

2003 年度诺贝尔物理学奖漫谈*

阎 守 胜[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

摘 要 简要介绍了奖金获得者 Alexei A Abrikosov, Vitaly L Ginzburg 和 Anthony J Leggett 在超导体和超流体理论方面开拓性的贡献. 特别着重于他们所发展的理论的背景和重要性. 文章还简要谈及 2003 年度诺贝尔物理学奖给我们带来的启示.

关键词 2003 年度诺贝尔物理学奖, 超导体, 超流体

On the 2003 Nobel prize in physics

YAN Shou-Sheng[†]

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids by Nobel laureates Alexei A Abrikosov, Vitaly L Ginzburg and Anthony J Leggett are briefly reviewed. Special attention is paid to the background and importance of the theories they developed. The inspiration that the 2003 Prize offers us is also briefly considered.

Key words 2003 Nobel prize in physics, superconductor, superfluid

2003 年 10 月 7 日, 瑞典皇家科学院宣布了 2003 年度诺贝尔物理学奖的归属. 由于在超导体和超流体理论方面开拓性的贡献, 物理学奖授予 Alexei A Abrikosov, Vitaly L Ginzburg 和 Anthony J Leggett 三人. Abrikosov 1928 年生于莫斯科, 目前是美国阿贡国家

实验室的著名科学家, Ginzberg 1916 年生于莫斯科, 曾是莫斯科列别捷夫物理研究所理论室的主任. 三人中 Leggett 最年轻, 1938 年生于英国伦敦, 现为美国 Illinois 大学 Urbana-Champaign 分校物理系教授. 本文将就他们获奖的工作做简短的评述.

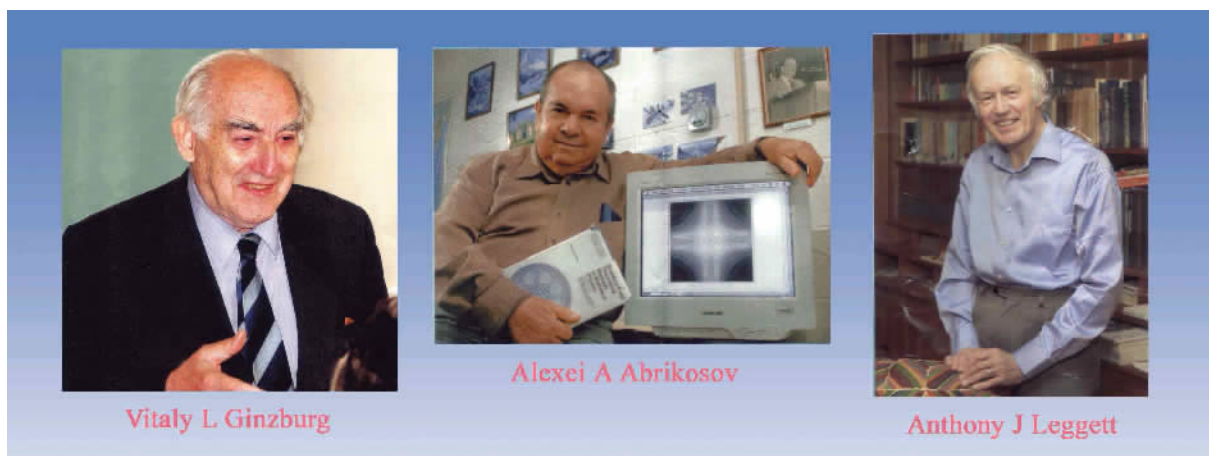


图 1 2003 年诺贝尔物理学奖获得者

* 2003-12-10 收到

[†] E-mail: ssyan@pku.edu.cn

1 Ginzburg 和 Abrikosov 获奖的工作

自从 1911 年 Heike Kamerlingh Onnes 在液氮温度下测量金属汞的电阻时发现超导电性以来,有三个问题一直是物理学家关注的. 第一个是超导电性的物理机制,为什么有些金属和合金当温度低到一定程度后电阻就消失了? 第二个问题涉及超导体的实际应用. 人们希望借助于超导体电阻 $R=0$ 的特性,用超导螺线管产生强磁场,可惜的是,长期以来,使超导电性消失的临界电流密度 J_c 和临界磁场 H_c 都很低,无法使用,背后的物理问题为人们所关注. 第三个问题是如何提高超导转变温度 T_c ,提高到液体氮温度(77K)以上,最好能到室温,这是人们一直追求的目标.

第一个问题的解决并不容易,从超导电性的发现到对其机制的了解经历了近五十年,直到 1957 年 Bardeen J, Cooper L 和 Schrieffer R 提出 BCS 理论之后,这一谜团才得以解开. 人们认识到超导相的出现是费米面附近动量、自旋相等相反的电子在电子-声子相互作用下形成库珀对,库珀对作为复合玻色子发生玻色凝聚的结果. 由于这一工作,他们三人获得了 1972 年的诺贝尔物理学奖. 第三个问题在 1986 年 Bednorz J G 和 Müller K A 报道 La-Ba-Cu-O 系氧化物的超导转变温度可能达到 35K 后,有了突破性的进展,在世界范围内掀起了探索高温超导体的热潮,他们两位也因此获得了 1987 年度的诺贝尔物理学奖. Abrikosov 和 Ginzburg 的工作大大地加深了人们对超导电性的认识,主要涉及第二个问题,是超导电性应用,特别是强电(大电流)应用的理论基础.

Ginzburg 获奖的工作是 1950 年(当时他 34 岁)和 Landau 一起发表的 Ginzburg - Landau (GL) 理论,这是对超导电性作唯象描述的理论,其基础是 1937 年发表的著名的 Landau 二级相变理论.

在 Landau 的二级相变理论中,他引进了“序参量”(order parameter)来描述从无序相到有序相的转变,在无序相中序参量为零,在有序相中序参量有非零值. 例如,对于从原子磁矩无规取向的顺磁相到有序排列的铁磁相的二级相变,序参量可取为自发磁化强度. 对于从正常态到超导态的二级相变,GL 理论建议取超导电子的有效波函数,今天称之为超导凝聚体(superconducting condensate)的宏观波函数的 $\psi(\mathbf{r})$ 作为序参量,超导电子的局域密度 $n_s(\mathbf{r})$ 由 $|\psi(\mathbf{r})|^2$ 给出. 对于均匀的超导体,如 $\psi(\mathbf{r})$ 与 r 无

关,按照 Landau 二级相变理论,在 T_c 附近,超导体的自由能密度可按小量 $|\psi|^2$ 展开,即

$$f_s = f_n + \alpha |\psi|^2 + (\beta/2) |\psi|^4 + \dots, \quad (1)$$

这里下标 s 和 n 分别表示超导相和正常相. α 和 β 是与温度有关的唯象参数. 从自由能极小,可以得到对于稳定的超导相的存在, β 应为正的常数, $\alpha = \alpha_0(T - T_c)$.

GL 方程的目的是描述在有外磁场或电流存在时的超导体,此时必须考虑序参量的空间变化,同时在(1)式右边还要附加超导电子在磁场中运动的动能项,以及磁场能项. GL 自由能展开式为

$$f_s = f_n + \alpha(T) |\psi(\mathbf{r})|^2 + \frac{1}{2} \beta(T) |\psi(\mathbf{r})|^4 + \frac{1}{2m^*} |(-i\hbar \nabla - e^* \mathbf{A})\psi(\mathbf{r})|^2 + \frac{1}{2\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A})^2, \quad (2)$$

其中 m^* 和 e^* 分别是超导电子的有效质量和电荷, \mathbf{A} 是与磁场相关的矢势 $\mathbf{H} = [\nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r})]/\mu_0$, μ_0 是真空磁导率. 系统总的自由能为

$$F_s = \int f_s d\mathbf{r}. \quad (3)$$

热力学平衡条件要求自由能对序参量和磁场矢势的任意变化 $\delta\psi$, $\delta\psi^*$ 及 $\delta\mathbf{A}$ 为极小,由此可得到著名的 GL 方程:

$$\frac{1}{2m^*} (-i\hbar \nabla - e^* \mathbf{A})^2 \psi + \alpha\psi + \beta |\psi|^2 \psi = 0, \\ J_s = \nabla \times \mathbf{H} = \frac{e^* \hbar}{2im^*} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) - \frac{e^{*2}}{m^*} |\psi|^2 \mathbf{A}, \quad (4)$$

以及相应的边条件. 第一个方程去掉 ψ 的非线性项后,很像描述质量 m^* 、电荷为 e^* 、能量本征值为 $-\alpha$ 的粒子的薛定谔方程,非线性项相当于 ψ 作用在自身上的排斥势,使波函数 $\psi(\mathbf{r})$ 有尽可能均匀的空间分布. 第二个方程和量子力学给出的电流密度公式有同样的形式. 在 1957 年 BCS 理论出现后,他们立刻意识到式中的 m^* 应取为 $2m$, e^* 应取为 $2e$.

从 GL 方程出发,可以得到在超导相和正常相的界面上,磁场可在有限距离 $\lambda(T)$ 穿透进入超导相, $\lambda(T)$ 称为穿透深度;同时参量 ψ 偏离平衡值的微小扰动 $\delta\psi$ 将在数量级为 $\xi(T)$ 的特征长度内衰减掉,后来 ξ 被称为相干长度(coherence length). $\kappa = \lambda/\xi$ 是著名的 GL 参数,在 GL 的原始论文中,他们用数值积分的方法得到 κ 的临界值,对于 $\kappa < 1/\sqrt{2}$ 的材料,超导相和正常相之间的表面能是正的,而对

于 $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 的材料, 表面能有负值。

由于当时知道的超导材料 $\kappa \ll 1$, 例如汞的 κ 值约为 0.16, 这类材料的行为成为 GL 关注的焦点。对于超导膜的临界磁场, GL 理论给出明确的结果: 当膜的厚度 $d < d_c = (\sqrt{5}/2)\lambda(T)$ 时, 超导膜在磁场中的相变是二级的, 且临界磁场

$$H_{c1} = \sqrt{6}H_c(T) \frac{\lambda(T)}{d}, \quad (5)$$

其中 $H_c(T)$ 是块材的临界场。这一结果和 1935 年伦敦理论给出的结果 $H_{c1} = \sqrt{3}H_c(T)\lambda(T)/d$ 相变是一级的完全不同。这种差异立刻引起实验物理学家的兴趣, 其中一位是在莫斯科卡皮查物理问题研究所的年轻人 Zavaritzkii N V. 起初他对 Sn, In 等超导膜临界磁场的测量得到了与 GL 理论一致的结果, 但当他采用在低温下蒸镀在玻璃衬底上的方法制作质量更好的样品后, 却发现结果不再与 GL 理论相符。他把这一情况告诉了大学的室友 Abrikosov。Abrikosov 希望在 GL 理论的框架内解开这一谜团, 开始思考 $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 的材料超导相的行为, 接着又进一步研究了 κ 值远大于 1 的情形^[1]。

对于 $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 的超导体, Abrikosov 称之为第 II 类超导体, 以别于 $\kappa < 1/\sqrt{2}$ 的第 I 类超导体。Abrikosov 给出的物理图像, 用今天的术语讲述是, 当外加磁场加大到下临界磁场 H_{c1} 时, 第 II 类超导体从完全抗磁的迈斯纳态过渡到混合态。在混合态, 磁场以磁通线的形式进入超导体内。磁通线的中心是一个半径约为 ξ 的处于正常态的圆柱形芯子, 在芯子外存在一个半径约为 λ 的超流环流区, 每根磁通线具有的磁通量恰好等于一个磁通量子 $\Phi_0 = h/2e$ 。由于磁通线间有相互作用, 最稳定的状态是呈周期性的三角形点阵排列, 通常称之为 Abrikosov 格子。磁场增加时, 磁通线的密度增加, 彼此靠拢。最后, 当磁场加大到上临界磁场 H_{c2} 时, 相邻磁通线正常芯子碰到一起, 发生从超导相到正常相的转变。理论给出

$$H_{c2}(T) = \sqrt{2}\kappa H_c(T), \quad (6)$$

式中 $H_c(T)$ 是从零磁场下正常相和超导相自由能密度之差算出的热力学临界磁场, 对于第 I 类超导体, 这就是真正的使超导电性破坏的临界磁场。但对第 II 类超导体, 尤其是当 κ 值远大于 1 时, 超导电性消失的上临界磁场可远大于热力学临界磁场。这对第 II 类超导体在高磁场下的应用是十分重要的。

Avrikosov 在 1953 年(当时他 25 岁)已完成了有关第 II 类超导体的理论工作。也许是理论看起来太

另类了, 直到 1957 年, 当他了解到 Feynman R P 1955 年有关在超流⁴He 中可以形成量子涡旋线的理论工作后才送出发表^[1]。在冷战期间, 苏联科学家的研究工作并不被西方世界重视。唯象的 GL 理论一直受到怀疑, 这种怀疑直到 1959 年 Gorkov L P 证明 GL 方程可做为 BCS 理论的一种严格的极限情况, 以及稍后 Hohenburg P C 从理论上说明 GL 方程的应用并不只限于温度和磁场接近相变临界值处, 而且还可用于超导序参量并非小量的温度和磁场区间才得以消除。对于 Abrikosov 的工作, 也是到 20 世纪 60 年代高临界磁场超导体出现后才为西方完全接受。

Abrikosov 有关第 II 类超导体的理论得到多方面的实验证实, 其中最具说服力的是对混合态磁通线结构的直接观察。第一个磁通线格子的图像是 1967 年由 Essmann U 和 Träuble H 用磁缀饰(或称为毕特粉纹图)方法得到的。近代又发展了磁光图像法, 扫描隧道显微镜方法和电子全息图等方法。图 2(a)给出了在第 II 类超导体 NbSe₂ 表面用磁光法观察到的磁通线的 Abrikosov 格子, 大体有三角形格子的结构。图 2(b)是我们自己用磁缀饰方法在用熔融结构方法生长的高温超导材料 YBCO 上得到的磁通线露头的分布。图像显示出磁通线钉扎在孪晶界上, 具有各向异性, 呈椭圆形, 某一行上的磁通线大体均匀排布, 且大多像三角格子要求的处在相邻行两磁通线之间。

人们对 Ginzburg - Landau 理论, 以及 Abrikosov 的理论给予很高的评价。例如在 Tinkham M 1975 年出版的“超导电性导论”一书中讲到 GL 理论的“提出是物理直觉的一个胜利”; 这一理论最大的价值是在描述超导体的宏观特征上”。Abrikosov 的理论是“开路先锋式的”; 他的论文开创了对第 II 类超导体的研究”等等^[3]。现在我们知道, 超导材料已可实际用来制作产生强磁场的超导磁体, 用于为医学诊断的磁共振成像技术, 为确定复杂分子结构的核磁共振方法, 聚变反应中约束等离子体, 和粒子加速器中控制高速带电粒子轨道偏转方向等方面。这些实用的超导材料都属于第 II 类超导体, 是其中称为非理想第 II 类超导体的一类, 有高的上临界磁场, 同时由于材料中的非理想性, 如缺陷的存在对磁通线的钉扎作用, 有大的临界电流。特别是新发现的高温超导材料属 κ 值特别大(超过 100)的极端第 II 类超导体, 这一事实为作为第 II 类超导体理论基础的 Abrikosov 的理论, 以及作为其出发点的 Ginzburg -

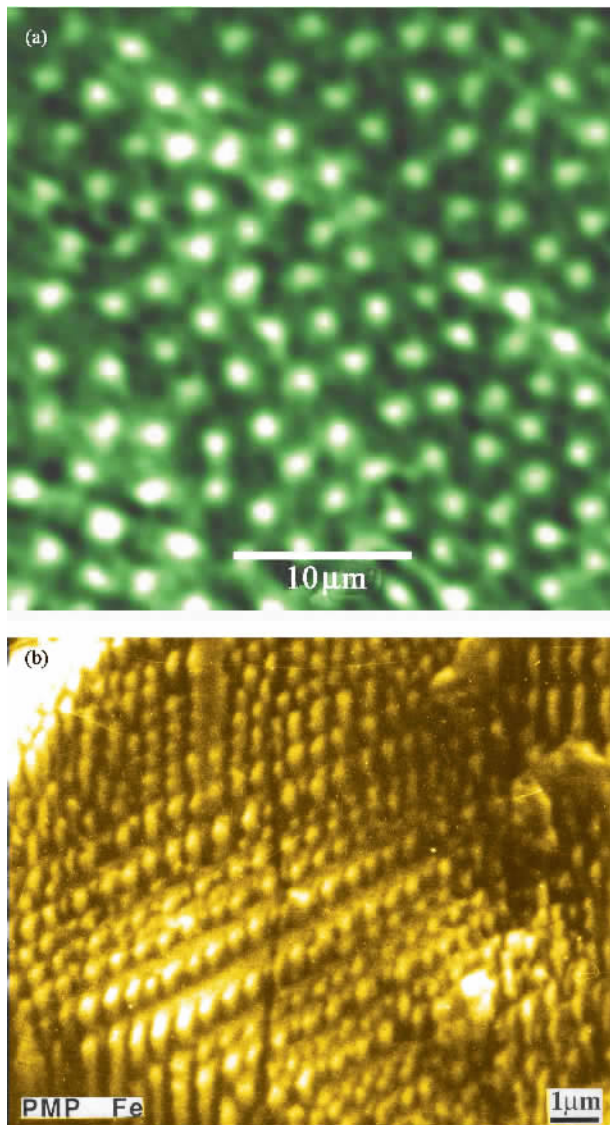


图2 (a)用磁光法在 NbSe_2 样品上得到的磁通线分布图像^[1] ; (b)在熔融织构方法生长的 YBCO 样品上,用磁缀饰方法得到的图像^[2]

Landau 理论的重要性增加了新的内容. Abrikosov 发现的混合态中磁通线存在及其结构,尤其在高温超导体中已成为一个重要的研究方面,以至文献上出现了“涡旋物质”(vortex matter)这样的新的术语. GL 理论的重要性也决不仅限于叙述磁场中的超导电性. 在物理学的多个领域,包括在粒子物理的弦理论中都是重要的. 他们的贡献无疑是值得授予诺贝尔物理学奖的.

2 Leggett 获奖的工作

人们对物质体系的认识,首先要着眼于最简单的体系,着眼于其基态和低激发态,由此得到的认识,建立的概念和发展出来的理论和方法,常常可用

于其他体系和领域,具有独特的重要性.

液体 ^4He 是最简单的玻色子体系. ^4He 是惰性气体元素, ^4He 原子有满壳层的电子结构,原子间除近距排斥作用外,仅有弱的各向同性的范德瓦尔斯吸引相互作用. 液体 ^4He 的基态是源于玻色凝聚的超流态. ^3He 是 ^4He 的同位素,原子核中少一个中子,核自旋为 $1/2$,是费米子. 原子间的相互作用和液体 ^4He 相比,增加了核磁矩间的偶极相互作用,这种相互作用很弱,相邻原子间的磁偶极相互作用能折算成温度约 10^{-7}K ,因此液体 ^3He 应该是最简单的费米子体系. 液体 ^3He 在温度低于 100mK 时,其行为确实可以用费米液体理论描述. 1972 年, Lee D, Osheroff D 和 Richardson R 发现液体 ^3He 的超流相,并获得 1996 年度诺贝尔物理学奖. 此时人们已意识到,对于超流 ^3He 在理论上做出重要贡献的物理学家,或迟或早将会得到诺贝尔物理学奖. 2003 年将这一奖项授予 Leggett,是非常好的选择, Leggett 是当之无愧的.

笔者曾撰文介绍过 ^3He 超流新相的发现^[4],其过程带有一定的偶然性. 有趣的是 Leggett 致力于这方面的理论研究,也有一定的偶然性. 当时他在英国 Sussex 大学任教,在 1981 年第 16 届国际低温物理会议上,在他获得 London F 奖的演讲中^[5],他讲道:

“由于长期为主修物理和哲学的大学生讲授有关物理学概念基础的课程,我对量子力学和统计物理的基础越来越感兴趣. 大约在 1972 年初夏终于做出决定,至少在一段时间内停止低温物理方面的研究,全部时间投身于稍有哲学倾向的问题,但后来的发展却更像是由抛硬币来决定的. 在得知 Richardson 将路过 Sussex 并停留一天时,我正在苏格兰度假. 虽然很想见到 Bob (Richardson 名字的呢称),但为此要缩短假期,我有点迟疑. 在关键性的清晨,阴沉沉的天空打破了平衡,我回到了 Sussex,和 Bob 谈了约两小时,看来这件事改变了我后来的整个研究方向.”

Lee 的小组最初以为他们在液体和固体 ^3He 混合体系中发现的相变是发生在固相中的,随后他们通过核磁共振 (NMR) 实验,表明相变实际上发生在液相中. 目前采用的数据是在液相固相共存的融化压力下,在 2.79mK 时发生正常相到超流 ^3He A 相的相变,在 2.16mK 时,超流 ^3He A 相转变为 ^3He B 相. Richardson 告诉 Leggett 的是当时尚未发表的 NMR 测量结果,进入 A 相后, NMR 频率 ω_1 相对于

通常应该有的拉莫尔频率 $\omega_L = \gamma H$ 有显著的频移 γ 是 ^3He 原子核的旋磁比 H 是外加磁场. 频移 $\Omega_A(T)$ 满足如下关系:

$$\omega_L^2 = \omega_L^2(H) + \Omega_A^2(\tau), \quad (7)$$

式中下标 t 表示所做的 NMR 测量是横向的, 即交变场与 H 垂直. Ω_A 只和温度有关, 温度下降时加大, 在 2.21mK 时约 1890Hz. A 相的磁化率并不随温度变化, 大体为常数. 进入 B 相后频移消失, 但磁化率突然减半.

A 相出现如此大的 NMR 频移是非常让人感到震惊和迷惑的实验事实, 因为相对于拉莫尔频率的频移只能来源于某一原子和周围原子的相互作用, 这等效于有附加的内磁场存在. 这里惟一可以考虑的是 ^3He 核之间的磁偶极相互作用, 但前面已讲过, 这是非常弱的, 因而频移最多不超过几个 Hz, 且在正常相中就应看到, 同时与温度无关. Leggett 的第一个想法是: “也许这是第一个证据说明物理学的某些非常基本的原理, 如麦克斯韦方程组, 或泡利原理在极低温的极端条件下失效了.” 他决定暂时推迟对量子力学基础的研究, 先看看量子力学是否实际上用得^[5].

作为费米子液体的 ^3He 超流相, 类似于金属合金中电子系统的超导相变, 也是 ^3He 原子配对(库珀对)成为复合玻色子的玻色凝聚. 不同之处是在 BCS 超导体中, 电子对的总自旋为零, 两个电子相对运动的角动量子数 L 也为零, 处于 s 波态, 是各向同性的. 而在超流 ^3He 中, 库珀对的自旋量子数 $S = 1$, 角动量子数 $L = 1$, 处于 p 波态, 是各向异性的, 每个对要用两个矢量描述, 从不同的方面观察是不一样的. Leggett 有关超流 ^3He 理论的中心点是在凝聚态物质中可以发生几个对称性的同时自发破缺, 这是在各向异性超流理论中的突破.

在图 3 中, 把每个对理解为一个分子, 如前述, 它有自旋(红色箭头)和角动量(蓝色箭头), 对于处于气相的普通的分子, 自旋矢量和角动量矢量的取向是无规的, 如图 3(a)所示, 处于无序态. Leggett 的想法是关键点在于超流相变时这些对发生玻色凝聚, 所有对的行为必需一致, 不仅是它们的质心运动要一致, 而且其内部结构和相对取向也要一致, 所有对的自旋矢量取向和角动量矢量的取向均应相同[图 3(b)], 自旋取向和角动量矢量取向的旋转对称性分别地并同时地发生破缺. 整个超流液体需要两个特征矢量描述, 一个涉及其自旋性质, 一个联系于轨道运动性质, 是各向异性的超流.

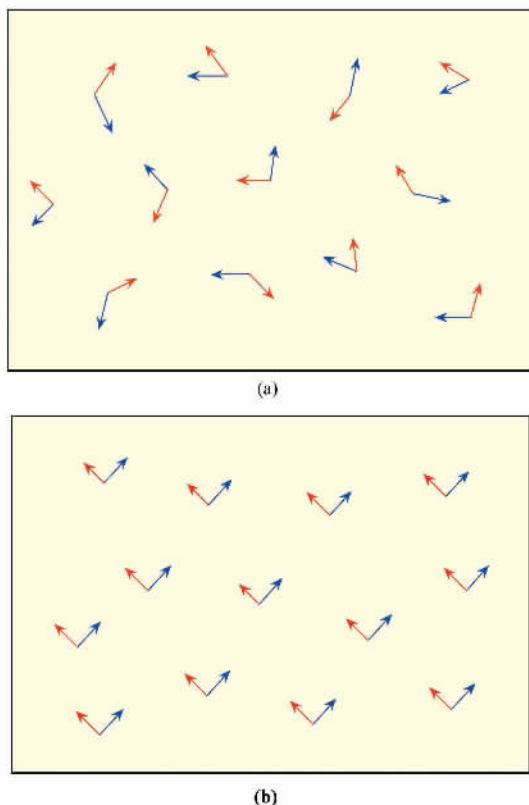


图 3 (a)通常的处于无序态的分子气体 (b)发生玻色凝聚的库珀对体系

所有的库珀对的内部结构和取向一致有着极为重要的物理后果. 在液体 ^3He 中, 如前述, 惟一可以考虑的具有各向异性特征的相互作用是核自旋间的磁偶极相互作用. 对中两个核自旋平行取向且垂直于相对运动转轴的[图 4(a)]的能量要比平行于转轴[图 4(b)]低一些, 因为后一种情况两个核磁矩的正负磁荷总是在同一边, 相互排斥, 而不像前一种, 有时恰好一个磁矩的正磁荷对着另一个的负磁荷, 相互吸引. 但是这一能量差是极小的(约 10^{-7} K), 无法与热扰动能相对抗, 会像我们平常在氢分子气体中所看到的那样, 相对于转动轴, 核自旋的取向是无规的[图 3(a)]. 但对超流 ^3He , 情况则截然不同, 需要比较的不是一个对两个不同的内部结构[图 4(a)和(b)]之间的能量差, 而是由于所有的对必须一致, 是所有的对(约 10^{23} 个)均处于图 4(a)或(b)之间的能量差, 这个能量差显然会远大于超流相发生时(3×10^{-3} K)的无规热运动能. 在这一物理考虑的基础上, Leggett 指认了超流 ^3He A 相属早先 Anderson P W 等三人从理论上提出的 ABM 态, 只存在 $S_z = \pm 1$, 即 $|\uparrow\uparrow\rangle$ 和 $|\downarrow\downarrow\rangle$ 的两种对, 同时也说明了 A 相发生的可观的 NMR 频移, 同样来源于这

种似乎可以“忽略”的磁偶极相互作用因玻色凝聚而得到的极大增强。有趣的是在 1972 年 8 月第 13 届国际低温物理会议召开时, Leggett 因故不能出席。请他的同事代为宣读他有关 A 相频移的论文。Leggett 早先得到的是有关 NMR 实验的预印本, 在他的印象中, $\Omega_A^2(T)$ 的数量级是 $10^7(\text{Hz})^2$, 而他计算出来的是 $10^{10}(\text{Hz})^2$ 的量级。当读到他无论如何都无法减小理论值和“实验”值的差别时, 在听众中引起一阵善意的笑声, 因为差别只是他的想象, 真实值正是 $10^{10}(\text{Hz})^2$ 。[5]

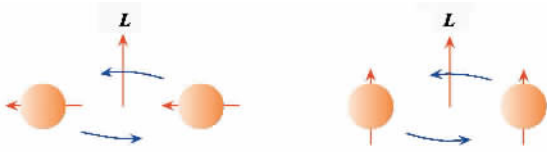


图 4 ^3He 对的两种不同结构 (a) $S \perp L$ (b) $S // L$

这里需要指出的是, 超流 ^3He B 相的存在的物理原因及其指认, 在理论上是由 Anderson P W 和 Brinkman W 给出的。他们指出对的形成源于 ^3He 原子由于有核自旋存在, 一个 ^3He 原子会使周围的 ^3He 原子发生自旋极化, 从而影响到另一个 ^3He 原子, 对的有效吸引势与体系的磁化率成正比。超流 B 相有 $S_z = 0, \pm 1$ 的三种对, 即 $|\uparrow\uparrow$ 和 $|\downarrow\downarrow$ 和 $(1/\sqrt{2})|\downarrow\uparrow + \uparrow\downarrow$ 。由于 $S_z = 0$ 的对磁化率没有贡献, 因而进入 B 相时磁化率突然下降, 同时形成对的有效势也突然降低, B 相只能在更低的温度下出现。A 相由于每个 ^3He 原子均对磁化率有贡献, 因而磁化率与正常相相同。加磁场后, 会在 A 相出现前出现 A_1 相, 理论上是由 Ambegaokar V 和 Mermin N D 指认的, A_1 相中只有 $|\uparrow\uparrow$ 或 $|\downarrow\downarrow$ 一种对出现。

1973 年春天, 受 Richardson 的邀请, Leggett 在复活节假期来到 Cornell 大学, 他可以抛下所有的教学和行政事务不管, 一天 12 小时和做实验及理论的物理学家们讨论, 如何将自旋、轨道对称性自发破缺的一般概念转变成各向异性超流具体的自旋动力学。稍后, Leggett 完成了有关自旋动力学的理论, 发表了著名的 Leggett 方程:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \gamma\mathbf{S} \times \mathbf{B} + \mathbf{R}_D,$$

$$\frac{d\mathbf{d}}{dt} = \gamma\mathbf{d} \times (\mathbf{B} - \mu_0\gamma\mathbf{S}/\alpha), \quad (8)$$

这里 \mathbf{R}_D 是磁偶极相互作用对自旋取向产生的恢复力矩, \mathbf{d} 是刻画库珀对自旋取向的特征矢量。这是一个非常漂亮的方程, 有关 NMR 的实验工作主要

受这一方程的影响, 即把方程用于各种情况, 得到的结果和实验比较, 结果是理论给出的预言完全为实验所证实。其中最著名的是理论给出在 A 相和 B 相中存在纵向 NMR, 所谓纵向是指与一般高频场与静态磁场相垂直(横向)不同, 这里两者是平行的; 在一般物质中, 纵向的 NMR 是不可能发生的。理论给出在 A 相中纵向 NMR 频率为

$$\omega_L = \Omega_A(T), \quad (9)$$

在 B 相中, 有

$$\frac{\Omega_B^2(T)}{\Omega_A^2(T)} = \frac{5\chi_B}{2\chi_A}. \quad (10)$$

尤其是(10)式, 只有在 $L = 1$ 配对时才有 $5/2$ 的数值, 实验对这一结果的肯定是超流 ^3He 属 p 波态对的重要证据。

总起来讲, Leggett 的理论对于了解超流 ^3He 中库珀对或序参量的结构是极为重要的, 他的理论为解释实验结提供了理论的框架, 特别是他发现的在凝聚态物质中可发生几种对称性的同时自发破缺对了解发生在其他领域, 例如液晶物理、粒子物理和宇宙学中的复杂相变有着普遍的重要性。

3 结束语

Abrikosov, Ginzburg 和 Leggett 获得 2003 年度诺贝尔物理学奖, 给人们的启示是多方面的。除去突显了基础研究的重要性, 除去表明基础研究需要有积累和传承, 以及他们在理论方面有极好的训练和准备外, 笔者在这里要特别强调的是, 他们在做这些获奖的工作时, 并未想到诺贝尔物理学奖, 完全是一种对物理问题非功利的执着的探求, 这也是笔者在撰写本文时刻意从物理问题发展的线索, 沿时间轴落笔的原因。

笔者 1980—1981 年曾在 Cornell 大学 Lee 的小组工作, 其间 Leggett 曾应邀来做系列讲座, 他讲话语速很快, 写字像一条线在抖动也很难认。人们都觉得他太聪明了, 脑子转得很快, 所以讲话和写字也都很快。1982 年 4 月, 他和夫人一起来北京访问, 他来访问时 44 岁, 是英国皇家科学院最年轻的会员。他在北京大学当时的第三教室楼能坐 300 人的 103 教室做关于量子力学基础的报告, 来听的同学太多, 挤得水泄不通, 讲台上还放满了同学带来的小录音机, 盛况空前, 刚改革开放的中国也给他留下了很深的印象。图 5 是报告完后他和我们几位接待他的人在第三教室楼旁照的照片, 以及他希望我将照片转交给

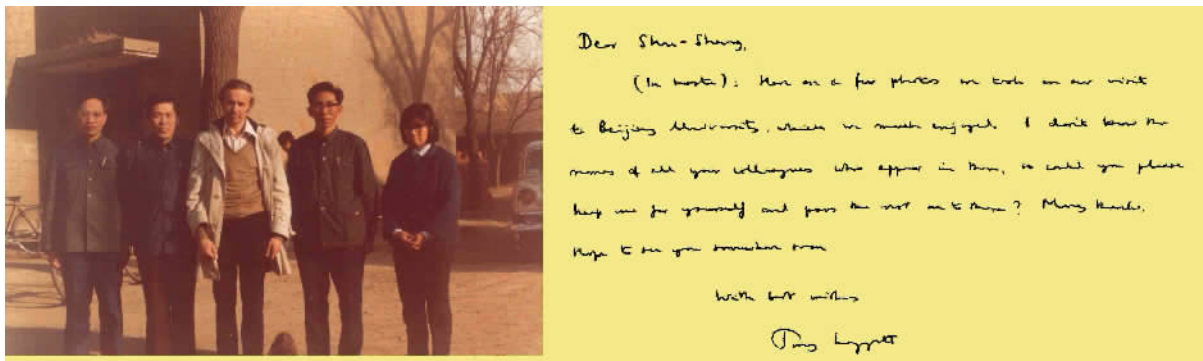


图 5

其他人所写的短信,不知道读者是否能读下来。

我记得在他报告完了后,很多同学希望了解如何才能学好物理,怎样才能成功。他的回答很简单,只说了一句话:刻苦努力(work hard)!

神舟五号发射的成功,说明中国人想做的事情一定能做成功。笔者相信总有一天中国本土的物理研究会得到诺贝尔奖,但今天重要的是去掉浮躁,踏踏实实地刻苦努力,以一种积极的、但又平和的心态做好物理研究。

参 考 文 献

- [1] Advanced information on the Nobel prize in Physics, 7 October, 2003. Website: www.kva.se
- [2] Tong Litai *et al.* Chin. Phys. Lett., 1993, 10: 313
- [3] M. 廷哈姆. 超导电性导论. 北京:科学出版社, 1985, 原作 1975 年出版
- [4] 阎守胜. 物理, 1997, 26: 130 [Yan S S. Wu (Physics), 1997, 26: 130 (in Chinese)]
- [5] Leggett A J. Physica B + C, 1982, 109&110: 1393

· 物理新闻和动态 ·

更精确地研究核子

(Bringing the nucleon into sharper focus)

位于美国弗吉尼亚州的 Thomas Jefferson 国家加速器实验室的一群国际科学家们,共同对质子内夸克自旋是如何取向的问题进行研究。粗略地说,夸克自旋可以看成是一个微小的磁棒,指向某一确定的方向并具有一定的强度。有关夸克自旋的信息可提供这些基本粒子在核子(如中子与质子)内排列的新的数据。

过去物理教科书中经常把中子与质子简单地描述为由 3 个夸克组成,并称之为“价夸克”。而一个比较完整的物理图像应该是由 3 个价夸克、“夸克-反夸克”对构成的海和将夸克结合在一起的胶子所组成,它们能突然进入或湮灭在真空中。

现在科学家们第一次对中子内价夸克的自旋分布进行了精确的测量,令人惊奇地发现在中子内夸克的轨道运动是非常重要的,这一点过去经常被忽略。在这个实验室内的氦-3 靶上,用 5.7 GeV 的电子束进行瞄准,这时的电子主要是与中子内的价夸克发生相互作用,而不是与夸克海及胶子相互作用。利用他们新的中子数据后,除了已经存在的质子数据外,还发现了额外的质子。由此他们得出了下述的结论:质子内两个向上的价夸克,其自旋在整个质子内是平行排列的,而对质子内两个向下的价夸克却不一定有这种性质。这个结论与量子色动力学微扰近似所给出的预期是不符合的。量子色动力学是适合于描述基本粒子间强相互作用的理论,它的微扰近似没有将描述核子内夸克的轨道路径的轨道角动量考虑在内。另一方面,这个结论与相对论性夸克模型的预期值符合得较好,这是因为相对论性夸克模型中是考虑了轨道角动量的影响。这一点表明在研究质子形状等问题时,夸克在核子内的轨道角动量是一个重要的参量。

(云中客 摘自 Physical Review Letters, 19 December 2003)