

百年回顾(续)

厉光烈 赵洪明



编者按：本刊曾于 2000 年第 1 期至 2001 年第 5 期连载了《诺贝尔物理学奖百年回顾》的系列文章。如今，十个年头过去了，我们将 2001 年至 2010 年诺贝尔物理学奖的情况汇总，再次呈现给读者。

2001 年

埃里克·康奈尔 (Eric A. Cornell, 1961~)、沃尔夫冈·克特勒 (Wolfgang Ketterle, 1957~) 和卡尔·韦曼 (Carl E. Wieman, 1951~) 因在稀薄的碱金属气体中实现了玻色-爱因斯坦凝聚，以及在对这种凝聚物的特性进行早期的基础研究所取得的杰出成就，共同分享了 2001 年度诺贝尔物理学奖。

1924 年，年轻的印度学者玻色撰写了一篇论文，用完全不同于经典电动力学的统计方法，导出了普朗克黑体辐射公式。他将论文寄给著名物理学家爱因斯坦，期望得到后者认同。爱因斯坦马上认识到该文的价值，立即将其译成德文发表。随后，爱因斯坦又将玻色的方法推广应用到单原子理想气体，并预言这些原子当它们之间的距离足够近、热运动速度足够慢时将会发生相变，变成一种新的物质状态——玻色-爱因斯坦凝聚。处在这种状态的气体原子，其总自旋一定为整数，即为玻色子。当温度足够低时，这些原本各自独立的气体原子会变成一群“统一行动”的原子，即“凝聚”在一个相同的能量最低的量子态，形成一个新的宏观物质状态。爱因斯坦的论文发表后，引起了物理学家的普遍关注。经过 70 多年的努力，直到 1995 年，才由美国科罗拉多州博耳德实验天体物理联合研究所(JILA)的康奈尔和韦曼以及麻省理工学院 (MIT) 的克特勒先后在实验中真正获得了玻色-爱因斯坦凝聚。

应当指出，要获得玻色-爱因斯坦凝聚，就必须将单原子气体冷却到绝对零度之上的一亿分之一摄氏度，这是十分困难的。大约在 1990 年，韦曼应

用朱棣文等人发展起来的激光冷却和原子阱囚禁技术，拟定了一个在碱原子中实现玻色-爱因斯坦凝聚的实验方案：先在磁阱中用激光冷却碱原子，然后再应用射频“蒸发”冷却除掉在磁阱中那些速度快的原子，以达到玻色-爱因斯坦凝聚所必需的低温。美国 JILA 小组的康奈尔和韦曼采用上述方案使铷原子系统的温度降低至 170nK，并通过在样品上加上足够快的旋转磁场来避免阱中心原子的丢失，终于在 1995 年 6 月，成功地实现了铷原子的玻色-爱因斯坦凝聚。几乎同时，美国 MIT 普里特查德 (D.E.Pritchard) 小组的克特勒用类似的方法实现了钠原子的玻色-爱因斯坦凝聚。由于他通过聚焦在阱中心的强大激光束来阻止原子的丢失，得到了包含更多原子数的凝聚物，使得测量这些凝聚物的性质成为可能。在这三位诺贝尔奖得主所做的开创性实验之后，又有 20 多个研究小组获得了玻色-爱因斯坦凝聚物。但是，在这个研究领域，这三位诺贝尔奖得主所在的研究小组始终保持着他们的领先地位。

研究玻色-爱因斯坦凝聚不仅有重要的科学意义，而且在芯片技术、精密测量和纳米技术等领域也有非常广泛的应用前景。以芯片技术为例，目前的芯片都是利用普通光线的激光来完成集成电路的光刻，而普通光线的波长是有限度的，所以集成电路的密度已经接近极限。如果利用碱金属原子稀薄气体的“玻色-爱因斯坦凝聚”来完成集成电路的光刻，将会大大提高集成电路的密度，从而大大提高电脑芯片的运算速度。

2002 年

雷蒙特·戴维斯 (Raymond Davis Jr, 1914~2006) 和小柴昌俊 (Masatoshi Koshiba, 1926~) 因在宇宙中微子探测方面所作的贡献，里卡尔多·贾科尼 (Riccardo Giacconi, 1931~) 因发现宇宙 X 射线源，共同分享了 2002 年度诺贝尔物理学奖。

早在 1930 年, 著名理论物理学家泡利 (W. Pauli) 就预言了中微子的存在。由于中微子几乎不与任何物质发生作用, 因此, 尽管每秒有上万亿个中微子穿过我们的身体, 但是我们很难发现它的踪影。25 年之后, 科恩 (C.L.Cowan) 和莱因斯 (F. Reines) 领导的小组第一次通过实验直接证实了中微子的存在。戴维斯和小柴昌俊的工作是进一步证实了太阳中微子的存在。元素核合成理论预言, 太阳的能量来自于核聚变反应。在核聚变反应过程中, 会放出大量中微子。戴维斯通过 $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ 反应来探测中微子, 他的实验装置是一个埋在胡姆斯塔克 (Homestake) 1500 米深矿井中的装有 615 吨 C_2Cl_4 液体的大容器。当液体中的 ${}^{37}\text{Cl}$ 被中微子碰撞后就会放出电子并转变为 ${}^{37}\text{Ar}$, 只要探测到 ${}^{37}\text{Ar}$ 的存在, 便能证实中微子的存在。戴维斯持续了 30 年时间, 才探测到约 2000 个中微子。观测到太阳中微子就直接证明了太阳内部确实进行着核聚变反应。但是, 实验测得的太阳中微子流的强度仅为标准太阳模型预期值的一小半, 这就是 30 多年来人们一直在谈论的“太阳中微子失踪之谜”。小柴昌俊在日本神冈建造了另一台大型中微子探测器, 是一个装有 2140 吨水的大容器, 在水箱的周围装有上千个光电倍增管。中微子有可能与水中的电子或质子相互作用, 产生一个高能电子, 这个电子可引起微弱的闪光, 探测这种微弱的闪光就可证实中微子的存在。小柴昌俊的探测器探测到了来自太阳的中微子, 并证实了戴维斯的实验结果。另外, 小柴昌俊的探测器还探测到了 1987 年 2 月 23 日在大麦哲伦星云中爆发的那颗超新星所释放出的中微子, 这是人类第一次观测到太阳以外的宇宙中微子。

包括太阳在内的所有恒星都在不断地发射各种波长的电磁波, 不仅有可见光, 而且还有我们肉眼看不见的 X 射线、 γ 射线等。由于 X 射线很容易被地球的大气层吸收, 所以要探测来自宇宙空间的 X 射线, 就必须把探测器放入太空中。贾科尼领导研制了世界上第一个宇宙 X 射线探测器“爱因斯坦 X 射线天文望远镜”并首次获得了精确的宇宙 X 射线图像; 第一个探测到了太阳系以外的 X 射线源; 第一个证实了宇宙中存在 X 射线辐射背景; 第一个探测到了可能来自黑洞的 X 射线。另外, 他还倡导研制了“钱德拉 X 射线望远镜”并于 1999 年送入太

空, 这对探测星系、类星体和恒星以及寻找黑洞、暗物质的踪迹有着非常重要的意义。

戴维斯和小柴昌俊在“探测宇宙中微子”方面取得的成就导致了中微子天文学的诞生; 贾科尼在“发现宇宙 X 射线源”方面取得的成就同样导致了 X 射线天文学的诞生。

2003 年

阿列克谢·阿布里科索夫 (Alexei Abrikosov, 1928 ~)、维塔利·金茨堡 (Vitaly Ginzburg, 1916 ~ 2009) 和安东尼·莱格特 (Anthony Leggett, 1938 ~) 由于在超导体和超流体理论方面做出的开拓性的贡献, 共同分享了 2003 年度诺贝尔物理学奖。

1911 年, 荷兰物理学家昂内斯 (H. K. Onnes) 在极低温 (4.15K) 下发现了金属汞的超导电性。直到 1957 年, 物理学家巴丁 (J. Bardeen)、库珀 (L. Cooper) 和施里弗 (R. Schrieffer) 才提出了解释超导现象的 BCS 理论: 超导相的出现, 是由于费米面附近动量和自旋均相反的两个电子在电子-声子相互作用下形成库珀对, 而库珀对作为复合玻色子发生玻色凝聚的结果。昂内斯因对物质低温性质的研究和液氦的制备荣获了 1913 年度诺贝尔物理学奖; 巴丁、库珀和施里弗因发现 BCS 理论共同分享了 1972 年度诺贝尔物理学奖。

在对超导电性深入研究的过程中, 迈斯纳 (W.Meissner) 和奥谢菲尔德 (R.Ochsenfeld) 于 1933 年发现了超导体的迈斯纳效应, 即只要磁场强度小于临界值 H_c , 磁场就进入不了处于超导态的超导体内部, 也就是说, 超导体内磁感应强度总是为零; 而磁场太强, 超导电性则会消失。迈斯纳效应可从理论上解释如下: 超导体在磁场中, 其表面形成了超导的面电流, 称作迈斯纳电流, 它所产生的磁场可以抗拒外磁场在超导体内部的存在。

除了具有迈斯纳效应的超导体, 还有一类超导体具有两个临界磁场强度 H_{c1} 和 H_{c2} 。1953 年, 当时在莫斯科卡皮查物理研究所工作的年轻人阿布里科索夫将其命名为第 II 类超导体, 并对其进行了理论研究。他发现: 当外加磁场强度小于 H_{c1} 时, 它和第 I 类超导体一样有迈斯纳效应; 在 H_{c1} 和 H_{c2} 之间, 磁场以磁通线的形式进入超导体而形成所谓的混合态, 即超导体的基体处于超导态, 而一根一根磁通线的芯子则是正常态, 当磁场强度增加时, 磁

通线的密度增加；最后，当外磁场大于 H_{c_2} ，相邻磁通线正常态的芯子彼此相连，超导体转变为正常态。阿布里科索夫关于第 II 类超导体的研究基础是 GL 理论，GL 理论是 20 世纪 50 年代初期由金茨堡和朗道提出的。这种理论试图描述当时所知道的所有超导体的超导电性和临界磁场强度。金茨堡和朗道认识到，要解释超导体和磁性的相互作用，就必须引入一个描述材料中超导冷凝物密度的序参量，而一旦引入了这个参量，当其达到这个特征值的大约 0.71 倍时，就会出现一个破缺点，而且原则上存在两类超导体。对于水银，这个特征值大约为 0.16，而且，当时所知道的其他超导体的这个特征值也与此接近。因此，当时没有理由要去考虑破缺点以上的值。阿布里科索夫通过计算表明第 II 类超导体精确地具有这些特征值而完善了这个理论。现在我们知道，根据超导体的不同， H_{c_1} 在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 特斯拉范围， H_{c_2} 可达几十特斯拉。第 II 类超导体的特点是能将磁通线固定在其缺陷和应力集中处而降低系统的能量，使系统更稳定，从而“钉”住进入其内部的磁通线，在通大电流的情况下，磁通线也不会因电-磁相互作用而发生运动，产生能量损耗，破坏超导电性。这是第 II 类超导体在强磁场下仍能无阻承载大电流的基础。这个特性导致第 II 类超导体在强电、强磁方面的重要应用，例如，用于制造超导强磁体。

液体 ^4He 是最简单的玻色子体系，其原子具有满壳层的电子结构。 ^4He 的超流现象在 1938 年就由卡皮查 (P.L.Kapitza) 等科学家发现，朗道基于玻色-爱因斯坦凝聚对 ^4He 的超流现象做出了合理的解释。 ^3He 是 ^4He 的同位素，原子核中少一个中子，核自旋为 1/2，是最简单的费米子体系。1972 年，李 (D. Lee)、奥谢罗夫 (D. Osheroff) 和理查森 (R. Richardson) 在 10^{-3}K 级的低温下，发现了 ^3He 的超流相。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 原子匹配成库珀对然后作为复合玻色子发生玻色-爱因斯坦凝聚。不同之处在于：在 BCS 超导体中，电子对的总自旋为零，两个电子是各向同性的；而在超流 ^3He 中，库珀对是各向异性的，每个对要用两个矢量描述。莱格特有关超流 ^3He 理论的中心点是：在超流相变时，发生玻色-爱因斯坦凝聚的这些对的行为必需一致，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，所有对的自旋取向和角动量矢量取向均应相同，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。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。总之，莱格特理论对于了解超流 ^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果提供了理论的框架，特别是，他发现的在凝聚态物质中可以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。

顺便指出：朗道 (Lev Davidovich Landau, 1908~1968) 因对凝聚态物质的开创性研究，特别是创立了液氦的超流动性理论，获得了 1962 年度诺贝尔物理学奖。

2004 年

戴维·格罗斯 (David Gross, 1941~)、戴维·波利策 (David Politzer, 1949~) 和弗兰克·维尔切克 (Frank Wilczek, 1951~) 因发现强相互作用理论中的渐近自由性质而获得 2004 年诺贝尔物理学奖。

1967 年，美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 做了“深度非弹性散射”实验，即用高能量的电子去轰击质子，然后观测散射出来的粒子。实验结果显示，质子内部有更小的夸克，电子和质子的非弹性散射可以看成是电子和夸克的弹性碰撞，而且这些夸克是近乎自由、彼此没有相互作用的粒子。该实验结果，一方面是对 20 世纪 60 年代初提出来的夸克模型的支持，证实了夸克的存在；另一方面却又给物理学家提出了一个难题：夸克既然挤在质子内很小的空间之中，应该是被很强烈地束缚着，怎么可能是近乎自由的呢？

物理学家常用“荷”来表示相互作用的大小，例如，在电磁相互作用中，带电粒子参与电磁相互作用的强度正比于带电粒子的电荷。但是，由于带电粒子使周围真空极化，这对粒子的电荷有屏蔽作用，使观察到的粒子电荷的有效值是屏蔽后的结果，粒子的有效电荷将随着距离粒子的长度的减小而增大。这说明，如果通过高能碰撞来观测带电粒子的有效电荷，那么入射粒子能量越高，离靶粒子就越近，测得的靶粒子的有效电荷就越大。理论物理学

家研究指出：如果一种相互作用是由某种规范场来实现的，则这种相互作用的有效耦合常数随着能量的变化行为与这种相互作用的 β 函数取值有关。若 β 函数为正，则这种相互作用的有效耦合常数随能量的增加而增加，电磁相互作用就是这种情形。

1973年春天，格罗斯和他的学生维尔切克以及波利策分别在《物理评论快报》上发表了两篇论文，提出了SU(3)色规范群下非阿贝尔规范场论可以作为强相互作用的量子场论，其 β 函数是负的。与电磁相互作用中电中性的光子不同，在这一场论中传递强相互作用的媒介子是无质量的胶子，胶子是带色荷的。这种规范相互作用的有效耦合常数随着能量的增加而减小，表现为渐近自由的性质。那么，为什么色相互作用会有渐近自由的性质呢？这是因为夸克带有色荷，而带色荷的夸克会使周围的真空色极化，这将屏蔽夸克，使观察到的夸克色荷的有效值是屏蔽后的结果。这一点与量子电动力学里的情况类似，但是色相互作用规范场的媒介子是胶子，胶子本身也带有色荷，可以放出或吸收胶子，即有“自作用”，而传递电磁相互作用的光子是没有“自作用”的。夸克周围的真空极化中还要包括胶子的贡献，胶子的“自作用”能够产生相反的效果，使得放在真空中的色荷能够吸引真空极化中产生的胶子，在它的周围聚集相同的色荷，造成反屏蔽效应。当反屏蔽效应超过屏蔽效应时，就出现了强相互作用的所谓渐近自由性质。30多年来，世界上各大高能物理实验室做了大量的实验，测量了不同能量下色相互作用有效耦合常数的值，得到它确实是随能量的增加而减少，实验和理论计算符合得很好，渐近自由得到了很好的检验。

由于格罗斯、戴维和维尔切克三位物理学家对渐近自由性质的解释，最终导致了描述强相互作用的量子色动力学理论的建立。

2005年

罗伊·格劳伯(Roy J. Glauber, 1925~)因在光的相干性量子理论方面的贡献，约翰·霍尔(John L. Hall, 1934~)和奥多尔·亨施(Theodor W. Hänsch, 1941~)因在发展基于激光的超精密光谱技术(包括光学频率梳状发生器技术)方面的贡献，共同分享了2005年度诺贝尔物理学奖。

光是人类认识世界的重要工具。早在一个多世纪以前，爱因斯坦就指出了光的波粒二象性。但是，

在1960年激光发明以后，人们发现激光的很多特性难以从理论上加以解释。20世纪60年代，格劳伯利用量子力学建立了光的量子理论，成功地解释了激光(相干光)与白光(非相干光)的区别，这种理论后来发展成一个新的研究领域——量子光学。

光就是电磁波，可以想象其有波峰与波谷，但由于光又具有粒子性，使得由光子组成的电磁场在其描述波峰与波谷特性的振幅与相位上有量子起伏。“相干”就意味着构成光场的光子各自的波长、振幅与相位都比较一致，即光场的量子起伏较小，激光就是符合这种条件的电磁波，因此有很好的相干性。而白光的光子的波长、振幅与相位都不一致，其电磁场的量子起伏较大。量子光学从理论上证实和预见了许多有用的实验现象。例如，它给出了由“量子噪声”所限制的物理实验的测量极限；它提出了一种称为“压缩态”的特殊量子状态，利用这种状态可以使测量精密度大大提高。量子光学的发展也产生了一系列新的应用，如量子密码通信，量子计算等。这些技术为下一代通信和计算机技术的发展开辟了崭新的途径，对于未来科技的进步具有重大影响。

同样是在激光器发明之后，霍尔和亨施开始了激光频率的精密光谱测量的研究。精密光谱是用频率确定的激光照射原子、分子系统而得到的。这里有一个前提，就是要求激光频率非常单一和稳定。但实际上激光频率总有一个分布范围，叫做“线宽”，而且总随时间而变化。因此，要得到精密光谱，首先要压缩激光的线宽，把激光频率做得非常稳定。在这方面，他们两人都取得了空前的成就。他们发展了甲烷分子等稳频激光技术和饱和吸收光谱技术，精密地测量了光速，并利用激光精密测量技术测定了氢原子1S-2S的跃迁波长以及相关原子、分子的结构、跃迁几率等参数，由此大大提高了里德伯常数、超精细结构常数等重要物理常数的精度。霍尔和亨施还共同发展了飞秒激光光梳技术，其基本思想是将在时间域内等间距的脉冲激光转换到频率域变成等间距的频率梳。由于频率梳的间隔是已知的，很容易通过已知的激光频率来测定未知的激光频率。因此，这种光频测量为开发“光钟”奠定了基础。所谓“光钟”，就是光波频率的原子钟。利用精密光谱做成的光钟，可以把定时的准确度和稳定度从现在无线电波原子钟的15位数提高到18位

数。激光精密测量技术，特别是飞秒激光光梳技术，不但为验证基本物理常数、检验广义相对论与狭义相对论、测量脉冲星以及原子与分子精密光谱测量等基础研究提供了新的方法与技术，也将为应用领域，如时间与频率计量、长距离时钟同步、甚长基线干涉测量（VLBI）、高精度全球定位系统、遥远星空跟踪与探测、地球旋转的监测、无线网络同步等提供新的技术。

2006 年

约翰·马瑟（John Mather, 1946~）和乔治·斯穆特（George Smoot, 1945~）因对宇宙微波背景辐射的黑体谱和各向异性的发现而分享了 2006 年诺贝尔物理学奖。

1915 年，爱因斯坦发表广义相对论，为宇宙学的研究奠定了理论基础。1929 年，哈勃发现宇宙在膨胀，表明宇宙曾经有过一个起点，这促使伽莫夫于 1946 年提出宇宙大爆炸学说：宇宙是从一个均匀的高温高密状态经膨胀降温降密演化而来的。这个学说可以通过计算来描绘宇宙的演化历程，结果表明：宇宙大爆炸至今，它的黑体谱温度应降到约 3K。彭齐亚斯和威尔逊于 1964~1965 年间所发现的微波背景辐射正具有这种性质，他们测定出的温度为 $3.5 \pm 1.0\text{K}$ ，这给予了宇宙大爆炸学说以直接的、有力的支持。

彭齐亚斯和威尔逊观测到微波背景辐射的一个主要特征，就是在空间分布上具有高度各向同性。但是，如果完全没有各向异性，就不可能形成今天的星系和星系团这种大尺度结构。为了解释这种大尺度结构，如果宇宙间只存在普通的可见物质，那么，可以估算出：微波背景辐射应有 10^{-3} 量级的各向异性，而在计及暗物质后，因暗物质更有利于引力成团效应，微波背景辐射各向异性的估算值就要降低到 10^{-5} 。能否观测到这个量级的各向异性，就成为对宇宙大爆炸学说的重要检验。

1974 年，马瑟提出了宇宙微波背景探测卫星（COBE）计划，并和斯穆特展开了合作。在 COBE 项目中，马瑟负责总体协调，斯穆特则主要负责测量宇宙微波背景辐射的各向异性。由于种种原因，这颗卫星直到 1989 年才得以升空。COBE 成功地记录了宇宙微波背景辐射谱，它非常精确地符合温度为 $2.728 \pm 0.004\text{K}$ 的黑体辐射谱。COBE 的这一发现比彭齐亚斯和威尔逊的工作更令人信服，更确切地

验证了宇宙大爆炸学说。斯穆特领导的 COBE 组确实测出了 10^{-5} 量级的各向异性。因为这个各向异性是现今星系和星系团的早期种子，也是人们所能直接拍摄到的最早、最远的宇宙幼年的照片，因此，斯穆特戏称这是看到了“上帝”的脸！

COBE 的工作开启了“精确宇宙学”时代的大门，支持并完善了大爆炸宇宙学，使之可以自恰地描写从宇宙极早期的量子涨落直到现今星系、恒星组成的宇宙大尺度结构，而微波背景辐射的各向异性正是这个宇宙演化的中转证据，它所代表的复合时期的前后两个阶段的演化也得到了合理的衔接。

2007 年

阿尔贝·费尔（Albert Fert, 1938~）和彼得·格伦贝格（Peter Grünberg, 1939~）因发现巨磁电阻效应，共同分享了 2007 年度诺贝尔物理学奖。

传统电子学只考虑电子电荷移动导致的与电子自旋无关的电流。150 多年前，著名物理学家开尔文勋爵在铁磁性金属中测量到磁场引起的电阻变化，其变化率在 3% 到 5% 之间，也就是说，在磁场中，电荷的流动是与电子自旋有关的。

格伦贝格长期致力于铁磁性金属薄膜表面和界面的磁有序状态的研究，其研究对象是一个“三明治”结构的薄膜：两层厚度约 10nm 的铁层之间夹有厚度为 1nm 的铬层。之所以要选择这样的材料系统，一方面是因为，金属铁和铬都是周期表上相近的元素，具有类似的电子壳层，容易实现两者的电子状态匹配；另一方面，金属铁和铬的晶格对称性和晶格常数都相同，它们之间晶格结构也是匹配的。1986 年，格伦贝格和他的同事采用分子束外延（MBE）方法制备薄膜，样品成分还是“三明治”结构的铁-铬-铁三层膜，只是样品已经为结构完整的单晶。他们发现：在铁-铬-铁“三明治”中，两边的两个铁磁层的磁矩可以从较强磁场下的彼此平行转变为弱磁场下的反平行，换句话说，对于非铁磁层铬的某个特定厚度，没有外磁场时，两边铁磁层的磁矩可以是反平行的。而且，两个磁矩反平行时，对应高电阻状态；平行时，对应低电阻状态，这种电阻的差别可以高达 10%。

1988 年，费尔小组将铁、铬薄膜交替制成几十个周期的铁-铬超晶格，他们发现：当改变磁场强度时，超晶格薄膜的电阻下降近一半，即磁电阻比率达到 50%。他们称这个前所未有的电阻的巨大变化

为巨磁电阻（GMR）效应，并且指出：GMR 效应的物理机制来源于英国物理学家莫特（N.F. Mott）于 1936 年提出的“两电流模型”。在较低温度下，电子自旋弛豫长度（即移动中电子自旋方向保持不变的距离）远远大于平均自由程，因此，在讨论电子输运过程（电阻行为）时，假定散射过程中移动电子的自旋方向保持不变是合理的。所谓“两电流模型”，就是将电子按照自旋取向（向上或向下）分成两类来处理：总电流是两类自旋电流之和；总电阻是两类自旋电流的并联电阻。显然，周期性多层膜可以被看成是若干个格伦贝格“三明治”的重叠。因此，费尔和格伦贝格分别独立发现的实际上是同一物理现象。

在 GMR 效应发现前后，磁盘存储技术正举步维艰。由于数据存储点需要有足够的磁场，因此不能做得太小，否则磁场太弱无法检测。当时人们认为，磁电阻效应很难再有大的提高，磁场传感器的灵敏度也不可能再有质的飞跃，因此无法大幅度地提高硬盘的存储密度，只能用光盘取代磁盘。1997 年，基于 GMR 效应的硬盘读出头进入市场，使硬盘的记录密度、容量和小型化程度不断提高，从而解决了上述难题。最近出现的灵敏度更高的隧道结磁电阻读出头更是 GMR 效应的进一步发展。GMR 效应的发现开创了一个新的分支学科——自旋电子学。该学科，同时利用电子的电荷和自旋这两个特性，进行自旋相关导电机理、层间交换耦合、隧道结磁电阻、庞磁电阻、磁性半导体和自旋注入的理论与实验研究，以及磁性随机存储器和磁性逻辑元件等的开发与应用研究。

2008 年

南部阳一郎（Yoichiro Nambu, 1921 ~）因发现亚原子物理的对称性自发破缺机制、小林诚（Makoto Kobayashi, 1944 ~）和益川敏英（Toshihide Maskawa, 1940 ~）因发现对称性破缺的来源并预言自然界存在三代夸克，共同分享了 2008 年度诺贝尔物理学奖。

1911 年昂内斯发现了金属汞的超导电性；1957 年，巴丁、库珀和施里弗提出了解释超导现象的微观理论——BCS 理论。1959 年，南部试图从量子场论的角度来理解 BCS 超导理论，他发现，超导现象背后的基本物理是对称性及其破缺，理解超导理论的关键在于对称性的自发破缺。他还将对称性自发

破缺机制引入粒子物理学领域，发现：当有质量为零或近似为零的赝标量粒子出现时，就意味着理论中一个精确的或近似的对称性自发破缺了。

1961 年，哥德斯通发表文章指出：在量子场论中，当系统拉氏量的连续对称性自发破缺时，就会出现质量为零的玻色子。这类伴随着对称性自发破缺出现的零质量粒子，后来被称为南部-哥德斯通玻色子。对称性自发破缺之所以重要，是因为它直接导致了弱电统一理论的建立。1964 年，英国物理学家希格斯等发现：如果系统具有连续的局域对称性，也就是规范对称性，那么该对称性的自发破缺并不会引入质量为零的南部-哥德斯通玻色子，而是使相应的规范玻色子获得质量。这种形式的规范对称性自发破缺，后来被称作希格斯机制。1967 年，温伯格首次完整地建立了统一描述弱相互作用和电磁相互作用的弱电统一理论。该理论认为，当弱电对称性自发破缺后，规范玻色子吸收掉三个南部-哥德斯通粒子而获得质量，成为中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 ，剩余自由度对应一个标量粒子，即希格斯粒子。弱电统一理论与描述强相互作用的量子色动力学一起被称为粒子物理学的标准模型。现今，标准模型所预言的中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 已经在实验中全部被发现，但是，被戏称为“上帝粒子”的希格斯粒子一直未发现。

1973 年小林和益川发表了题为《弱相互作用可重整化理论中的 CP 对称性破坏》的文章，把温伯格模型推广到强子系统，旨在找出标准弱电相互作用理论中 CP（电荷-宇称）对称性破坏的来源。他们直接从拉氏量出发，在逐一检查了各个相互作用项的 CP 变换性质之后，把可能的 CP 破坏的来源归结于带电流相互作用中的 CKM 矩阵，并且指出：当标准弱电模型包含三代六个夸克时，CKM 矩阵可以被三个欧拉角和一个复相位参数化，后者就是 CP 破坏的来源。1977 年和 1995 年，实验上先后发现了小林和益川预言的第三代的底夸克和顶夸克。另外，小林和益川还指出：B 介子有可能是研究 CP 对称性破坏的最理想的场所，这也被 2000 年至 2001 年间在美国 SLAC 和日本 KEK 的 B 介子工厂的实验所证实。如今 CKM 矩阵中的三个夸克混合角和一个 CP 破坏复相位都得到了相当精确的实验测量，并且不同的测量方式所取得的实验结果相互自洽。

2009 年

高锟（1933~）因在光在纤维中传输以及将其用于光学通信方面取得了突破性成就，威拉德·博伊尔（Willard Boyle, 1924~）和乔治·史密斯（George E. Smith, 1930~）因发明了半导体成像的电荷耦合器件（CCD）的图像传感器，共同分享了 2009 年度诺贝尔物理学奖。

信息产业的巨大发展应该归功于电子和无线电技术的进步。电话用户急剧增加、电视播送迅速发展，都要求更高的传输容量。20 世纪 50 年代，金属电缆通信已发展到极限，不再能满足日益增长的通信需求。相比之下，红外线或可见光能够承载的信息容量要比无线电波高出千万倍，因此，光通信因其巨大的潜力而成为人们研究的热点。但是，当时用来传输光信号的光纤是用硅玻璃或高分子有机材料制造的，而学术界普遍认为：用玻璃导光，信号衰减非常大，所以很多人放弃了这方面的研究。

1966 年 1 月，高锟发表论文指出：光纤高损耗并不是硅玻璃本身产生的，而完全是由杂质产生的。为了说明高纯度石英光纤的传输损耗可以下降到很低，他具体计算了光在这种光纤中的传输距离，发现完全可以达到 100 千米以上。6 月，高锟与其合作者又发表文章，详细分析了光波在圆柱形波导光纤中的传播，深入讨论了引起光波衰减的散射和吸收效应、信息容量以及其他相关问题，并提出一种带有包层、用玻璃材料制作的光纤将在未来的全新的通信中具有实用价值。他们还进一步预言：光纤损耗可达到 20dB/km，甚至更低。1970 年，康宁公司研究出损耗降低到 20dB/km 的光纤，它标志着传播技术将有重大突破。

在光纤中传播的光波经过“调制”，把电话、电视等信息荷载到光波上，就可以沿光纤远距离传播。光纤传输不受外界电磁场的干扰，性能稳定，具有非常大的带宽，容量极大，而且光纤不会生锈变质，制造、铺设光缆的费用又较低，因此，近年来发展得非常快，可以说，光纤和光纤通信的出现已经成为光学发展史上的一个重要里程碑。光纤、光缆已形成巨大的产业。据统计，1998 年，全球光缆消费量为 146 亿美元，到 2008 年，已增长至 400 亿美元以上。

CCD 技术的核心是光电效应的应用。所谓光电效应，就是当光线照射到金属表面时，会有电子从

金属中逸出现象。该现象是赫兹在 1887 年发现的；1905 年，爱因斯坦提出了光子的概念，成功地对它进行了解释。通过光电效应，光信号可被转变成易于后续处理的电信号。1970 年，威拉德·博伊尔和乔治·史密斯首先提出了 CCD 的概念，随后又建立了以一维势阱模型为基础的 CCD 基本理论。CCD 的发明，使得在短时间内规则地捕捉读取光信号成为可能。

CCD 成像探测器的主要功能是：光电转换、电荷储存、电荷转移、电子图像的生成和输出。CCD 的基本单元（像元）是光敏二极管。所谓光敏二极管，就是由杂质浓度较低的 p 型硅片作衬底，在其上扩散一个 n⁺区，形成的 p-n 结二极管。在硅片表面覆盖一层二氧化硅绝缘层，在其上做有金属铝电极，当对该电极施加正偏压时，在硅片靠近绝缘层附近就形成空穴耗尽区，它将随正偏压的增大而向硅片内部延伸，于是就形成所谓的 CCD 势阱。当光照射到光敏单元上时，会激发出光电子，这些由入射光激发出的光电子注入上述势阱存储起来，便实现了 CCD 的光电转换和储存。当相邻金属电极的正偏压不同时，在硅片的对应处就形成不同深度的势阱。如果对相邻的各电极施加按一定规律变化的偏压，硅片上相邻的势阱深浅就会按一定规律变化，存放在势阱内的电荷就会随势阱的深浅变化而由浅势阱转向深势阱。这样，当相邻电极的偏压按节拍由小到大变化时，在势阱内的电荷就会沿势阱由浅至深的方向转移，实现了电荷的转移，亦即电信号的传输。

经过四十多年的不断发展，CCD 已经成为从哈勃望远镜、登月空间飞行器和火星探测器到我们日常生活中的很多用具，如手机、照相机、电视等都离不开的成像探测器。

2010 年

安德烈·盖姆（Andre Geim, 1958~）和康斯坦丁·诺沃肖罗夫（Konstantin Novoselov, 1974~）因在石墨烯材料方面的卓越研究，分享了 2010 年度诺贝尔物理学奖。

金刚石和石墨是人们熟悉的三维结构碳材料。1985 年，零维富勒烯的发现第一次从维度上丰富了碳材料。1991 年，碳纳米管的出现再一次将碳材料的维度扩展到一维空间。当零维、一维和三维的碳材料被成功合成后，探寻碳的二维晶体结构成为材

料科学领域的热点。

对二维晶体结构实际存在的可能性，科学界一直存在着争论。传统理论认为，准二维晶体结构因为本身的热力学不稳定性，在通常条件下会迅速分解，自然界中不能稳定存在。2004年，盖姆和诺沃肖罗夫首次从高定向热解石墨上成功分离出单层石墨片——石墨烯。盖姆等人采用了一种微机械剥离法分离制备出石墨烯。首先将具有多层结构的高定向热解石墨剪裁成较小的碎片。然后挑选出其中较薄的碎片，用胶带粘住，把有黏性的一面对折，再把胶带撕开，石墨薄片就会一分为二。不断重复这个过程，石墨片越来越薄，最终即可得到只有一层原子厚度的石墨烯。石墨烯是由单层碳六元环紧密排列而成的二维蜂窝状点阵结构。那么，石墨烯的出现是否真正颠覆了传统理论呢？实际上，石墨烯是表面有众多微小起伏的“准”平面结构。另外，在微米尺度，自由悬浮的石墨烯表面存在褶皱，或边缘发生卷曲。从这个角度来看，石墨烯的存在与理论是不矛盾的。

目前，石墨烯已经一跃成为万众瞩目的研究热点。这不单是因为其结构的特殊，更因为其重大的

研究价值，包括独一无二的性能和诱人的应用前景。我们知道，研究相对论和量子力学，需要极为苛刻的研究条件和设备，例如超低温、超真空条件或巨型加速器。但是，石墨烯的诞生改变了这个状况。在石墨烯中可以对相对论力学的诸多效应和量子霍尔效应进行直接验证。这是因为电子在石墨烯中的运动不能用经典的理论来解释，电子呈现出与经典半导体完全不一样的运动规律。石墨烯的能隙为零，电子在运动时几乎不受任何束缚，速度可以达到光速的1/300，且表现为无质量的相对论粒子。石墨烯可以作为“微型加速器”，为相对论的研究提供了全新的研究思路和方法。石墨烯晶体管的性能将远优于硅晶体管，在未来的应用中，石墨烯极有可能成为下一代半导体元器件的核心材料。另外，人们利用石墨烯优异的光学性能来制备液晶显示屏。目前，已实现了石墨烯在太阳能电池、液晶显示器、触摸屏等领域的应用。而且，由于其结构的特殊性，可以预见，石墨烯构成的高强度、低密度、超薄、柔性结构和器件，将对人类未来生活产生深远的影响。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

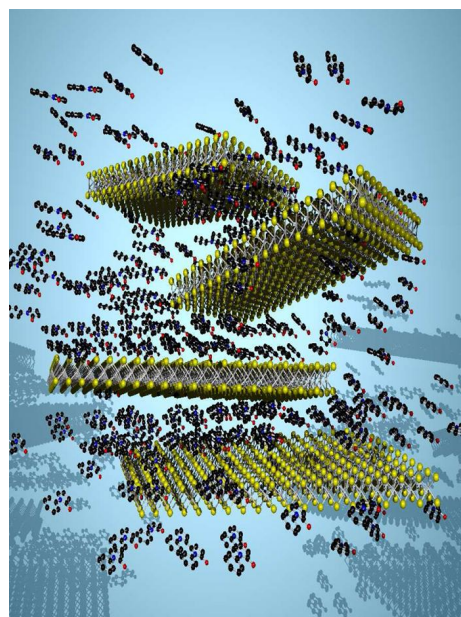


科苑快讯

单原子层纳米片新技术

英国牛津大学的尼克罗西 (Valeria Nicolosi) 和爱尔兰三一学院的科尔曼 (Jonathan Coleman) 领导的国际研究小组研发出以超声波脉冲和普通溶剂制备单原子层纳米片的新技术。该技术糅合了最近荣获诺贝尔奖的石墨烯技术，简单、廉价、高效，可实现大规模工业化生产。

他们以该技术开发了大量的纳米片新材料，包括氮化硼、二硫化钼、碲化铋，它们在新型电子设备、超强复合材料、能量生产储存中显示出卓越的性能。这些新材料将成为重要的热电材料，以其制造的热电设备可从燃气、石油、煤电站的废热中提取热量，效率高达70%，而且成本低廉、过程简单。这些新材料还可用于称为“超级电容器”的下一代电池，其效率比目前的电池要高成千上万倍，从而使电动汽车等工业技术的水平获得极大地提升。



(高凌云编译自2011年2月4日澳大利亚广播公司科技新闻)