

量子临界态*

Piers Coleman

(Center for Materials Theory, Rutgers University, USA)

Andrew J. Schofield

(School of Physics & Astronomy, University of Birmingham, UK)

黄 娆 译 曹则贤 校

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

按：1905年是爱因斯坦的奇迹年。在那一年里爱因斯坦提出了狭义相对论，解释了光电效应和布朗运动。紧接着，爱因斯坦于1906年借鉴光子的概念，又建立了固体比热的模型，解决了长期困扰人们的低温下固体比热反常的难题。这一问题的解决，是爱因斯坦奇迹般的智慧的又一次闪光。同样重要的是——如果不是更重要的话——爱因斯坦于1916年提出了受激辐射的概念。在此基础上，人类于1960年造出了第一台激光器，并由此改变了人类生活的方方面面。今天在纪念爱因斯坦奇迹年100周年的时候，我们翻译了英国《自然》杂志上的一篇“世界物理年”专稿，向广大物理爱好者介绍量子临界问题。如同一百年前的固体比热问题一样，量子临界问题质疑我们已有的物理学基础，拷问人类的智慧。译校者希望本文能唤起广大读者对这一物理学难题的兴趣，也许就是读者中的某位能够延续爱因斯坦的奇迹，给这个问题一个令人信服的解答。

——(中国科学院物理研究所 曹则贤)

值此纪念爱因斯坦对量子力学以及狭义相对论的开创性贡献100周年的时候，我们很快也将迎来爱因斯坦另一项伟大工作——固体量子论的建立——的百年纪念。100年过去了，那些曾经使爱因斯坦和他同时代的科学家们迷惑不解的实验结果今天依然让我们不得不质疑我们对极低温下物质量子相变的理解。

20世纪之交，一场危机困扰着近代物理的开创者们^[1]。它虽然不如迈克尔逊-莫雷实验确认地球不是在以太中运动那样意义宏大，但却也同样影响深远。这个疑团不是来自于天体物理的发现，而是一个浅显得几近直白的关于升高金刚石的温度需要多少能量的问题，简单地说就是比热。问题出在所需的能量远远小于人们的预期值。几乎在那之前一百年，杜隆(Pierre-Louis Dulong)和玻替(Alexis-Thérèse Petit)发现所有固体的摩尔比热基本上是相同的。1876年，玻耳兹曼(Ludwig Boltzmann)为其奠定了看起来非常坚实的理论基础。把统计力学应用于固体中的原子，他能够精确计算出摩尔比热的值，且与先前玻替-杜隆的结果相吻合。但在19世纪最后的几年里，统计物理所带来的成功越来越显得不那么牢靠。不仅某些材料(例如金刚石)表现出非常小的比热，而且低温技术的出现也显示比热在低温下具有非常强的温度依赖关系，这与玻耳兹曼的理论明显

不相符。其后低温物理不止一次面临一种全新的理解需求。

解决有关固体比热¹⁾理论和实验矛盾的各种努力由19世纪三位伟大的物理学家玻耳兹曼、开尔文爵士(Lord Kelvin)和瑞利爵士(Lord Rayleigh)加以整合。玻耳兹曼认为，束缚在固体中的原子的运动方式可能并不像他先前假设的那样简单。另一方面，开尔文爵士证明在玻耳兹曼的数学推导中存在着错误。是瑞利爵士真正意识到实验和当前的理论都不成问题，只不过人们迎来了一场需要用全新的观念才能解决的危机。爱因斯坦迈出了解决此难题的

* 本文原载 Nature 2005 年第 433 卷第 226—229 页，获得 Nature 授权翻译刊载。Reprinted with permission from Nature. Copyright 2005, Nature.

2005-02-02 收到

1) 尖括号内内容为译校者添加，以保持译文的连贯性或希图减少读者的理解困难。下同。

下一步。

爱因斯坦与比热之谜

爱因斯坦从一个意想不到的地方——来自星星的光——获得了他的灵感。1900年,普朗克(Max Planck)给出了一个可将星星的颜色与其温度联系起来公式,这是迈向量子理论的第一步。普朗克的理论使爱因斯坦得出了光是由不连续的量子,也就是光子组成的结论。1906年,爱因斯坦将普朗克的公式应用到物质里的振动上,他认为物质的振动也是由量子——也就是我们现在称之为“声子”的声波小波包——组成的。在高温下,爱因斯坦的理论回到了玻耳兹曼理论,可一旦温度下降到声子的激发温度以下,热容便急剧减小。爱因斯坦在1906年11月提交的一篇论文里通过一个拟和实验数据的结果,即将他的理论与金刚石比热的数据进行了比较,表明他已解决了这个困扰人们达70年之久的谜团。一门关于固体量子理论的新兴学科由此诞生。

爱因斯坦1906年的理论肯定不完善但却孕育了一场迫近的变革。爱因斯坦的简单理论的第一性原理推导要等到1924年,成了海森堡(Werner Heisenberg)运用全新的“量子力学”解决的第一个问题。到1930年,由爱因斯坦开创的方法算是从本质上解决了比热问题。

量子临界态以及疑团重现

一个世纪之后,同样的固体比热测量同我们有固体的理论产生了新的矛盾。21世纪捣蛋的坏孩子是处于现代材料科学最前沿的人造晶体。传统上,物理学关注的是物质的稳定相,例如那些出现在超导体、磁体或铁电体中的相,但在现今的一些材料中,我们有可能研究物质的不稳定的量子相。在物质两个稳定相之间的具有不稳定性奇异的点,也即量子临界点,会产生新的奇怪的行为。量子临界物质中的独特性质成为过去10年中研究的焦点。此外,已经建立的理论实验之间存在的矛盾使我们陷入一个与一百年前关于金刚石的难题非常相似的情形中。

随着我们生活中的材料变得精细繁杂——从复杂的塑胶到先进金属陶瓷——人们可能认为要了解它们的性质需要非常详细地知道电子和原子的复杂运动。可惜,这样的工作是不可能的;即使是最先进的计算机也无法一次对多于几十个的电子进行计算。幸运的是,正如玻耳兹曼当初考虑金刚石的时候

所预见的那样,粒子的集体行为与个体行为不同,而且,虽然单个粒子的运动是复杂的,可它们集合体的性质却获得了定性上的新的简单性。磁性,所谓超流体的零粘滞态以及超导金属的零电阻态的出现,都是由复杂物质中电子或原子的集体运动而产生的新的简单行为的范例。这些都是物质稳定相的例子。在物质两个稳定相之间的不稳定界面上,集体行为同样非常重要。这个转变点被称为相变。

相变是十分普遍的:从水结晶变成雪花,铁磁体中电子的自旋取向,低温下金属中超导电性的出现,甚至到早期宇宙时空的形成都包含着相变。尽管相变形式多样,但它们具有许多共同的基本特征。水在临界气压下变为水蒸汽,铁由于温度升高而退磁,二者的比热具有相同的幂指数温度依赖关系。对这种所谓“临界现象”的普适行为作出解释是20世纪物理学的一大成功^[2]。其中一个很关键的发现就是在连续相变中,随着系统接近临界点,一些短暂的具有初序的“液滴”形成并长大,这标志着新的有序即将生成。在临界点,材料中存在着各种尺寸的“液滴”。

和大多数相变一样,冰的融化是由于温度升高而引起的分子无规热运动加剧造成的。当温度超过某一临界值时,固体中原子的整齐排列会被打破,晶体开始熔化。然而在过去十年对凝聚态的研究中发现了一种新型相变,这种相变的产生并不是因为热运动,而是由与海森堡不确定性原理相联系的量子涨落引起的。量子涨落也就是所谓的“零点运动”。根据不确定性原理,粒子的位置越确定,它的速度就越不确定。所以,即使在绝对零度下热运动停止了,原子和分子也不会静止,因为这样一来它们的位置和速度就同时被确定了。与此相对,它们只能处在一种持续躁动的状态。如同热运动一样,如果零点运动变得太剧烈,便会消解有序,但在这种情况下有序的融化发生在绝对零度。这种量子相变^[3]发生在固态氦中。氦的固态非常容易摧毁,以致于即使在绝对零度也需要加压来保持其晶格稳定。去除外压,零点运动就会导致晶体氦熔化。

有关量子相变研究得最透彻的例子是金属磁性。电子具有磁取向或者说自旋,规则排列时就使材料产生了磁性。铁磁化时内部自旋全部平行排列,但在其他磁性的材料中,自旋可以形成交错的反铁磁排列(图1)。这些脆弱的有序结构容易受到零点涨落的影响而熔化。大约三十年前,理论物理学家John Hertz(现就职于Nordita²⁾)就针对量子力学对相变的影响做出了初步研究^[4]。Hertz着迷于量子力学

如何改变临界现象这一问题. 将量子力学应用于相变就如同爱因斯坦用相对论统一时空. 在 Hertz 的理论中出现的量子力学处理初序“液滴”包含了时间维度. 这通常不会产生附加效应, 但 Hertz 认为, 如果相变发生在绝对零度, 则那些预示着相变的有序度“液滴”将表现出量子效应而不是经典效应. 他指出, 在绝对零度相变中, 这些量子“液滴”将长大以致主导整个材料, 以可测量的方式改变材料的性质, 而最受影响的将会是电子(图 2). 这种“量子临界物质”为不依赖于具体的材料性质的新型普适电子行为的出现——当然是在材料靠近量子临界点的时候——提供了真实可见的前景^[5].

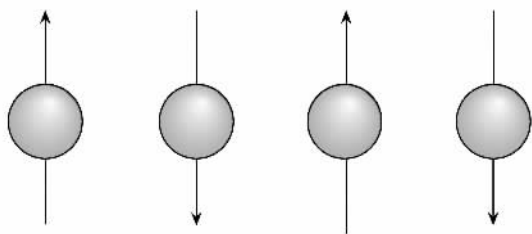


图 1 反铁磁体中自旋的上下交错排布

金属中承载电流的电子与光子类似: 它们都是波长随着动量的增加而减小的量子波. 然而不同于光子, 电子遵守泡利(Pauli)不相容原理: 任何两个电子都不可能具有相同的波长(或动量)³⁾. 为了使能量最小, 每个电子都必须占据未被填充的能量最低的量子态. 当所有电子都按这一原则排布好了以后, 就产生了一个严格划分最高能级占据态和最低能级未占据态的分界面(费米面). 这种排序引入了很强的约束, 就像苹果装进桶里, 只有那些靠近顶部的才能很轻易地被重新排布. 电子这样排列的一个后果就表现在比热上: 只有靠近费米面的电子才能吸收热能从而填充到未占据态. 这意味着金属的比热很小, 但会随着温度的升高而线性增加. 这个线性系数被称为索末菲(Sommerfeld)系数, 它大体上反映了金属内部具有最大动量的电子的有效质量. 有效质量与自由电子质量相比通常较大. 这是因为在电子之间存在着相互作用, 当一个电子运动时, 它必须推开邻近的电子.

然而, 在量子相变附近会发生一些戏剧性的变化. 10 年前, 德国 Karlsruhe 大学的 Hilbert von Lohneyson 小组决定测量有量子临界行为的金属的比热^[6]. 他们选择了 CeCu₆, 这种材料加入少量的金就可被调节到磁性(实际上是反铁磁性)量子临界点. 当他们在 CeCu₆ 中加入金时, 发现金属的索末菲

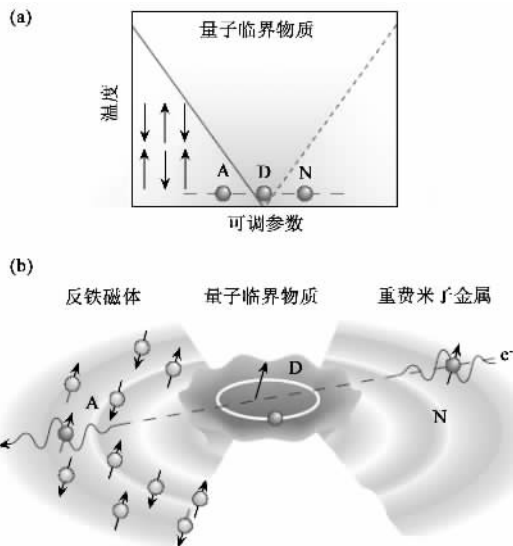


图 2 量子临界态图示 (a)是相图 (b)图描绘量子临界物质在量子临界点上“液滴”的生长. 在相图(a)中, 量子临界点在相图中形成一个自量子临界点出发向有限温度展开的 V 字型. 当物质被调节到量子临界点时, 具有初序的“液滴”生成并不断长大. 在比“液滴”大的尺度上, 电子以波的形式传播. 在“液滴”内部, 强烈的涨落从根本上改变了电子的运动, 甚至能导致电子分离成电荷单元和自旋单元. 在相图(a)中, V 字型区域内的物理研究观察的是量子临界点内部, 而正常金属态(N)和反铁磁态(A)上的物理研究反映的是其外围. 如果量子临界物质是普适的话, 则没有任何关于物质微结构的信息能够穿透“液滴”. 拿黑洞作类比, 从非临界到量子临界的过渡意味着穿过“物质事件视界线”, 从正常态把物质调节到量子临界态会强迫电子穿过相图中“视界线”进入量子临界物质的内部, 最后从那里又穿过第二条“视界线”进入一个崭新的磁有序的宇宙

系数持续增大, 这就像是随着与临界点的接近而导致一种电子在其中变得越来越重的金属. 但在量子临界浓度, 索末菲系数并没有固定在一个常数值. 当他们降低温度时, 索末菲系数仍然继续增大, 似乎费米面上的电子质量变成了无穷大而电子的能量消失了.

Karlsruhe 小组发现了另一令人费解的性质. 在正常金属中, 由于电子之间的相互散射而产生的电阻率随温度的平方而增加, 但在这一体系中, 量子临界点附近电阻率与温度表现出线性关系. 索末菲系数的恒定以及电阻率与温度的平方依赖关系构成了寻常金属的绝对硬性的两大判据. 它们的不成立说

2) Nordita: Nordic Institute of Theoretical Physics (北极圈理论物理研究所), 由芬兰、丹麦、冰岛、挪威与瑞典五个北极圈国家共同组建——译校者注

3) 原文如此. 泡利不相容原理要求在一个系统里两个电子不能处于同一个状态. 但两个状态完全可以有相同的动量, 其不同可由其他变量加以区分——译校者注

明量子临界金属从根本上是一种新型的电子流体。

自从 Karlsruhe 小组首次测量以来,暴露了许多新的矛盾^[7]。量子临界点现在能够通过调节压力^[8]和引入磁场^[9]得到。我们甚至很显然观察到了量子临界线而不是一个孤立点^[10]。所有的结果都显示金属的特征能量在量子临界点降为零。确实,温度本身似乎是存在于量子临界物质中的唯一能量量度。例如在中子散射中^[11],电子受到临界磁涨落的散射速率似乎仅仅依赖于能量与温度之比。线性的或准线性的电阻率是这种现象的另一标志,在一些更奇特的例子中,温度变化三个量级以上它仍能观察到。

越来越清楚的是,虽然物质不能达到在绝对零度的量子临界点,但早在达到量子临界点之前就产生了很多显著的效应(图2和图3)。这一影响将量子临界效应从一个发生在绝对零度时思维上的抽象提升成为现实世界中的、能明显改变有限温度下材料性质的现象。量子临界点在材料相图中表现为某种“黑洞”,这是一个有效的类比。如同宇宙中的黑洞弯曲了周围时空,量子临界点弯曲了相图的结构(图2),以它为中心在有限的温度范围内形成了一个V字形的区域。

量子临界问题之谜的解决

我们在量子临界金属中见到的某些奇异性质印证了 Hertz 的预言以及他理论的扩充^[12],但是这种常规的思维在至少两个重要方面是不合理的。第一,这些效应比 Hertz 预期的要强得多,范围要广得多。第二,反铁磁性这一特例反而是目前为止最不具戏剧性的,向上和向下交互模式的磁效应对几乎所有电子都平均掉了,只有和这种排布干涉相涨的一小部分慢了下来。与此形成鲜明对比的是,实验告诉我们在费米面上每个电子的有效质量都增加到无穷大——本质上说每个电子都静止下来。就像一个世纪前的爱因斯坦一样,我们有一个三十岁的成熟理论却不能解释目前的实验。

目前可供选择的理论在某种意义上与爱因斯坦同时代的理论可相比拟,它们之间存在着很多矛盾。一些人认为如果正确考虑了材料的某些复杂性的话,Hertz 理论有可能得以保留。Karlsruhe 小组则认为在量子临界点处的反铁磁性自旋涨落整体上变为一个二维问题^[13]。在这种情形下,磁层间电子的运动进入湍流模式,于是就可以理解在量子临界物质中它们怎样停止的。唯一的问题是在金属中自旋涨落不一定会变成顽固的二维问题,例如 CeCu_6 中的

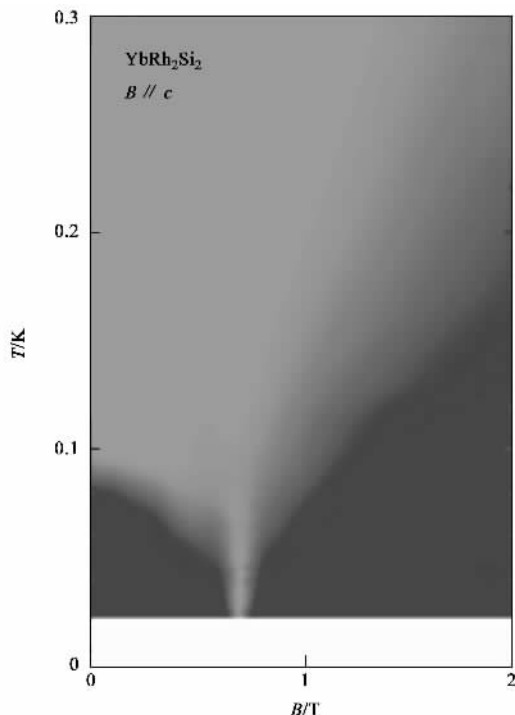


图3 在材料 YbRh_2Si_2 上获取的实验数据显示“相图中的奇点”的存在,调节参数为磁场。深色区域为正常金属态,浅色区域为电阻率随温度线性变化的反常态。在绝对零度处的奇量子临界点的存在使得有限温度上一个较宽的范围内材料表现出反常金属行为

电子就不会被束缚在层上。

另外一些人用 Hertz 原始近似存在的不足之处来解释理论与实验间的差异^[14]。他们指出,在 Hertz 理论中区分磁性涨落与电子并不是很显然合理的,因为磁性本身也正是来自这些电子。加之还有材料本身包含无序(例如原子偏离格点位置)以及为了进行数学推导而作出的那些假设不那么可信等现实问题。

最后,正如瑞利爵士针对金刚石比热问题提出的那样,可能存在第三种可能,即我们确实面临一场危机,量子相变确实需要新的理论框架。那样的话可真的意义非凡,因为目前的理论是现代物理两大基石——温度驱动相变理论和量子力学——的美妙结合。但面对令人困惑的实验结果我们无法不设想这样的可能性。

一些很好的想法也被推到前台。一种是说我们看到的是一种全新的、整个颠覆经典临界态理论的量子临界态。经典临界态运用了静态有序在空间全局生长的观念,Hertz 的理论就采用了全局生长的模型并加入了沿量子时间维度的生长。还有一种提议是量子临界物质中发生的是有序“液滴”在时间

上而非空间上的生长^[15]。在“全局派”和“局部派”两种量子临界理论的支持者之间存在着激烈的争论。另一个可能性就是在量子临界态物质内高度集体化运动环境中的电子“内禀性质”发生分裂。很可能是量子临界态物质中的电子分裂成自旋部分和电荷部分^[16]——就像原子在溶液中分解成离子。这与“去禁闭(deconfinement)临界态”有关。“去禁闭临界态”被用来描述磁性的二维绝缘体中的量子临界点^[17]。唯一的问题是迄今还没有人知道怎样把这些思想运用到三维量子临界金属上。

量子临界态之谜可能对材料科学也十分重要,因为电子通常会在最后一刻对自身进行重组进入一个新的稳定物质相以替代量子临界点强烈的临界涨落。电子有效质量发散以及电子动能坍塌都说明在量子临界点上形成了高度简并态,从而使电子很容易转变成其他可能的稳定的电子构型。

因为这个原因,量子临界态可能是形成新型稳态材料行为的高效催化剂,为新材料的设计和发现提供了一条重要的途径。其中一个方向是超导^[18,19]。高温超导体(目前在液氮温度下超导,期望有朝一日可能会达到室温超导)在达到熔化温度之前,显示出与金属一样的线性电阻率。一些人相信高温超导体和其他在常态下有准线性电阻率的超导体都是由量子临界态引起的。问题是,这个假设很难证明,因为任何改变周围有序度的企图都将同时破坏量子临界态。我们面临的是所谓的“量子难题”^[4]。

许多其他未经确认的相也出现在量子临界点附近。在 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ ^[20] 以及 URu_2Si_2 ^[21] 中,调节磁场使材料达到量子临界点。这些磁场太强以致于电子不能通过形成超导态来避免达到临界点。但是,为了避免面临量子临界点,电子必须找到其他的出口。电阻率甚至是材料形状的突变说明电子形成了一种新的有序态。这是磁序的新形式^[22],还是电子流的重排^[23]抑或两者兼有?我们所知的是电子依然还是可移动的,不过新的电子集体运动的精确规律仍需详细研究。

一百年前,爱因斯坦遥望星空寻找灵感去理解冷的、稳定的、量子物质的属性。今天,临界非稳态量子物质的神秘性质不仅提供了设计新材料的新途径,还为我们寻找实验室研究的物质与宇宙物质间新的联系提供了希望。最近有人提出量子临界可能

同黑洞表面量子引力有关^[24]。而且,量子临界物质中电子“内禀性质”的分离和新型力的出现正可比粒子物理学家所面临的挑战,他们想知道粒子在高压下分裂时新的力是如何产生的。就像100年前星光中光子的灵感引导爱因斯坦解决了稳态量子物质的比热问题一样,一些被认为是早期宇宙中粒子的性质,例如规范理论和超对称性,可能会在实验室中我们的眼皮底下再现。

参 考 文 献

- [1] Pais A. *Subtle is the Lord: the Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford Univ. Press, 1982. Ch. 20. 389—401
- [2] Domb C. *The Critical Point: a Historical Introduction to the Modern Theory of Critical Phenomena*. London: Taylor & Francis, 1996
- [3] Sachdev S. *Quantum Phase Transitions*. New York: Cambridge Univ. Press, 1999
- [4] Hertz J. *Phys. Rev. B*, 1976, 14: 1165
- [5] Laughlin R B, Lonzarich G G, Monthoux P *et al.* The quantum criticality conundrum. *Adv. Phys.*, 2001, 50: 361
- [6] von Lohneysen H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 72: 3262
- [7] Stewart G R. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, 73: 797
- [8] Julian S R *et al.* *J. Phys. Condens. Matt.*, 1996, 8: 9675
- [9] Grigera S A *et al.* *Science*, 2001, 294: 329
- [10] Doiron-Leyraud N *et al.* *Nature*, 2003, 425: 595
- [11] Schröder A *et al.* *Nature*, 2000, 407: 351
- [12] Millis A J. *Phys. Rev. B*, 1993, 48: 7183
- [13] Rosch A. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82: 4280
- [14] Belitz D, Kirkpatrick T R, Rollühler J. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93: 155701/1
- [15] Si Q, Rabello S, Ingersent K *et al.* *Nature*, 2001, 413: 804
- [16] Coleman P, Pépin C, Qimiao S *et al.* *J. Phys. Condens. Matt.*, 2001, 13: R723
- [17] Senthil T, Vishwanath A, Balents L *et al.* *Science*, 2004, 303: 1490
- [18] Mathur N D *et al.* *Nature*, 1998, 394: 39
- [19] Petrovic C *et al.* *Europhys. Lett.*, 2001, 53: 354
- [20] Grigera S A *et al.* *Science*, 2004, 306: 1154
- [21] Kim K H, Harrison N, Jaime M *et al.* *Phys. Rev. Lett.* 2003, 91: 256401/1
- [22] Amitsuka H *et al.* *Physica B*, 2002, 312(3): 390
- [23] Chandra P *et al.* *Nature*, 2002, 417: 831
- [24] Chapline G, Laughlin R B. *Artificial Black Holes*. Eds Novello M *et al.* Singapore: World Scientific, 2002. 179—198
- [25] Custers J *et al.* *Nature*, 2003, 424: 524