

超导“小时代”之十三 双结生翅成超导

罗会仟[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-10-27收到

[†] email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20161107

四张机，鸳鸯织就欲双飞。可怜未老先白头，春波碧草，晓寒深处，相对浴红衣。

——《古乐府诗词·九张机》

白居易在《长恨歌》里这样描述唐明皇和杨贵妃的爱情：“在天愿作比翼鸟，在地愿为连理枝。天长地久有时尽，此恨绵绵无绝期。”自古以来，我们的自然界多种动物乃至人类，都更喜欢一夫一妻制的配对。这是繁衍后代的本能需求，也是克服孤独苦寂的最佳方式，满足了生存的生理和心理双重需要(图1)。正所谓“男女搭配、干活不累”，成双入对的方式极大提高了人们生活效率，每一个单身汉都痛恨“对月形单望相护”的惨境，盼望有朝一日能“只羡鸳鸯不羡仙”。

从生物学来看，很多事物都和两两成对有关。比如从生理结构上往往有两只脚、两只手、两个耳朵、两只眼睛、两扇翅膀……，从社会行为上有“一山不容二虎、除非一公一母”，从生活工具上有一双筷子、一副对联、一对铤钹……。 “有点二”的世界，就是这么有趣。

在物理学中，“二”这个数字，并不奇怪。我们生活的世界，就是一个充满二元极性的世界。正如老子在《道德经》言道：“太极生两仪、两仪生四象、四象生八卦”，古人朴素哲学思想里认为“万物负阴而抱阳，冲气以为和”，从二出发，才演生出我们的纷繁复杂的世界。自然界的电荷分正负两种，粒子分正反两类，磁极也分南北两极，量子有波粒二象性，电子自旋分上下两种状态……，似乎很多物理研究对象只需要两两成对的数字就可以了。非常有趣的是，一些著名的物理定律也是和二有关，比如库仑定律和万有引力定律都是遵循平方反比的形式，氢原子光谱体现出平方倒数差的规律，狭义相对论表征距离公式是微分二次型^[1]。

诚然，对于单体系统，物理学往往可以给出精确的描述。自从有了“二”，物理世界就变得极其复杂

肯定，没有谁能够给出精确的数学理论。好在布里渊、布洛赫、费米、朗道等人的固体量子论给了我们方便，微观世界的原子是周期排列的，因此可以大大简化理论模型。相对原子来说，电子的尺寸要小的多得多，电子在原子间隙中穿梭空间非常巨大，倘若电子浓度足够低，电子—电子之间相互作用非常弱，就可以把电子独立开来研究。只要理解了其中一个电子的运动行为，就可以推而广之描述这一群电子的行为。于是，又回到了数量为一的物理学问题，处理起来似乎轻松多了。这种既简单又显懒惰的方法一方面给固体物理学家带来了许多方便，另一方面却也带来了不少麻烦，甚至引人进入了死胡同牛角尖出不来。从一跨越到二的物理学，看似容易，实则艰难。

在寻找常规超导微观机理的漫漫征程上，一部分物理学家用“神似”的唯象理论成功解释了超导是二级热力学相变，另一部分物理学家则在不断寻找导致电子在固体材料中“畅行无阻”的微观相互作用。如上篇提及，不少著名的物理学家都折戟沉沙，他们距离正确的超导微观理论，恰似十万八千里之遥^[2]。也有少数几个幸运的物理学家，离最后的微观理论，只隔着不

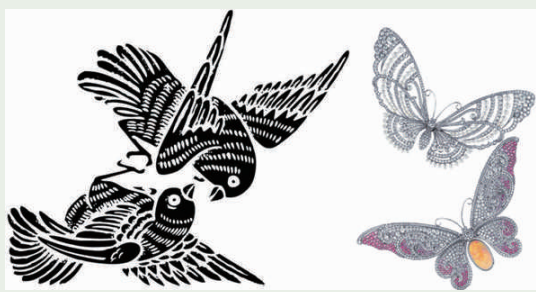
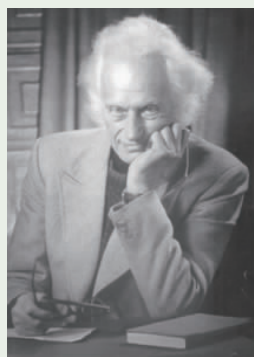


图1 比翼鸟与双飞蝶(来自昵图网)

到一毫米的窗户纸。例如赫伯特·弗勒利希(Herbert Fröhlich)、戴维·派因斯(David Pines)、李政道、约翰·巴丁(John Bardeen)等人(图2),始终坚持如一并最终捅破窗户纸的是巴丁,常规超导微观理论于1957年终于被建立。为啥独有巴丁能获得成功?回顾并思考这段有趣的历史,不禁令人感慨唏嘘。

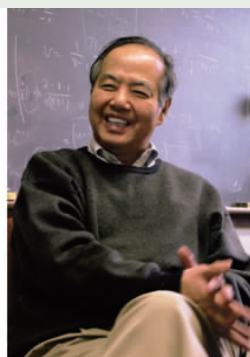
1908年5月23日,约翰·巴丁出生于美国威斯康辛州麦迪逊的一个科学与艺术之家。父亲是威斯康辛大学医学院第一任院长,母亲是一位艺术家。巴丁从小就聪明过人,小学连跳三级,15岁高中毕业,20岁从威斯康辛大学电机工程系毕业,随后一年内拿到了硕士学位。毕业后的巴丁曾从事三年的地球磁场及重力场勘测方法研究,可能是他觉得这类研究距离前沿物理太远,于是决定“回炉重造”,于1933年到普林斯顿大学跟著名物理学家维格纳(E. P. Wigner)学习固体物理学。恰恰是这一年,超导理论研究形成了分水岭,因为迈斯纳效应的发现,之前忙于解释零电阻的科学家,又得焦头烂额地去解释完全抗磁性,一大批所谓超导理论就此宣告失败。巴丁前后在哈佛大学、明尼苏达大学、美国海军实验室、贝尔实验室、伊利诺伊大学香槟分校等地工作,在最后一个单位工作长达20余年。从博士生、博士后到助教的岁月里,年轻的巴丁就对超导问题跃跃欲试,奈何当时能力有限而无所建树。二战的来临也影响了巴丁的学术生涯,他于1941—1945年在美国海军实验室从事军械研究,战后加入了著名的科学家摇篮——贝尔实验室,在那里,他做出了一生中第一个重要的科学贡献。1945年7月,贝尔实验



Herbert Fröhlich
(1905—1991)



David Pines
(1924—)



李政道
(1926—)

图2 距超导微观理论最近的几位物理学家(来自英文维基百科)

室成立半导体物理小组,目标是“研制具有三端电极的半导体电子放大器件”。巴丁和同事布拉顿(W. H. Brattain)的主要任务,就是验证团队组长肖克利(W. B. Shockley)提出的场效应思想,也就是利用电场来控制半导体器件中的载流子浓度。巴丁从理论上探讨了器件的原理,并于1947年11月21日设计了第一个半导体放大器,心灵手巧的布拉顿克服了实验困难,终于制作成功了世界上第一个点接触半导体晶体三极管,肖克利在此基础上又成功发明了第一个半导体PN结晶体管(图3)^[3]。半导体广阔应用,从此拉开帷幕。尽管世界上基于晶体管的第一个计算机ENIAC重达30吨,但半导体工业的发展速度是十分惊人的,如今电脑、ipad、智能手机已是身轻如燕,走入到人们生活的每一个角落之中。晶体管的发明让肖克利、巴丁、布拉顿三人摘得1956年的诺贝尔物理学奖,巴丁也因此当选为美国科学院院士,但这只是巴丁精彩科学生涯的一幕而已。

刚刚在半导体方面做出突破的巴丁,目光早就转移到他一直钟情的超导问题上了。1950年5月美国国家标准局的科学家塞林(B. Serrin)等通过精确测量金属汞的各个同位

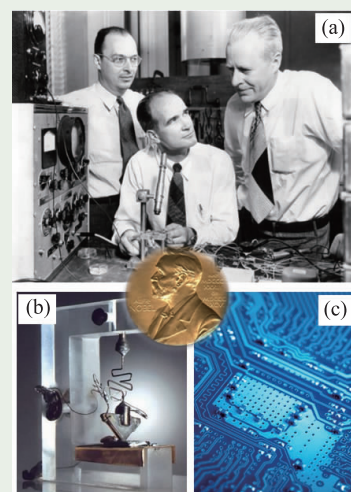


图3 (a)晶体管发明者巴丁、布拉顿、肖克利;(b)世界上第一个晶体管;(c)现代集成电路中的晶体管(来自英文维基百科)

素超导温度,发现超导临界温度实际上和同位素质量开方成反比(图4)^[4]。塞林打电话告诉了贝尔实验室的巴丁,巴丁显得异常兴奋,他敏锐意识到超导同位素效应的物理本质——原子质量的开方正好与原子振动能量相关,这意味着超导电性和原子晶格的振动有必然联系。加上当时的超导唯象理论和实验均已表明超导电性是材料内部电子体系的二级相变,几乎可以断定,超导的“幕后推手”极有可能来自于电子和原子晶格之间的相互作用。1951年5月24日,巴丁毅然从高薪的贝尔

实验室转到伊利诺伊大学教书，新的目标直接瞄准超导问题。

1950年6月，巴丁将关于超导电性可能起源于电子和晶格振动量子(声子)相互作用的学术思想写成一篇论文并发表。接下来为全面解决超导机理问题，他做了非常细致的文献调研，记录了数百页的笔记，并积极寻找理论家开展合作探索研究。巴丁和弗勒利希首先从理论上证明了电子通过交换声子相互作用，可以产生一种净的吸引作用^[5]。这是十分大胆的推测，因为常识认为电子都带负电，库仑相互作用的结果是两两相斥，何来吸引？实际上，这种吸引相互作用是间接产生

的，就像冰面上的两位舞者互相抛接球一样，原子晶格振动就是那个球，让两个电子间形成了微弱的吸引作用。弗勒利希简化理论模型到一维电子晶格系统，预言了一种新型的电荷密度波并被实验验证，他在核物理和固体物理领域均做出了重要贡献，只是在超导微观理论领域差了临门一脚就离开了^[6]。理论物理学家费曼听说巴丁的工作后，马上明白他们的理论关键在于要给出合适的方程解，但他饶有兴致地用传统的量子力学处理方法——微扰论来解巴丁的方程时则郁闷了，成功似乎遥遥无期^[2]。1952年，派因斯刚刚完成关于金属中等离激元的博士毕业论文，就和李政道等合作，借鉴了核物理理论中间接相互作用的相关模型，提出了一个基于“极化子模型”的金属导电理论^[7]。巴丁随即和派因斯写出了——一个比较完整的电子—声子相互作用下的理论模型，同样由于模型过于复杂而没能得到合适的方程解^[8]，不过这距离真正的超导微观理论，已经非常之近了！

巴丁没有放弃理想，他总结失败的教训如下几点：电子—声子互

作用应该是对的，现有理论方程是错的或不准确的，要解出合适的答案还需要借助新的理论工具——如费曼发明的量子场论而不是传统的量子微扰论，无电阻的超导态相对有电阻的正常金属态应该是一个能量较低的稳定态——即两者之间存在能隙。

明确了问题所在，巴丁更加坚定地朝着胜利的曙光走去^[3]。

为了赢下超导这场攻坚战，巴丁决定组建一支具有生命力的年轻队伍，形成导师—博士后—研究生梯队。他让年轻的李政道和杨振宁从哥伦比亚大学推荐了一位得力博士后——库珀(Leon Cooper)，时年25岁的库珀之前主要从事生物学研究，在1955年9月加入巴丁研究组之前几乎对超导一无所知，这或许是他的幸运之处，因为他对无数重量级前辈的失败尝试将无所畏惧。巴丁故意把库珀安排和他同一个办公室，不断敦促他阅读文献资料，并给了他第一个课题——在电子体系存在弱吸引相互作用下如何才能产生一个能隙，这可是巴丁一直百思不得解的难题！就这样过了几个月，库珀仍毫无收获，非常郁闷和烦恼，对自己这个课题一度迷惘。圣诞节假期回来后，库珀重新理清了一下思路，面对复杂的多电子体系，他干脆一不做二不休，把研究对象简化到了两体问题：一对相互作用电子同时满足动量相反和自旋相反两个条件。库珀是幸运的，他这个简化一下子抓住了物理的本质，很快就推导出能隙的存在。也就是说，一对电子之间倘若存在弱的吸引相互作用，只要满足动量相反和自旋相反，就可以实现稳定的低能组态！那么，巴丁关于超导起源于电子—声子相互作用的设想，从理论上来说，是完全可行的^[9]。下一步的关键，是寻找到适合的理论方程和其合理解，任务落到了另一个更加年轻的人身上。

1955年，巴丁从麻省理工学院招来一名有着电子工程学习经历的研究生——24岁的施莱弗(John Schrieffer)。估计是与这位同名不同

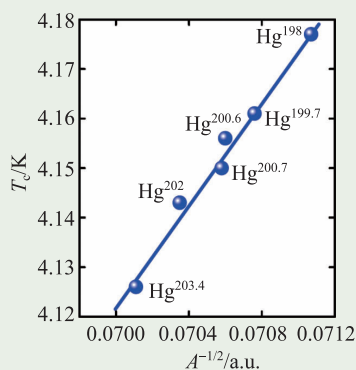


图4 金属汞中超导临界温度的同位素效应

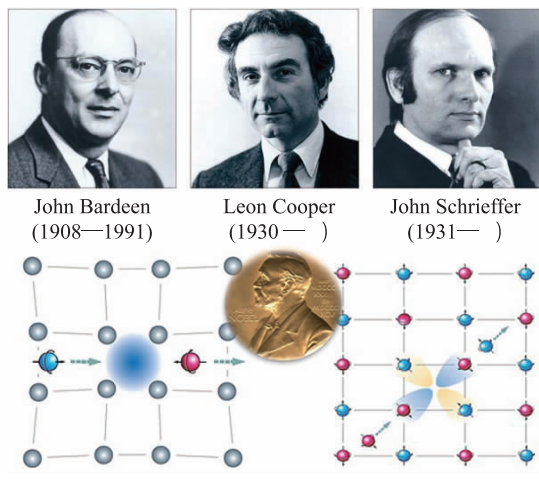


图5 超导微观理论“BCS理论”(来自英文维基百科)

姓且专业出身类似的年轻学生有惺惺相惜之情，巴丁一下子给了施隶弗10个研究课题任由他选择，并把难度最大的超导问题列为第10个。施隶弗面临选择困难时候，问了派因斯和李政道的合作者 Francis Low，得到的回答是：既然你这么年轻，那么不妨浪费一两年青春到超导这样的难题上，说不定有所收获呢！于是施隶弗撩起袖子就和超导杠上了，同样，年轻，无所畏惧，结果也是，难有进展！1956年，巴丁在高高兴兴跑去斯德哥尔摩领关于三极管发明的诺贝尔物理学奖之前，特别叮嘱学生施隶弗抓紧科研工作，期待回来讨论一下。施隶弗小紧张了好一段时间，估计也没少找库珀诉苦过，或找派因斯和李政道等人聊天。偶然一次粒子物理学家的学术报告中，他发现粒子物理里面的 Tomonaga 变分法可以借鉴过来，在回来地铁上就写出了关于超导电子系统的波函数。第二天施隶弗势如破竹地成功解出了超导的方程，在机场和库珀碰面并告诉他这个突破，回到学校两人便跟巴丁汇报了进展^[10]。

巴丁对施隶弗完成的小目标非常满意，也迅速意识到其重要性。接下来他给施隶弗和库珀两人定下来一个大目标——彻底解决常规超导微观理论！为此，三个人闭门修炼了多个月，各自分工，用他们尚未成型的理论去计算解释目前超导实验观测到的各种现象。结果非常完美，他们仨完全从理论上解释零电阻、比热跃变等奇异的超导性质。于是他们赶紧发表了关于超导微观理论的第一篇论文^[11]，并在1957年的美国物理学会年会上进行了报道。随后，他们也实现了迈斯纳效应的理论解释，并发表了第二

篇超导理论论文^[12]。系统化的常规金属超导微观理论，从此宣告诞生，后以三人名字的首字母命名为“BCS理论”^[10]。特别是超导的载体——配成对的超导电子对，又被命名为库珀对。巴丁的执着，终于换来了成功的这一天！

BCS理论的核心思想在于：两个动量相反、自旋相反的电子，可以通过交换原子晶格振动量子——声子而产生间接吸引相互作用，从而组成具有能隙的低能稳定态——超导态。电子为何能产生间接吸引作用？可以直观理解如下：由于电子带负电，失去外层电子的原子晶格带正电，所以当电子路过时，会因局域的库仑相互作用而导致周围带正电的原子晶格形成微小畸变，相当于电子把能量传递给了原子晶格体系，等下一个动量相反的电子路过时，将产生相反的效应，即原子晶格畸变恢复过程中把能量传递给了另一个电子(图5)。配成库珀对的电子为何能实现零电阻效应？可以粗略理解为，因为配对电子动量相反，当其中一个电子得到能量，另一个电子必然失去同等能量(注：实际上就是和原子晶体发生能量交换)，所以电子对中心能量并不因此发生改变，或者说，电子对可以实现无能量损失的运动——也即零阻碍。至于迈斯纳效应的BCS理论解释要更为复杂，这里就不做介绍了。BCS理论是一个典型的“从一到二”的物理学模型，即不再纠结单个电子在原子晶格中的运动模式，而

是探索一对电子的运动。严格说来，BCS理论描述的也不仅仅是一对电子的行为，而是一群电子的集体行为，因为实际上库珀电子对的空间尺度在100 nm左右，是原子间距的一千倍。电子发生配对后，要形成超导电性，还必须经历另一个步骤——步调一致地集体运动，用物理语言来说，就是电子对的位相要一致，然后所有电子对才能抱团凝聚成低能组态。就像舞池里跳交谊舞的男女搭档一样，音乐响起的时候，大家按照相同的旋律和步调舞动起来，看似人多，却也互不干扰(图6)。总结来说，实现超导必须有：配对、相干、凝聚这三个步

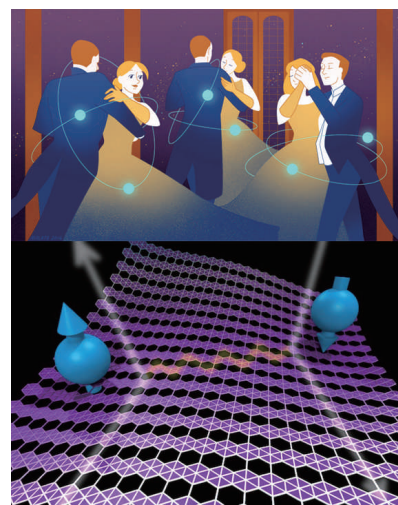


图6 超导电子对的“舞池”(来自 www.insidescience.org, news.rice.edu)



图7 华君武先生漫画“双结生翅成超导、单行苦奔遇阻力”

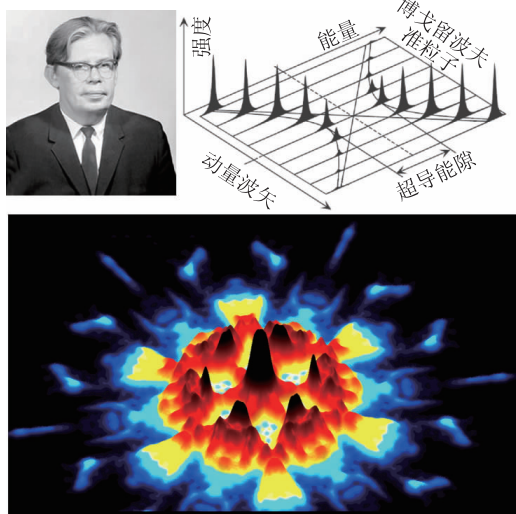


图8 博戈留波夫和超导准粒子(来自英文维基百科、普林斯顿大学物理系主页以及inspirehep.net)

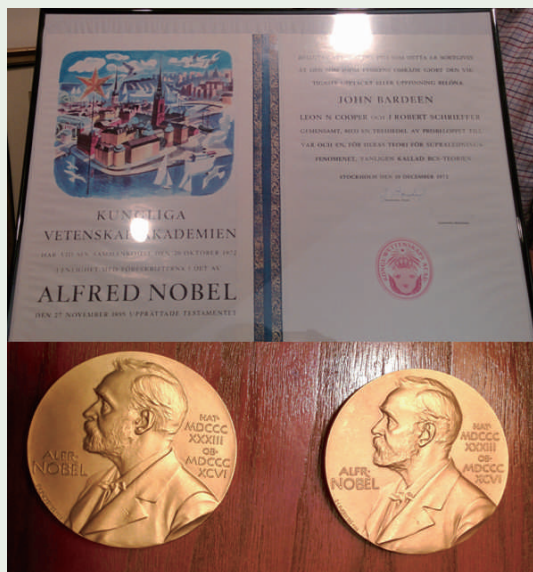


图9 巴丁的诺贝尔奖证书和奖章(由威廉姆·巴丁和刘真提供)

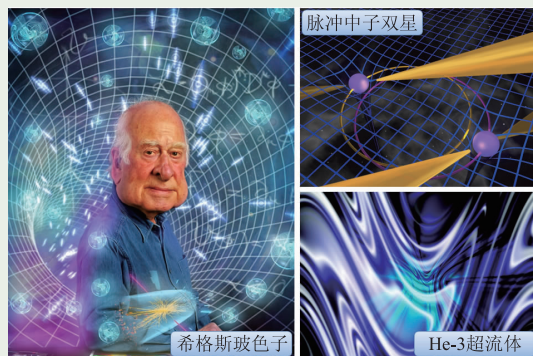


图10 BCS理论思想相关的物理(来自www.freakingnews.com, www.jb.man.ac.uk, www.dailymail.co.uk)

骤,理解这一点非常重要^[13]。

正如曰:“君住华山峰头,我住泰山谷口,挥一挥咱俩带电小手,爱情让我们一齐畅通奔走。”

原本纷繁复杂的大量电子宏观集体行为,在巴丁、库珀、施莱弗等三人的神来之笔下,变得非常简洁优美。李政道为此授意著名画家华君武做了一幅关于BCS超导理论的漫画,在 C_{60} 组成蜂巢上,蜜蜂只有单只翅膀,只有左翅膀蜜蜂抱住右翅膀蜜蜂,成双成对后,才可以畅行纷飞。正所谓“双结生翅成超导,单行苦奔遇阻力”(图7)。一个成双入对的思想,解决了困扰物理学家40余年的难题,这就是BCS理论魅力所在^[10]。

派因斯和李政道等人因错失发现超导微观理论的机会,难免有些后悔。不过,派因斯后来在固体物理学(主要是超导理论的发展)和理论天体物理学等方面做出了许多重要贡献,至今活跃在凝聚态物理前沿领域。而李政道和杨振宁共同做出的关于弱相互作用中宇称不守恒的工作,恰恰是

在1956年左右,那一年李政道也才29岁。因为这个工作,次年(1957年)在BCS理论诞生之际,李政道和杨振宁同样收获了一枚诺贝尔物理学奖章。

然而,关于BCS理论的诺贝尔奖,却相对要姗姗来迟,直到15年后的1972年,才被授予诺贝尔物理学奖。可见物理学界接受关于电子配对这个新思想,也是费了一段时间。要证明BCS理论的正确性,除了解释已有的超导性质外,还需要验证它所预言的一些效应,特别是库珀电子对的观测。1962年,William A. Little和Roland D. Parks在平行磁场下的通电超导圆筒中观测到了超导临界温度的周期振荡,由此证明单个磁通量子确实需要两个电子来维持,即存在库珀电子对^[14]。苏联科学家博戈留波夫(Nikolay Bogoliubov)利用量子场论,分析了超导电子对在激发态下的行为。他认为超导电子配对之后,和液氦发生超流具有类似物理过程,都是因为它们状态可以等效为新的玻色子,从而发生凝聚形成稳定基态,其激发态表现为费米能上下存在对称的准粒子^[15](图8)。所谓准粒子,指的并不是真实可以独立存在的粒子,而是固体材料中某些相互作用的量子化形式。例如晶格振动的能量量子就是声子,而超导电子对在激发态的准粒子则被称为博戈留波夫准粒子。实验上,可以直接观测到博戈留波夫准粒子,也同样证实了BCS理论^[16]。

值得一提的是,库珀和施莱弗做出诺贝尔奖工作的年龄都很小(24—25岁),另一位因超导隧道效应获诺奖的约瑟夫森,也是在年仅22岁时做出的工作。年轻人开放的思想 and 敢于挑战的精神,或许是他

们取得成功的原因之一。约翰·巴丁分别于1956年和1972年获得两次诺贝尔物理学奖，是历史上目前唯一获得两次诺贝尔物理学奖的科学家(图9)。而诺贝尔奖历史上也仅有4位科学家获得两次奖项，除巴丁外，还包括居里夫人(1903年物理学奖、1911年化学奖)、莱纳斯·鲍林(1954年化学奖、1962年和平奖)、弗雷德·桑格尔(1958年和1980年化学奖)。一个非常有趣的插曲是，巴丁在1956年领取诺奖的时候，把他的两个儿子威廉姆·巴丁(William A. Bardeen)和詹姆斯·巴丁(James M. Bardeen)扔在了宾馆。主持人问他孩子哪里去了，巴丁说他不知道还可以带亲属来颁奖现场，主持人只好说，那下次别忘了哦！没想到，还真的有一次！那就是1972年的超导理论诺奖！约翰·巴丁的两个儿子都是成名的物理学家，其中威廉姆是粒子物理学家，后来被选为大型超导对撞机SSC的理论组长，只是不幸该项目因预算超支等问题而中途夭折；詹姆斯是理论天体物理学家，在黑洞物理方面做出了杰出贡献，找到了爱因斯坦场方程的一个严格解——命名为巴丁真空。巴丁的女儿也嫁给了一位物理学家，称他们家为“物理世家”，一点都不为过。

1975年9月和1980年4月，约翰·巴丁曾两次到访中国，访问了北京大学、清华大学、复旦大学、中国科学院等多家科研单位，黄昆、谢希德、周培源、卢鹤绂、章立源等多名国内物理学家与之讨论^[3]。其中访问中国科学院物理研究所时，在场的研究生问巴丁获得两次诺贝尔物理学奖殊荣的“诀窍”是什么？巴丁笑答：“三个条件：努力、机遇、合作精神，缺一不可。”的确，对科学真谛乃至应用前景的

孜孜不倦追求，在恰当的时机进入一个重要的领域，寻找合适且可信赖的合作伙伴，这三点铸就了巴丁一生辉煌的科学成就^[17]。约翰·巴丁一生获奖无数，被评为“20世纪最具有影响力的100位美国人”之一，于1991年因心脏衰竭在美国去世，享年82岁。

BCS理论的物理思想深深影响了一代代物理学家(图10)。例如“两两配对”的机制被广泛应用于核子相互作用、He-3超流体、脉冲中子双星等等^[18, 19]，只是配对对象和相互作用力不同而已。关于自发对称破缺的思想更是直接被许多粒子物理学家借鉴，提出了汤川相互作用、希格斯机制等^[20]，对揭示我们世界的起源起到了重要作用。或许，物理的精髓，就是彼此相通的！

参考文献

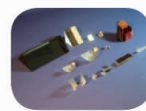
- [1] 曹则贤. 物理, 2016, 45(10): 679
- [2] Schmalian J *et al.* Mod. Phys. Lett. B, 2010, 24: 2679
- [3] 卢森轲, 赵诗华. 大学物理, 2008, 27(9): 37
- [4] Maxwell E. Phys. Rev., 1950, 78(4): 477; Reynolds C A *et al.* Phys. Rev., 1950, 78(4): 487
- [5] Tinkham M. Introduction to Superconductivity. Dover Publications, 1996
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Herbert_Fröhlich
- [7] Lee T D, Pines D. Phys. Rev., 1952, 88(4): 960
- [8] Bardeen J, Pines D. Phys. Rev., 1955, 99(4): 1128
- [9] Cooper L N. Phys. Rev., 1956, 104(4): 1189
- [10] Cooper L N, Feldman D. BCS: 50 Years. World Scientific Publishing, 2010
- [11] Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R. Phys. Rev., 1957, 106(1): 162
- [12] Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R. Phys. Rev., 1957, 108(5): 1175
- [13] Schrieffer J R. Theory of Superconductivity. Perseus Books, 1999
- [14] Little W A, Parks R D. Phys. Rev. Lett., 1962, 9: 9
- [15] Bogoliubov N N. J. Exp. Theo. Phys., 1958, 34(1): 58
- [16] Shirkov D V. Phys. Usp., 2009, 52: 549
- [17] Pines D. Proc. Ame. Philo. Soc., 2009, 153(3): 287
- [18] Peskin M E, Schroeder D V. An Introduction to Quantum Field Theory. Addison-Wesley, 1995
- [19] Haensel P, Potekhin A Y, Yakovlev D G. Neutron Stars. Springer, 2007
- [20] Higgs P W. Phys. Rev. Lett., 1964, 13(16): 508

标准光学元件库存---供您随时选用

总量多达10万片，
超过700个品种规格的透镜，
棱镜，反射镜，窗口，
滤光片等常用光学器件；
涵盖紫外，可见，
近红外，
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd

地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段
电话：010-88096218/88096099 传真：010-88096216
邮箱：optics@goldway.com.cn