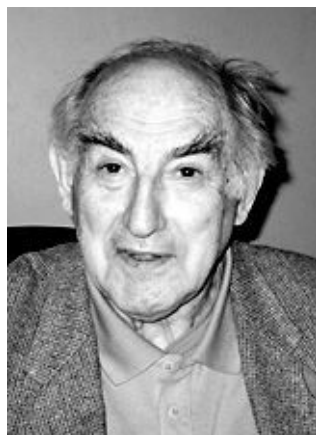


金茨堡和他的物理研究

戴 闻

阿布里科索夫(Alexei Abrikosov)、金茨堡(Vitaly Ginzburg)和莱格特(Anthony Leggett)三人,基于他们在超导体和超流体理论上的研究贡献,共同分享了2003年度的诺贝尔物理学奖。在颁奖消息发布后,一位在剑桥大学工作的物理教授对记者评论道:莱格特是一个具有敏锐物理直觉的思想家,阿布里科索夫是高超的正统数学物理学家,而金茨堡则兼具上述两方面的特质。金茨堡于2009年11月8日去世,享年93岁。在这篇纪念文章中,作者将在生平介绍的基础上,写下一些关于金茨堡研究成果的学习体会,与大家分享。



一、生平

1916年金茨堡出生于莫斯科的一个犹太家庭。1931年,莫斯科技术大学的一位教授为金茨堡在该校的X射线实验室牟得了一个实验助理的职位。两年的实践大大提升了金茨堡对物理学的兴趣。1933年他进入莫斯科国立大学,学习自己所钟爱的物理学专业。他被理论物理的奥妙深深吸引,但由于对自己的数学能力缺乏自信,遂决定在兰兹伯格(Grigory Landsberg)指导下从事光学工作。1940年他转到苏联科学院列别捷夫物理研究所,继续攻读博士学位,1942获科学博士头衔。

1941年苏联参加二战,金茨堡随苏联科学院迁至喀山(Kazan),在喀山工作至1943年。1937年金茨堡与他的研究生兼同事Olga Zamsha结婚,但后来在1946年离异。同年,他与Nina Ermakova结婚。Nina Ermakova在1944年曾因一项伪造的指控(企图谋杀斯大林)被拘捕,后被宽大处理,并于1945年在一次特赦中被释放,但不许返回莫斯科。

1945年金茨堡受邀成为高尔基大学(位于叶卡捷琳堡)新建无线电物理系的访问教授,接着成为一个研究小组的负责人,专攻电磁波的传播与辐射。7年间,他主要居住在莫斯科,每年都要向当局写申请,为的是让妻子能够回到莫斯科。然而申请被一次次地拒绝,直到1953年斯大林去世。

1947年有文章指责金茨堡“唯心主义”、“不爱国”。尽管如此,塔姆(Igor Evgenievich Tamm,金茨堡的上级,1958年诺贝尔物理学奖得主)还是安排他参加了苏联核武器计划。核武器计划汇集了一大批物理和数学的顶尖人才,如萨哈罗夫(Andrei Sakharov)等。在研制氢弹的过程中金茨堡扮演了重要的角色,他的主要贡献是:提出使用 ${}^6\text{Li}$ 作为氢弹的燃料(区别于美国的做法)。

1953年金茨堡被选为苏联科学院通信院士,1966年成为院士。1971年作为苏联科学院理论物理部负责人的塔姆去世,金茨堡接任了他的职务。1980年苏联的氢弹之父萨哈罗夫(也属理论物理部)因“持不同政见”而遭流放。苏联科学院曾对萨哈罗夫给予了生活上的照顾,为此金茨堡被追究责任,被限制出国许多年。1985年苏联开始改革,1989年金茨堡成为人民代表大会代表,直到1991年苏联解体。

金茨堡具有强烈的个性,在整个苏维埃体制期间,他始终坚持人道主义观点。在理论物理的研究中,他保持开放的思维,并且他的许多评论是基于发展基本原理的直觉。作为一个具有丰富物理灵感的人物,他在承受强大的政治压力的环境下,作出了引领世界的学术成绩。在学生的眼中,他是一位慈祥的长者,他的为人将被所有熟悉他的人铭记。

二、在诸多领域的研究成果

金茨堡的研究涵盖:经典和量子电动力学、切伦科夫辐射和穿越辐射(transition radiation)、电磁波在等离子体中的传播、射电天文和同步辐射、宇宙射线和 γ 射线天体物理、晶体中的光散射、铁电理论,以及超导和超流。在所有这些领域,他都做出过原创性的工作。以穿越辐射为例,所要研究的是:高速带电粒子穿越两种介质(二者具有不同的介电常数)的现象。基于他扎实的电动力学功底,他对这个问题作出了综合处理,是该领域公认的先驱。在同步辐射领域,他的影响也很大。他提出:

在高能天体物理现象中，同步辐射在非热辐射中占支配地位。

金茨堡对理论物理广泛的学术兴趣，也反映在著名的金茨堡研讨会中。金茨堡研讨会每周在苏联科学院举行。按照金茨堡的要求，讨论的课题应包括理论物理的所有方面（除了粒子物理）。在研讨会上，为了使所有听众能跟上议题他发挥主导作用，适时地打断主讲者，及时地评述刚刚讲完的要点。在莫斯科的大多数物理学家，都尽力抽时间参加金茨堡研讨会。

1950年金茨堡与朗道（Lev Landau）合作，发表了关于超导理论的研究成果。这项工作是在朗道二级相变理论（注：在没有外加磁场的条件下，从超导态到正常态的转变是二级相变）的基础上所取得的突破性进展，它将对称破缺现象与金属中“超导电子对”波函数结合在一起。这个新的范式具有深刻的含义，其应用超出了超导领域，扩展到量子物理的许多方面，甚至涉及希格斯现象（Higgs phenomenon）。

三、金茨堡-朗道理论及其应用

1950年金茨堡与朗道面临的课题是：如何设法描述超导电性在强磁场和强电流条件下被破坏；为破坏超导电性，对于薄膜样品和大块样品，为什么临界磁场会有所不同？他们为描述超导态，设计了一个序参量（即超导库珀对波函数，它测度库珀对的几率幅），并且允许它随空间坐标 \mathbf{r} 变化：

$$\psi(\mathbf{r})=|\psi(\mathbf{r})|\times\exp[i\phi(\mathbf{r})]. \quad (1)$$

显然，超流密度 $n_s=|\psi(\mathbf{r})|^2$ ，但在正常态，序参量 $\psi(\mathbf{r})=0$ 。我们注意到波函数的定义中，包含有位相因子 $\phi(\mathbf{r})$ ，因此有超流粒子动量的表达式：

$$m^*\mathbf{v}=\hbar\nabla\phi(\mathbf{r}), \quad (2)$$

其中 m^* 是库珀对的有效质量， \mathbf{v} 是超流流速。这是一个在没有外加磁场条件下的表达式，如果在系统中引入了磁场 \mathbf{H} ，上式将改为

$$m^*\mathbf{v}=\hbar\nabla\phi(\mathbf{r})-2e\mathbf{A}, \quad \text{且}\nabla\times\mathbf{A}=\mathbf{H}, \quad (3)$$

其中 $2e$ 是库珀对的电荷， \mathbf{A} 是矢势， \mathbf{H} 是磁场强度。

对于样品超导态总自由能（包括了磁场下的动能和磁能），运用求自由能极小的变分计算，金茨堡(G)与朗道(L)最终导出了物理学的新范式——GL 方程（限于篇幅，具体方程就不在此列出了）。

GL 方程是非线性微分方程，它的解 $\psi(\mathbf{r})$ 是随位置 \mathbf{r} 和矢势 \mathbf{A} 变化的。此前的超导唯象理论认为，

超流密度 n_s 仅仅是温度的函数。GL 方程的重要应用首先在于，它提供了正常相和超导相之间界面的自然描述。后来（1959年）高里科夫 L. P. Gorkov 证明：GL 方程可以从微观 BCS 理论被推导出来，属于后者适当的极限情况。并且，它至今仍是解决“空间变化超导态”问题的标准入手方法。这里需指出：BCS 理论本身不能描述非均匀超导体。

对 GL 方程的研究发现，依照某一参数 $\kappa=\lambda/\xi$ (λ 是穿透深度， ξ 是相干长度，事实上当温度逼近超导转变温度 T_c ， λ 和 ξ 两者均发散，因此它们的比值更有意义，见下文) 的取值低于或高于 $1/\sqrt{2}$ ，超导体被分为两类，即第 I 类和第 II 类超导体（这是 1957 年之后被引入的称谓）。只要外加磁场不超过某一临界值， H_c ，第 I 类超导体总是将磁通线排出体外（Meissner effect，迈斯纳效应）。然而，第 II 类超导体允许磁通线在体内驻留（图 1）。

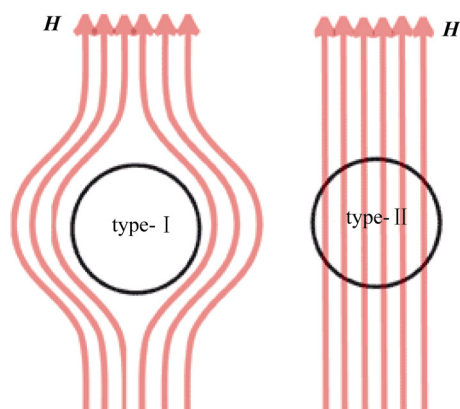


图 1 第 I 类超导体（左图），当外场 $H < H_c$ ，材料处于超导态，所有磁通线被排出体外——完全的迈斯纳效应。第 II 类超导体（右图），在磁场强度未超出某一定度的情况下，允许磁通线驻留体内，同时材料保持超导电性

到 20 世纪 50 年代中期，有人用高质量的薄膜样品，做临界磁场对膜厚以及温度的依赖关系实验，发现实验结果不能用 GL 理论解释。阿布里科索夫得知后，便在 GL 理论的框架内寻找解决的办法。按照 GL 理论，对于 $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 的情况，在超导相和正常相之间界面能是负的，并且正常相相对于超导相是不稳定的。阿布里科索夫凭借他的数学才能，从上述“不稳定”出发，研究 $\kappa > 1/\sqrt{2}$ 以及 κ 更大的情况，研究这类超导体在更强磁场中的行为，最终建立了第 II 类超导体完整的唯象理论。

让我们从图 2 了解第 I 和第 II 类超导体在磁化

过程方面的区别。按照电磁学，磁通密度 B ，磁场强度 H 和磁化强度 M 三者之间服从 $B=H+M$ 关系。对第 I 类超导体（见图 2 中的虚线），当外场 $H < H_c$ ，材料处于超导态，所有磁通线被排出体外（迈斯纳相）， $B=0$ ； $M=-H$ 。对于第 II 类超导体（见图 2 中的实线），当外场 $H < H_{c1}$ ，行为与第 I 类一样；在外场 H 从 H_{c1} 增加到 H_{c2} 的区间，磁通线逐步增加对样品的穿透，进入舒勃尼科夫（Shubnikov）混合相， B 增大， M 尽管为负但幅值逐渐减小；到了 $H=H_{c2}$ ， B 完全穿透， $B=H$ ，且 $M=0$ 。

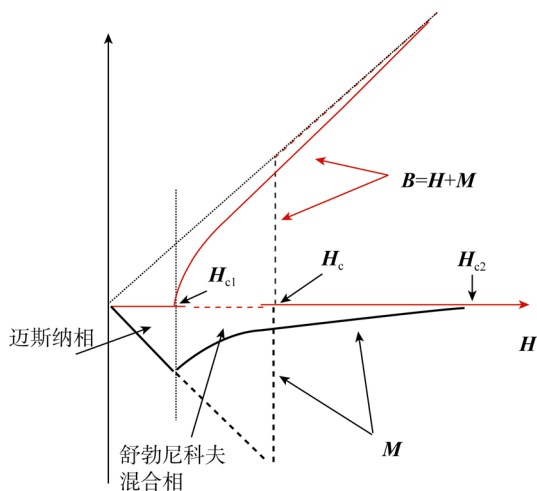


图 2 磁通密度 B （浅色）和磁化强度 M （深色）作为磁场强度 H 的函数，对第 I 类（虚线）和第 II 类（实线）超导体分别绘出

在超导体内为了保持磁场是常数，矢势 A 必须随 r 变化。 A 随 r 的变化可以有多种选择，只要能给出正确的外场，都属于规范变换。例如，可以选择 $A_y = H_z x$ ，其中 A_y 是 A 的 y 分量， H_z 表示外场 H 沿 z 轴，并且 A_y 随 x 坐标线性增长。不过，按照 GL 的动能表达式，上述线性增长意味着动能无限制的增大，但这是不可能的。当 x 到达一定程度， A_y 的增大不得被一个位相的跳变所抵消。以至于序参量周

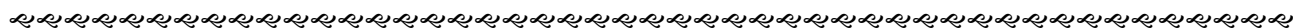
期性地为零，导致阿布里科索夫磁通晶格的产生。阿布里科索夫证明，上述这种分布满足总能最小。

阿布里科索夫的系统理论说明，外加磁场对第 II 类超导体的穿透，正是通过了许许多多涡旋所提供的通道。在涡旋芯内，材料是正常态，涡旋芯的半径约等于相干长度 ξ ；在芯的周围是超导态，有库珀对超流环绕，绕涡旋芯走一圈，波函数的位相将改变 2π 。涡旋的数量随着磁场强度的增加而增加，但有一个限度：如果涡旋芯与近邻的涡旋芯发生交叠，材料将失去超导电性。阿布里科索夫的这项工作是在 GL 理论的基础上完成的，被公认是超导研究领域的突破性进展，至今在新超导体研究、玻色-爱因斯坦凝聚研究以及超导磁体研发中仍被广泛引用。

金茨堡与朗道的基本贡献在于，他们构建了一个合理的超导库珀对波函数，用它描述超导相变过程中所发生的对称性破缺。这里所涉及的主要是与粒子数（库珀对数）守恒相联系的规范对称。在正常态，序参量 $\psi(\mathbf{r})=0$ ；在超导态，超流密度 $n_s=|\psi(\mathbf{r})|^2$ 为有限值。按照杨振宁的意见，规范对称应命名为位相对称。这是一种较为抽象的对称性，或许从位相因子 $\exp[i\phi(\mathbf{r})]$ 的角度有助于理解。在 T_c 以上，任何从 ϕ 到 $\phi+\phi_1$ 的变换都不会引起系统的变化；然而当 $T < T_c$ ，在超导体内的 r 位置必然有它特定的位相 $\phi(\mathbf{r})$ 。

从金茨堡的生平和他的物理研究，我们得到的重要启示是多方面的：探究物质世界的规律是人类崇高的事业；理性思维的发现经常能转化成巨大的生产力；好奇、执着、严谨和诚信是对科学工作者的基本要求；从美学角度看，物理理论（例如，关于对称性）也有可能和艺术大师的创作一样光彩夺目。金茨堡满怀热忱地将自己毕生的精力投入到物理研究中，而物理学的发展所需要的正是千千万万金茨堡这样的奉献者。

（中国科学院理化技术研究所 100080）



科苑快讯

黎明号探测器勘察灶神星

在进入灶神星轨道两星期后，离子推进的黎明号探测器传回灶神星的清晰图像。这颗小行星宽度为 5200 千米，表面粗糙，形状也不太规整。美国宇航局在 2011 年 8 月 1 日的新闻发布会上公布了这些照片，它们是在距离灶神星 530 千米外拍摄的，获得如此清晰的灶神星图像还是首次。

图像中显示的平坦开阔的火山口，宽达 460 千

米，源自一颗 80 千米小行星的撞击，这次撞击险些将灶神星撕成碎片。在该区域的北部还有一些平行的凹槽，就像环绕灶神星赤道区域的纬度线。行星学家用计算机模拟了灶神星的一次巨大撞击，发现撞击产生的岩石碎片会堆积形成奇怪的形状，却没有出现这样的东西。黎明号在未来数月将不断降低高度，直到距离灶神星表面 200 千米为止。

（高凌云编译自 2011 年 8 月 1 日 www.sciencemag.org）