，层状斜方晶体对高温超导占据优势地位。

所谓“刚性”，是指应显示有平移的不变性。如果把超导、超流现象联系软物质，把单个的电子、氦原子看作“刚性”的粒子小球，超导、超流现象自然是个多原子体系。再说超流和超导都是一种相变，并且都是量子效应的一种宏观表现。如果我们再把超流和超导这两种相变联系两种社会图像，如把单个的士兵比作“刚性”粒子，那么一支部队在树林中的穿行，也许就类似电子流在超导体的晶格原子、分子中穿行；而一支队伍在大路上行进，也许就类似超流液体原子、分子在管子中行进。

再说 1954 年伦敦提出除了超流以外，唯一的另一种无耗散的流动，就是原子和分子系统中的轨道电子流；这是在一个稳定的原子中，每一个电子都占有一个定态，这种电子流式的超流是一种量子流，并且应有一个遍布整个系统的波函数。在朗道提出的超流唯象理论中，就曾假设在临界速度 V_c 下的整个液体有速度 V ，如作为量子液体，这其中隐含着系统的原子或分子由于相互作用而呈现的某种“刚性”，这种“刚性”也应体现有一整体的波函数。如此量子图像联系士兵队伍图像，而类比处于固体和理想流体之间的软物质，那么软物质具有的类似空间缩放对称的自组织行为、双亲分子的界面作用差别等特性，在超导、超流现象中也是可观测到的。

例如，把超导、超流中的单个的电子、氦原子看作量子，超导、超流作为一种类似空间缩放对称的自组织量子行为，本身类似一种宏观量子现象。这种量子图像在极低的温度下，就超流液体原子、分子在管子中的行进，如比作类似内接齿轮传动的唯象图像，流过的毛细管或狭缝，这里更多的是界面作用，这种界面作用和比外接齿轮传动，差别是很大的。例如，在极低的温度下因不同于高温，超流液体的原子、分子间有解耦的分离，又有解耦的缠结，而成为类似内接齿轮传动中的一些内啮合的行星轮，同时管子壁原子、分子间的解耦分离与缠结，而成为类似内接齿轮传动中不动的内啮合中心轮圈，那么类似内啮合的行星轮转动会沿着内啮合中心轮圈移动一样，只要超流液体的原子、分子存在自旋，也会沿管子壁行进，而且这种宏观量子现象不违反能量守恒定律。

因为原子、分子的自旋内禀运动是保持在能量守恒

定律之中的，只有原子、分子的外在运动才必须遵守能量守恒定律。这里包含了一种能隙因素的理论，并且是联系极低温度下的量子重组现象的。例如，等离子体据认为是宇宙中最普通的物质，它通常都是很热的，但美国科学家却制造出了“超冷”等离子体，所带电子温度只高于绝对零度一度左右。

由于理论认为衡量任何等离子体的关键指标之一是重组率，即离子与电子重组为中性原子的速度，它有三种主要的重组过程，其效率以一种已知的方式随着温度与密度变化，但扩张的“超冷”等离子体在密度非常低的情况下，重组速度却比料想的快得多；其速度之快，以至于现有理论也无法解释。又如，在硅材料上施加巨大压力后，简单的六方晶体变成结构致密的六方晶体硅，在足够低的温度下也可转变成超导体。

二、能隙和传统的超流与超导理论

从某种角度上说，超流和超导是一种类似违反能量守恒定律的现象。但如果把量子的内禀自旋，看成是能量守恒定律自带的运动，那么超流和超导就类似能隙间的能量守恒定律现象。而超流与超导理论的成功之一，也在于它的预言与检验，能否计算出能隙在哪里？能隙有几个？

正是在这些关键问题上，一些提出传统的超流与超导理论的科学家都做了贡献。

1、液 He-4 超流朗道理论解释

对液 He II 能够流过毛细管或狭缝而不呈现出任何粘滞性的这种性质的超流，实验发现如果用真空泵持续降低液 He-4 的蒸气压，使其温度降低，在 2.17K 将发生相变，在相变点附近比热有一尖峰，形状很象希腊字母 λ ，因此称为 λ 相变，2.17K 称为 λ 点，温度高于 λ 点，液 He 的性质是正常的，称为液 He I，温度低于 λ 点，称为液 He II，即 He-4 的超流相。为了解释超流，朗道猜测液 He-4 的准粒子谱中存在极小值，即液 He 中，相互作用的多原子体系是一个具有特定量子态和能量本征值的整体，低温时，只有低激发态的行为对系统有影响。

低激发态可看作是若干具有一定动量 p 和能量 $E(p)$ 的准粒子（或元激发）在物体内的运动，因而原子间的相互作用被归于准粒子的能谱 $E(p)$ ，相互作用多原子体系变为准粒子组成的理想气体。该预言被非弹性中子散射实验证实。即液 He 中有两种元激发，一种是声子元激发： $E(p)=cp$ ，这里 c 是声速，实验值为约 239m/s。另一种是旋子元激发： $E(p)=\Delta+(p-p_0)^2/2m^*$ ，这里 Δ 是能隙， m^* 是有效质量。根据朗道超流理论，当液 He-4 在毛细管中流动时，只要流速不超过临界速度，液体内部就不会产生新的元激发，即液体流速不会减慢，表现为粘滞系数为 0。

在朗道的 4He 超流唯象解释中，激发态的能隙起着

非常重要的作用，它是“刚性”的体现。电子-声子作用引起的电子有效吸引力提供了全部问题的动力学基础，而下一步是如何在这个基础上给出能隙。库珀于 1956 年在探索超导微观机理时，考虑了这样一个问题：一个被填满了的费米海，外加二个电子，电子间有吸引力，求电子系统的最小本征能量和相应的本征态。计算结果表明此时最小本征能量小于它们自由情况时最小本征能量，即二个电子形成了某种束缚态。

相对于这个束缚态来说，原先自由的情况正是一种激发态，或者说破坏这个电子对，产生了系统的元激发，二者的能量差正提供了能隙。

而这个束缚的本征态是一对动量 k 、自旋方向 s 和动量 $-k$ 、自旋方向 $-s$ 的电子。这样的一对电子，人们称之为库珀对。早在 1950 年，弗劳里希已证明电子和声子的耦合能使费米面附近的电子间产生一种有效的吸引力。当电子(费米面附近的电子)行经可以极化的晶格点阵，引起点阵形变，也就是与声子耦合了，声子追随电子运动(如果电子的运动频率不是太高)，同时声子又影响随后的费米面附近的电子，致使电子之间产生了有效的吸引力。弗劳里希的工作没有考虑实际存在的电子间的斥力。1955 年巴丁和派因斯提出了包含库仑斥力在内的完整哈密顿量，并证明了在一定条件下，吸引力可以超过排斥力。

声子在低温超导中起作用的实验支持来自于 1950 年的同位素效应，在纯的同一金属的不同同位素的超导体中，测量超导转变温度 T_c ，发现 T_c 反比于同位素质量 M 的平方根。这表明电子-声子相互作用在低温超导中扮演着一定的角色。由于库珀所考虑的二个电子和全部已填满了的费米海，在此二体的问题中，既然二个外加电子会配对形成能量上有利的束缚态；那末费米面内费米面附近的电子也能被激发至费米面外，配对并形成能量上有利的束缚态，这一来，整个费米面就不稳定了，应该考虑在费米面附近二边能量相当于最大声子能量，即所谓德拜能量间隔内的多电子系统。

1957 年巴丁、库珀和施里弗在库珀的二体问题的基础上，考虑多电子系统的问题，终于提出了一个成功的、解释超导微观机理的理论，即著名的 BCS 理论。在这个理论中，系统的哈密顿量由两部分组成。一部分描写电子的自由运动，另一部分描写使电子配成库珀对的相互作用。超导态的电子系统从某种意义上说是一个开放系统，它只是费米面附近一部分电子，由于电子对数不固定，或说电子数不定，超导基态应是由无配对电子与有一个任意可能的库珀对的状态的叠加而成的态。

2、1972 年奥舍罗夫 (Osheroff) 等发现在液 He-3 溶解曲线(固相和液相分界线)上，在 2.6mk 和 2.0mk 处有两个相变点，新出来的相是液 He-3 的超流相。

相图显示：在 34 个大气压以上 He-3 处于固相；低于 34 个大气压处于液相，液相又可分为正常相、超流 A 相和 B 相。正常相到 A 相或 B 相的转变是二级相变，A 相到 B 相的转变是一级相变。

He-3 原子的电子总自旋为 0，核自旋为 1/2，是费米子。因此无法用液 He-4 超流理论解释液 He-3 超流，但液 He-3 正常相可以用费米液体理论解释，这启发理论家用超导电性的 BCS 理论解释液 He-3 超流。即在液 He-3 费米面附近具有相等相反动量 He-3 原子，通过液 He-3 的自旋极化，可在粒子之间产生吸引的有效相互作用，形成配对，超流部分对应的就是这些束缚配对。但与 BCS 电子配对不同的是：由于原子间存在强的近距排斥作用，构成束缚对的两粒子相对轨道运动处在非零的 $l=1$ 态，能量才是有利的，为保证费米子波函数交换反对称，自旋部分波函数必须是对称的，即自旋是平行配对（BCS 是自旋反平行配对）的。配对后的 He-3 原子在费米面上形成能隙 Δ （该能隙可是各向异性的），如果要拆散这一配对则需 2Δ 的能量。假设所有束缚对都以相同质心速度定向运动，则在低温下束缚对很难被破坏掉，即表现为粘滞系数为 0。

3、沿着这个方向，今天已发展起一整套的计算方法，借助于计算机，人们已能得到与实验几乎一致的结果，然而即使如此，对 ^4He 在物理上的理解还是不完全清楚的。甚至对旋子的理解还没有一致的看法。朗道唯象理论中的 V_c 判据只是一个必要条件， ^4He 的元激发谱中除了声子外还可能有超流的湍流等。而在整个宇宙中，氦几乎占有三分之一的比例，它在天体的演化中扮演着重要的角色。在成功的唯象理论中的假设或猜测部分，正是未来的微观理论所要澄清的，人们不能期望猜测的理由中没有错误。例如众所周知的玻尔原子模型，甚至根本没有给出任何理由就假设存在一系列的定态，然而这丝毫不损害玻尔模型的成功。

应该说对超流现象的认识，极大地帮助了人们对超导现象的认识。与许多物理现象的理解过程一样，对超导现象的理解经历了一个从唯象理论到微观理论的过程。例如超导现象是一个相变的结果，要理解这一点，在唯象的层次上必须研究超导的热力学，即超导态是比正常态更有序的态，因为它的熵比后者小；其次，在无外磁场时，正常态到超导态的转变是二阶相变，因为在 T_c 处熵连续而比热跃变；另外，在超导态电子能谱上有量级为 Δ 的能隙。此外，实验还证明在 T_c 相变前后晶格结构无变化，声子对热力学有关量的贡献也一样，这说明是系统中电子发生了某种有序化的变化。

基于有序的想法，1934 年高特和卡斯米厄提出了超导相的二流体唯象理论。在此理论中 T_c 以下超导态中的电子被分为二部分，一部分为超导电子，指

凝聚的部分，另一部分为正常电子，指未凝聚的部分。二流体唯象理论成功地解释了超导体的热力学性质。为解释超导的电磁现象，即零电阻和迈斯纳效应，弗·伦敦和海·伦敦兄弟于 1935 年在二流体唯象理论的基础上，提出超导电子的电流场方程组。按伦敦方程超导电流密度的变化率与电场强度成正比，只要电场强度不为零，超导电流就会越来越大，这表明超导电子只受电场作用而无阻力；无阻力当然就是零电阻了。伦敦方程组中的另一个方程，反映了一个超导电流的回路会有一个反向的磁通量，迈斯纳效应正是由此而产生的。超导电流作为总电流的一部分，按照安培定律应该有正向的磁通量，而上述反向磁通恰好抵消了这正向磁通以至有迈斯纳效应。

伦敦的理论实质上还是二流体唯象理论，只不过加上了电磁场而已。1950 年金兹堡和朗道提出的量子唯象理论比伦敦理论前进了一步。由金兹堡-朗道方程类似可以证明在超导体内磁场为零（迈斯纳效应），同时给出了超导体的表面层电流密度与磁场的关系。金兹堡-朗道理论还告诉出现超导的根本原因，在于超导态的序参量有所谓的“刚性”，它导致超导态的激发态与基态之间有能隙存在。这个理论的另一个重要预言是磁通的量子化。考虑一个超导环在 $T > T_c$ ，即环在正常态时置于磁场中，然后使 T 降至 T_c ，环中的电子从正常态转为超导态，此时超导电流的走向所对应的磁场，正好抵消外磁场以保证超导体内无磁场-迈斯纳效应。金兹堡和朗道的理论还对穿透深度 $\lambda(T)$ 和相干长度 $\xi(T)$ 给出了重要预言，对它们的物理含义作深入研究导致了第 II 类超导体的理论预言。

三、环量子三旋与超导超流理论

我国三旋环量子理论联系超导环，首先是环量子存在于微观物质。例如当代超弦理论终于承认，所有基本粒子如电子、夸克等，都是一维延展体，而不是传统物理中所假设的点状体，它们或呈环状或呈线状，始终振动着、碰撞着；振动和碰撞的不同形式则决定了弦的性质，诸如电荷性和自旋性等，亦即决定了该弦所对应的的基本粒子。

内禀三旋属于微观的量子现象，在粒子的质量与粒子的旋转矩之间存在着很深刻和有机的联系。例如，一种典型的三旋图象是，体旋对应温度，面旋对应电流，线旋对应磁场。进一步利用三旋图象认识从低温到高温、从无机到有机的超导材料晶格形态及转换的统一机制，载流子对（电子对或空穴对）其本质是一种小三旋圈，而导致载流子配对的是晶格中的大三旋圈。这类似玩飞圈的游戏，飞圈飞出去又飞回，要有自旋和抛掷力。电子对实际是形成的小三旋圈，而声子是产生它并抛掷它的原动力---这是低温超导的情况。高温超导的情况要复杂得多，

是否由别的什么因素导致电子成对，形成了目前的许多新的理论发展方向。

如软声子模型中的“呼吸”图象，就是一种典型的孤立线旋：晶格中铜原子周围的氧原子有规律地进出，随着温度下降，“呼吸”变得缓和，在一定温度下振荡就停止了；由此产生的“冻结”的声子使电子发生了强烈耦合，从而呈现较高的转变温度。又如激子模型，激子是电子进入一个较高能态而造成的空穴圈，然后又运动回到低能态，即电子将邻近电子排斥开而产生一种“极化云”圈，第二个电子由于极化云圈而降低能量并与第一个电子形成电子对。有的还设想“磁振子”的虚粒子导致电子相吸；有的又设想以反铁磁自旋涨落为基础发生的电子强耦合；甚至有的设想一对费米子和一对玻色子，它们各自分开的两个半子也可以形成一个玻色子，其性质介于费米子与玻色子之间，这些半子在特定条件下可以产生玻色凝聚圈，从而出现超导电性等。然而三旋图象都能与之相沟通，并对诸多超导难题能给出完整而自然的阐释。三旋从唯象上说是一种两群缔合结构，即它包含类圈结构 (ψ) 和自旋结构 (Ω)

$$\Psi = \Omega \psi \quad (3.1)$$

由于环面与球面不同伦，应对自旋作物理的语义学规定。自旋：有固定的转轴或转点，能同时组织旋转面，并能在旋转面内找到同时对称的动点且轨迹重叠的旋转；自转：有固定的转轴或转点，但不能同时组织旋转面，也不能找到同时对称的动点或有对称动点轨迹也不重叠的旋转；转动：可以没有固定的转轴或转点，不能同时组织旋转面，也没有同时对称的动点，但轨迹是封闭线的旋转。

自旋定义对于类圈体结构应有三种自旋，面旋：类圈体绕垂直于圈面的轴的旋转；体旋：类圈体绕圈面内的轴的旋转；线旋：类圈体绕体内中心圈线的旋转。三旋图象给出了“整体与部分不同伦”又一新证明，并对当代整体论不作环面与球面的几何区分提出了挑战。

由于三旋至少存在两个以上对称运动且方向相反的动点，这同两个动量相同且自旋相反的电子相互吸引，形成束缚电子对做整体运动相似。然而这种电子对运动还只是一种小三旋圈，是形成超导的必要条件，还不是充分条件。从电磁波的吸收实验证明，超导体的电子能谱具有能隙，按照 BCS 理论，其超导基态可表示成哈密顿函数。在高温超导中，安德森认为，电子的结构不是由于吸引而是由于它们被其它电子推动到一起形成了超导；他从具有排斥作用的有限势的 Hubbard 铁磁模型的哈密顿函数出发，最后求得了与 BCS 理论很相似的超导能隙方程。

我们知道：当外部磁场以称为通量线的一条条线束的形式穿透超导体时，就可能出现电阻。由于通量线是由一些电流旋涡组成，所以经常将通量线称为

涡旋。在三旋中，涡旋属于线旋，因此弄清这些线旋在各种各样温度和磁场条件下如何运动和如何自动排列起来的过程，对于控制这种现象和保持超导电流动状态来说将是极其重要的。实际上科学家们已经发现这些线旋在高温超导体内能形成一些奇异的新型物相，不得不放弃原先所持的看法并根据凝聚态物质物理学的一些现代概念作出一些新的假说。三旋图象可说是首先开河。

在高密度和低温条件下，类圈体的三旋行为将出现简并规则，即遵循支付选择规则、排序规则和传递规则。因为千差万别的三旋类圈体汇聚组成晶格这种集体，个体要选择集体的三旋，集体也要选择个体的三旋。在有的结晶情况，三旋离开了正常情形下的类圈体轨道，被“压”到一块儿，成了所谓的宏观类圈体，即原来的类圈体则成了宏观三旋场效应上的转座子。这种状态称为三旋简并。这时与晶体高密度相关的三旋“简并压力”非常大，大得足以抵抗核力的收缩压力；而且结晶到了最后由于核力超过晶格内部原子、分子运动产生的辐射压力，晶体被压缩而变小，晶体物质处于强三旋简并态。由于这时物质类圈体相距越来越远，因而根据泡利不相容原理类圈体间将产生一种排斥力与核力相抗衡，在一定的条件下，它们处于平衡状态，形成有序的规则晶体。

这一般是一元系或比较纯的物质的情况。如果考虑是多元系或有化学杂质和缺陷存在的情况，当晶体由于收缩而变得足够密时，不相容原理造成的排斥力不一定能抗衡核力，这时有一个临界温度决定超导的温度。如果晶体的结构不同于这种临界的结构，晶格的宏观三旋场效应将大于排斥力，物体将在这种临界温度之上继续产生超导。

这里，高温超导晶格形态的机制是，根据前面对三旋转座子的最佳网格为方形或棱形的研究，我们认为寻找高温超导首先应该注意层状斜方晶格一类的材料。但这并不排除其它形状的晶格，如棱锥八面体。其次大家知道，金属的蚀刻表面典型地显示出许多晶粒互相堆集在一起的杂乱无章的景象，但为什么又并不妨碍金属导电呢？这是因为金属导电，是由金属体内自由电子定向运动的结果；自由电子定向运动时，不时和处在晶格上的正离子相互作用而产生碰撞，而自由电子又要受到晶格散射作用的阻碍，从而产生了电阻；当温度降低到临界温度以下时，电子间的间接作用力克服了库仑排斥力，使动量和自旋方向相反的两个电子结成了库柏电子对圈，这便于物体转变到超导态。

而晶粒是晶体生长的自然结果。每颗晶粒都是一个单独的、有序排列的原子组成的晶体，当金属凝固时，在液体内部形成的许多细微的晶体开始生长，直至每一晶体挤撞到它的邻近晶体为止。物理的作

用力与几何的填充空间要求的错综复杂的相互作用,才确定了最终的晶粒界面。这是另一起的宏观量子现象,如果把晶粒看成一个量子类圈体,温度降低,不但表现为体旋减弱,而且圈体的辐振也减弱。实际在低温下金属的晶格也会变化,例如白锡遇超冷即变成粉末状的灰锡。类圈体的体旋减弱,也减少了对自由电子运动的阻力。

四、超导和超流的量子力学再探讨

我们知道, 超导体顾名思义就是通电流后没有能量耗散的导体,它是由于大量配对电子凝结到一个“步调一致”的相干态后,其运动不受晶格散射的结果。超导和超流与软物质的运动规律及行为是不同的,如软物质不存在貌似违反能量守恒定律的能隙现象,其主要运动规律和行为不是由量子力学和相对论的基本原理直接导出,而目前传统的超导和超流理论是遵守量子力学和相对论原理的。由于三旋理论的环量子自旋与量子力学传统的自旋理解有区别的,被有人认为是:“在宏观领域有点道理,在相对论与量子论中的推广非常可疑”。也有人认为这本身是三旋理论不是由量子力学和相对论的基本原理直接导出的。即三旋理论从微单元量子环的内禀自旋到宏观量子现象的动力学环量子自旋,是取以与我们平时看到的宏观物体及软物质的自旋相似。

其实对量子力学传统自旋的理解,目前已不统一不是秘密。例如,美国科学家一项跟踪亚原子粒子---介子细微运动的实验,研究了40亿个带负电荷的旋转介子后发现,介子这种与电子同类但比电子重的带电粒子,在真空室的强大磁场中会像陀螺一样旋转。这是量子力学标准模型以外非常有趣的新物理学迹象,与尘埃微粒一样,介子碰到其他粒子后会改变旋转方式。这项试验的第一步是,交替缓变同步加速器射出的质子轰击一个镍靶,喷射出粒子雾,其中的一些粒子衰变成发生极化的介子,它们全都像小陀螺一样自旋,并排列成行。

这些介子被引入一个直径50英尺、由超导磁体构成的粒子轨道,以接近光速的速度大约每1490亿分之一秒绕轨道运行一圈;与此同时,介子像在强大磁场运动的陀螺一样抖动。又如,二硼化镁(MgB_2)的结构属六方晶系,在两个硼原子层之间有一个镁原子层。研究表明,二硼化镁的硼原子层在39K左右表现出超导特性,是简单金属间化合物中最高的。但直到最近,大多数科学家还相信在传统的BCS理论中,不可能存在临界温度高于30K的简单稳定的金属间化合物。

然而二硼化镁超导体的发现改变了这一状况,它迫使人们重新考虑在BCS理论的框架内,是否存在更高临界温度的超导体。这包含有对量子力学传统的自旋理解的冲击。理论计算表明,在二硼化镁中不只一个能带跨越费米面,而且电声耦合所造成的

费米面失稳完全可能在两个能带的费米面处产生能隙,这一点是二硼化镁超导体与传统超导体非常不同之处。有关两个能隙的图像已被比热、核磁共振、电子隧道谱和角分辨光电子谱的实验广泛证实。

有关两个能隙是如何形成的以及它如何影响超导特性,根据BCS理论,在超导态金属中,电子相互吸引形成电子对,电子对作为一个整体流动产生超导电流;由于拆开电子对需要一定的能量,因此超导体中激发态和基态之间存在能量差,即能隙。日本科学家科学家用高能紫外线照射二硼化镁晶体,将超导电子对从中分离出来,然后用“角度分解光电子分光”的方法观察它的能量状态,发现硼原子层中 σ 电子做二维运动, π 电子则按垂直于这个面的方向运动。 σ 电子的能隙比 π 电子大3-4倍。这样的超导能隙是其它金属超导体和氧化物超导体所没有的,这对二硼化镁的超导电性起到了决定性的作用。

1、量子力学传统的自旋理解的来历

量子力学是继牛顿力学、麦克斯韦电动力学和相对论之后形成的物理学理论框架。如果按照研究的对象近似划分,牛顿力学对应宏观低速世界;狭义相对论对应宏观高速世界;量子力学是微观低速世界。

沿着这条路走下去,只有对应微观高速世界的理论才能恰如其分地反映物质世界的本质。物理学家们尝试将薛定谔方程纳入狭义相对论的四维洛伦兹变换,这时狄拉克写出了著名的狄拉克方程;在此之前,曾经有一个直接将薛定谔方程套用洛伦兹变换四维矢量的克来因-高登方程,同时泡利也提出了一个类似的方程,然而它们解释例如自旋等电子现象时却存在不可克服的困难,狄拉克方程的出现,给了相对论框架下一个比较另人满意的电子波函数演化方程。

在这个方程中,电子的1/2自旋成为了必然的相对论要求。但狄拉克方程却遇到“负能解”。众所周知,自然界能量都是正的,负能量解意味着什么?狄拉克1930年提出了“正电子”的概念,即负能量解意味着与电子电荷相反的反粒子的存在。由于泡利不相容原理,世界的负能级全部被电子所填满,即整个世界的背景是一个充满负能级电子的“负能量海”。余下的电子分布在正能级区域。当负能量海中一个电子吸收了 $2mc^2$ 能量的光子后,便跃迁到正能量区域,成为一个质量为 m 的电子,同时在负能量海中留下了一个“空穴”。这个“空穴”在负电的负能量海中,自然能显示出正电荷及正能量的特性,并且会同一个质量为 m 的电子复合,放出 $2mc^2$ 能量的光子。1932年美国物理学家安德森在宇宙线实验中观察到高能光子穿过重原子核附近时,可以转化为一个电子和一个质量与电子相同但带有的是单位正电荷的粒子,从而发现了正电子。

狄拉克解释遇到前所未有的困难是随着各种反粒

子的陆续出现,对于自旋为半整数倍的费米子,由于泡利不相容原理存在,负能量海的解释勉强说得过去,然而对于自旋为整数倍的玻色子来说,由于不遵守泡利不相容原理,负能量海存在就意味着所有的玻色子都要无限制地跌入负能级之中。这时年轻的物理学家费曼提出了一个类似“点内空间”的惊人观点:根据时间和能量相对应的关系,反粒子就是“时间向后走的粒子”或者可以说是逆着粒子的时间运动的粒子。

从时间流逝的方向来看,这个粒子与来自 (x_0, t_0) 的粒子接触并双双消失,留下能量为 $2m c^2$ 的光子;这个过程正是正反粒子对产生与湮灭的过程。费曼的解释不但躲开了狄拉克的负能量海,而且成功说明了正反粒子对为何具有相同质量,并且必须成对出现的原因。而且费曼独创的路径积分方法,是区别与海森堡矩阵力学和薛定谔波动力学的量子力学第三种表述方式,也许比上两种表述更接近于量子世界的本质。

路径积分方法中起核心作用的传播子,正能状态沿时间运动的形式便等价于负能状态逆时间运动。在此基础上由费曼和施温格等人一起创立的量子电动力学,成为了量子场论最早而且最精确的理论,它所取得的巨大成就让人不得不确信费曼对反粒子解释的合理性。

2、“点内空间”的概念

按照费曼的说法,反物质是在一个参考系中,能看到的某个逆着时间运动着的粒子,而这个粒子的波函数已经跑到光锥之外,我们称之为点内空间,它此时正是“点内空间”所谓超光速运动的“快子”。由于光子本身没有时间流逝,也就是说,在这个极限的两侧“点外空间”和“点内空间”分别存在着时间流逝方向相反的粒子;所谓“有静质量的粒子超光速”就是此时速度恰恰和从前一样,只是时间和空间的反号是表示在“点内空间”。那么自然界中,带正电荷的基本粒子与带负电荷的基本粒子有没有可能时间流逝恰恰相反?如果时间如同空间的一个维度一样,也是有着两个方向的一维坐标,那么时间究竟是什么?

这里只讲引进的“点内空间”的概念。把正电子当成是进入“点内空间”,也就是当成逆着时间方向运动的电子。也就是说沿着时间方向看 t_2 时刻一个电子正在运动,在远处 x_2 位置突然出现了一对正负电子对;之后就是原来 t_1 时刻的电子与新产生的正电子湮灭,而新产生的那个电子则继续朝向 (x_3, t_3) 运动,这样的话新产生的电子可以看做原电子的未来。如果把“点内空间”当成是能隙因素,把这整个过程当成一个电子被能隙两次散射的话,这看起来就是该电子在能隙“点内空间” t_2 时刻完成了一个超时空的跳跃,然后 t_1 时刻本体才消亡。

沿时间流逝方向看这种能隙因素“瞬间移动”肯定是超过光速了。但能隙因素“点内空间”也不是连续运动。即正电子意外着有一个和我们现在所处的世界(点外空间)相反的能隙反世界的存在(点内空间)。如果我们是在这面努力突破能隙因素这层世界(点外空间),那边的能隙因素世界(点内空间)也会正努力在突破。

目前还没有观测到反宇宙的点外空间存在,就是证明。而能隙因素“点内空间”的反物质,在高能物理实验室中却常观测到。而且反物质理论上,采用能隙因素的“点内空间”概念并没有否认它的存在。

准确地说,反物质并没有超越光速“举动”的能隙,并且反物质还是人类直面时空本质的能隙因素窗口。用世界线来描述该粒子运动的话,它从 t_1 运动到 t_2 那一段位于光锥之外,是“类空”(点内空间)的能隙路径,传统意义上可以认为这个类空粒子(点内空间)跳跃能隙过程是超光速运动,它也就跟波函数全空间的非定域性直接相关了。

这种能隙因素类似传统意义很多科学家看到的,一些粒子在跨越势垒(点内空间)时“表现”出的超光速运动现象,对这些粒子在势垒中的“经历”,这里可猜测波函数的全空间并非空间的本质,更非时间的本质,即量子理论揭示的不仅是时空的本质,而且揭示的是数学的本质---自然存在正、负、实、虚、零的五元数,这个规律贯穿整个宏观与微观世界,强制赋予空间、时间和人类的一种五元数属性。理论物理学的发展就一直在沿着这条统一的道路前进,也许这就是“终极理论”或“万能理论”的答案。若承认智慧生物是宇宙这个统一体的一部分,就没理由怀疑智慧生物的大脑没有能力恰如其分地将这个五元数规律反映出来。

3、以量子场论为例

1831年法拉第探测到,磁场的突然改变会产生电流;同时,法拉第设想电力起因于力线,而力线发源于荷电物体,并充斥于荷电物体之间的空间。紧接着这种见解随之出现关于电磁场的现代观念。而场的概念是物理学最基本的概念,法拉第开始时只是把电磁场与荷电物体联系在一起,但不久他便意识到,电磁场也可以独立存在,光也不外乎是一种电磁现象。可是法拉第未根据其相当直觉的观念成功地建立完备的理论,直到1861年麦克斯韦才系统地阐述了关于电磁现象的正确理论。

该理论甚至在相对论和量子力学问世之后,这些方程还基本上保留了原先的形式。其实法拉第设想的磁场力线是环量子线旋的宏观量子现象,也是环量子线旋能隙因素的宏观量子现象图解。而麦克斯韦方程组正是继法拉第描绘了从星系范围到原子核再到微单元的一切类似电磁的线旋环量子及能隙因素现象。量子场论中通常用称为耦合常数的强度参量

表示相互作用的强度，实际也就是环量子线旋集群的耦合强度。

强作用力是接近微单元环量子线旋耦合在短距离内最强的耦合，它也就成了是自然界四种基本力中最强的耦合。如果把两个质子间的环量子线旋耦合强度定为1，类似作为短距离单位，那么，其电磁相互作用间的环量子线旋耦合强度约为 10^{-2} ，弱作用力间的环量子线旋耦合强度约为 10^{-5} ，而引力间的环量子线旋耦合强度简直是微不足道，实际强度只有 10^{-38} 。这说明随着距离的增大，环量子线旋耦合线上参加的环量子线旋耦合逐渐减少了一些，这与宏观耦合断裂常识是相符合的。

4、对称性和规范场

几何对称性可理解为一种运动，通过这种运动，图案或物体形状可保持不变。物理理论也具有类似的对称性，但在物理理论中，经过变换后保持不变的不是图案或物体形状，而是该理论本身的数学形式。例如，质子和中子的强相互作用有相同的数学形式，这也是内禀的环量子三旋有相同的数学形式。环量子三旋中的对称性与20世纪以来科学家公认对称性，在对自然界的认识中起着极为重要的作用是一致的。

而物理学中存在两类性质很不相同的对称性：整体对称性和局部对称性。环量子整体对称性听起来好像是较大的概念，可环量子局部对称性在理论上却蕴含着更严格的要求，更深刻地揭示了自然界的统一性。环量子整体对称性向局部对称性过渡后就能描绘电磁力的起源，并且有理由猜测其他的力也产生于环量子局部对称性。用自旋的语言来说，群论是一种分数自旋；而用群论的语言来说，环量子线旋电磁力起源于U(1)局部对称性，弱力起源于SU(2)局部对称性，而强力起源于SU(3)局部对称性。U(1)是阿贝尔群，SU(2)和SU(3)都属于非阿贝尔群。

环量子线旋整体对称性是对空间中一切点施以相同变换的一种对称性，而在环量子线旋局部对称性中空间每一点都可独立变换。在量子场论中，球量子拓扑类型荷电粒子的场描述，这种场在时空中的每一点都有两个参数：场的振幅和相位。振幅度量在某一点粒子出现的概率，相位描述粒子的波动性。在场中所有点的位移都相同时，像一组球量子荷电粒子的总能量那样的可观察量就保持不变，于是，场在相位变换时就具有整体对称性。局部对称性要求当相位在每一点都可独立变化时，可观察量仍不变。要满足局部对称性，就必须引进作为规范场的电磁场，这种场的球量子就是产生电磁力的光子。如果仅要求相位的整体对称性的话，带球量子类电粒子之间就没有电磁力，没有光子，也就没有光。

5、量子色动力学中的球量子 and 环量子

球量子色动力学中，有效色荷受两种竞争性的效应支配。一种是与球量子电动力学相类似的屏蔽效应，

即真空极化现象，球量子色动力学的真空充满了不断出现而又迅速消逝的虚夸克-反夸克对。如果一个实在夸克放在真空中，则带相反色荷的虚粒子就会被吸引，而带相同色荷的虚粒子则被排斥，因而该夸克的色荷就被包围在一层异性色荷中，这样有效色荷就随距离的增大而减小。但是，这种极化真空中的夸克本身也不断发射和吸收球量子胶子，从而改变自己的色。

带色球量子胶子能传播到相当远的距离，实际上它们是将自己散布到整个空间，从而掩饰了作为色荷源的球量子夸克。以球量子夸克为中心的某一任意空间区域越小，该区域中所包含的该球量子夸克的色荷便越少。于是当带不同色的另一夸克趋近这夸克时，它所“感受”到的色荷便越来越少。仅在较大距离上，色荷的全部作用才能充分表现出来。但对环量子色动力学来说，环量子线旋耦合强度与活动空间是一种自然的屏蔽效应，它联系着“点内空间”能隙因素也是一种自然的真空极化现象。

当采用球量子 and 环量子的量子力学的观点来研究奇点理论时，以霍金为首的科学家们加入了虚时间（用数学中的虚数计量的时间）的概念。虚时间是基于费因曼的“对历史求和”原理。所谓“对历史求和”是指球量子 and 环量子粒子可以沿着任何时空中的任何路径前进。该原理是从“测不准原理”推导出来的，虚时间揭示的是，如果是球量子拓扑类型。时空从一个奇点（例如“大爆炸”）开始向前发展，那么它将沿着任何可能的路径延伸，结果时空将形成一个封闭的曲面（例如球面）。

时空将如同我们的地球一样，当宇宙膨胀的最大尺度就是“时空赤道”，而大爆炸和大挤压是“时空北极”和“时空南极”，这就形成了一个有限但无界的曲面。它们如同地球的南北极一样，虽然纬度为零，但比起地球上的其它点来说并没有任何奇异之处。但如果是环量子拓扑类型，就不用针对奇点提出新的理论，因为量子力学中没有任何奇点。

在虚时间中，奇点在“点内空间”处消失了。虽然这些物质回到能隙因素的“点内空间”区域，其形态已经完全不同，甚至其粒子的种类也大相径庭，唯一相同的是它们的质量和能量，但大爆炸和黑洞的周而复始，不是实的连续统宇宙的循环往复，也不是虚的连续统宇宙的循环往复。

参考文献

- [1]陈超，量子引力研究简史，环球科学，2012年 第7期；
- [2]平角，学自然学科学与振兴双循环，Academ Arena, January25, 2021；
- [3]王德奎，三旋理论初探，四川科学技术出版社，2002年5月；
- [4]孔少峰、王德奎，求衡论----庞加莱猜想应用，

四川科学技术出版社，2007年9月；

[4]王德奎、林艺彬、孙双喜，中医药多体自然叩问，
独家出版社，2020年1月；

[5]王德奎，解读《时间简史》，天津古籍出版社，
2003年9月；

[6]【英】罗杰·彭罗斯，新物理狂想曲，湖南科技
出版社，李泳译，2021年2月；

[7]王德奎，人类命运共同体全球化要讲大历史才行
----人类起源/文明三大孵抱期及五大芯片初探，
Academ Arena, December 25,2021。

8/22/2022