

超导“小时代”之五 神奇八卦阵

罗会仟[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2015-12-22收到

[†] email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160108

阵间容阵、队间容队；以前为后，以后为前；进无速奔、退无遽走；四头八尾，触处为首；敌冲其中、两头皆救；奇正相生，循环无端；首尾相应、隐显莫测；料事如神，临机应变。

——《八阵图赞歌》

如果你看过吴宇森导演的电影《赤壁》，那么请回忆一下，哪个人物给你印象最深刻？是业余忙着写大字读诗经编草鞋的桃园三兄弟，是能写诗能舞剑能给萌萌马儿接生的周公瑾，还是随时都要冷静冷静

的诸葛孔明？嗯，是不是有选择困难？好吧，我们还是想想哪个场景最为震撼呢？赤壁水战固然是之一，之二呢？如果你还记得水战之前的那一场陆战，却也能感受到场面那是相当气势恢宏，不为别的，只因为这次，卧龙先生使出了看家绝招——九宫八卦阵！此阵威力有多大？号称囊括天覆阵、地载阵、风扬阵、云垂阵、龙飞阵、虎翼阵、鸟翔阵、蛇蟠阵等九大名阵，而且变化万端，十万精兵杀进来也是一个死字

形，这其实蕴含着自然界最基本的现象——对称。看那花丛的蝴蝶，捡起一片树叶，捧起一片冰晶，你就会发现，它们从形状上来看都是对称的(图2)。对称给人以美感，人体就是一个高度对称的例子，这是为啥欧美油画里总是以人体为主角，话说无论高矮胖瘦都是一种美嘛。人类向大自然学习，生活中无处不存在对称的美感。如果你爬上景山俯瞰故宫全景，你就会发现紫禁城的瑰丽奥秘，就是它的对称(图3)。正是由于士兵们对称分布，在八卦阵中就可以随时做到首尾相应、奇正相生。而另一大神奇之处就是它的变化，改变部分的结构，就可以形成新的对称方式，从而迫使里面的敌兵被牵着鼻子走迷宫，不被砍死也得被晕死。

(图1)^[1]。

此阵法与我们要聊的物理何干？

从物理学的角度来看，八卦阵的要诀在于两点：对称和变化。八卦阵原理取自上古时代伏羲发明的八卦图，世间万物都可以归纳到八卦之中(图1)。八卦图整体上是一个正八边

我们为什么生活在一个对称的世界？

要回答这个问题，先要回答另一个问题，世界是什么组成的？

给你一把要多锋利就有多锋利的水果刀，把一个苹果一分二、二分四、四分八……，就这么一直切下去，切到最后会不会遇到一个不可分割的单元呢？古希腊哲学家留基伯和他的学生德谟克利特就是这么认为的，还给最后不可分割的单元取了个名字，叫做“原子”(希腊



图1 电影《赤壁》里的八卦阵战场与伏羲发明的八卦图



图2 对称的世界：蝴蝶、冰晶和枫叶(取自 <http://hdwallpapersfit.com/>)



图3 故宫全景图(取自 www.dianliwenmi.com)

语里就是不可分的意思), 我们的世界就是“原子”和“虚空”组成的。中国人发明了九宫八卦, 也用类似理论认为世界基本单元不外乎: 金、木、水、火、土。不过科学并不是那么简单, 直到18世纪末, 科学实验盛行的时代, 人们才搞明白原子究竟是个什么鬼。1789年, 法国化学家拉瓦锡指出, 原子就是化学变化里的那个最小单元。1803年, 英国化学家和物理学家道尔顿从他的气体分压实验结果里提炼出了科学意义上的原子论, 所谓化学反应就是原子间的组合排列^[2]。不同的原子排列组合构成了不同的物质, 组成了我们生活的世界。原子有多大? 当然肉眼是别想直接看到它的真容了。原子直径在 10^{-10} m左右, 即百亿分之一米。如定义十亿分之一米(10^{-9} m)为1 nm, 原子也就只有0.1 nm左右那么大。材料中原子之间间隔大概在0.1—10 nm之间, 一滴水或一粒米里面的原子数目大的惊人, 即使是让全地球60亿人来数的话, 也要数几百万年才能数完! 这个世界有多少个原子, 你就别掐指头算了……

现在, 回到之前那个问题, 为什么原子组成的世界会有如此美丽的对称结构? 我们还得剥开原子的坚壳, 看看里面是个什么模样。从化学的意义上来说, 原子是个不可分的最小单元, 但从物理角度来说, 没什么是不可分的。原子内部究竟有没有结构, 汤姆逊认为很简单, 里面就是正电荷和负电荷均匀分布的球体, 剥开原子看到的无非是均匀的电荷单元。剥开原子最简单直接的办法就是找到一个合适的“子弹”把原子当做靶来轰击, 看能打出什么花来。1899年, 英国剑桥

大学的卢瑟福在贝克勒尔发现放射性的天然铀上找到了这枚特殊的子弹——他称之为阿尔法射线(后来知道是氦原子核)。这种射线虽然穿透力很差, 一张纸就足以挡住它, 正因为如此, 它有一定的质量和较低的速度, 使得更容易被探测。卢瑟福用他的阿尔法“原子枪”轰击了金箔, 他发现大部分阿尔法粒子都“如入无人之境”穿过去, 只有一部分轨迹发生了偏转, 说明它们受到了正电的排斥作用, 其中还有万分之一的粒子是“如撞墙后原路弹回”的。正是这万分之一令他十分兴奋, 他后来回忆到: “这是我一生中碰到的最不可思议的事情, 就好像你用一颗15英寸的大炮去轰击一张纸而你竟被反弹回的炮弹击中一样。”卢瑟福的实验结果说明, 原子不可能是质量和电荷都均匀分布为0.1 nm的小球, 原子的绝大部分质量都集中在其核心处——卢瑟福称之为“原子核”。也就是, 原子内部长的不像西瓜, 而是更像樱桃, 是一个单核结构, 原子核带正电, 核外电子带负电。为了进一步理解电子在原子内部是如何运行的, 物理学家先后提出了“葡萄干蛋糕模型”、“行星轨道模型”、“量子化原子模型”等一系列模型, 最终促使了量子力学的建立(图4)。包括卢瑟福和他的弟子们, 有十多位科学家前后因为原子物理的

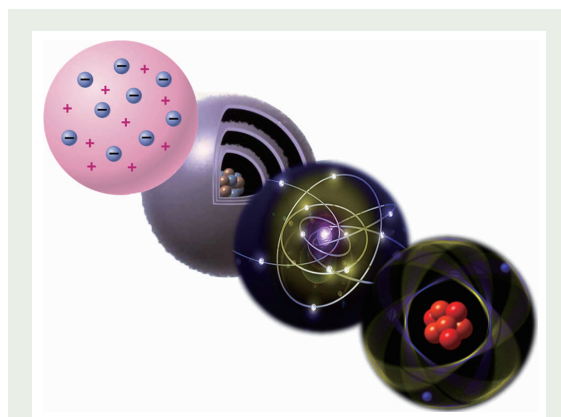


图4 原子的各种结构模型

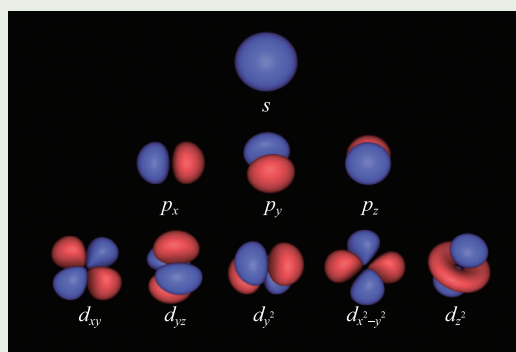


图5 几类典型的电子云形状(取自 <http://www.ck12.org/>)

研究获得了诺贝尔物理学奖^[3]。最终原子的结构模型定格在量子力学框架下, 电子在原子内部的运动并不存在特定的轨道, 而是以概率的形式存在于原子的空间内, 某些地方出现的概率大, 某些地方出现的概率小, 整体概率分布形成一片“电子云”。实际上, 原子核直径比原子直径要小得多, 把原子比作一个足球场的话, 原子核不过是场地中间的一只蚂蚁。因此, 从空间上来说, 原子的内部质量虽然主要来自原子核, 但结构上还是电子云为主导。

电子云, 又是个什么鬼?

电子云本质上就是电子在原子内部的概率分布, 这种分布服从量子力学定律, 而且, 重点来了, 电子云的形状并不是杂乱无章的, 而是呈现某些特定的形

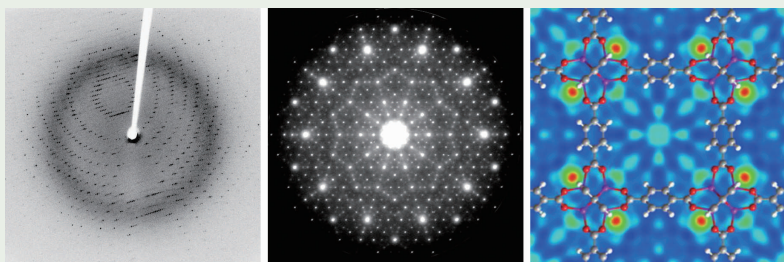


图6 晶体的X射线衍射, 电子衍射和中子衍射图样^[4](取自 https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography, <http://fepul.com/diffraction-pattern-electron/>)

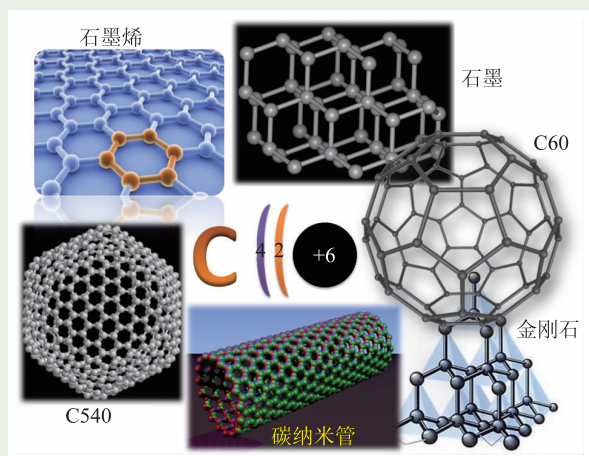


图7 碳原子的排列形成各种同素异形体

状。比如, 最简单的原子——氢原子, 内部只有一个质子和一个电子, 电子云的分布就是均匀的球形, 球的密度跟直径有关。电子云的形状还有“纺锤型”、“十字梅花型”、“哑铃型”等等(图5), 仔细观察这些电子云, 就会有非常重要的领悟——它们都遵从一定的对称规律!

终于, 答案揭晓。

把一堆原子放在一起, 它们会怎么排列? 原子核之间显然隔着十万八千里, 而且被一堆带负电的电子云屏蔽了, 就是想发生点关系, 也是腿短莫及啊! 原子和原子之间, 主要是离原子核比较远的那些电子(外层电子)和电子之间的相互作用, 而这些电子的空间分布, 是某些特定对称形状的电子云。那么, 一个无比自然且和谐的结果

是, 原子间的排列也会形成某些特定的对称结构。有了电子云喊口令, 原子们不是一盘散沙, 而是整齐划一的一支队伍, 这就是微观世界的八卦阵! 这种对称有多漂亮? 用一把原子大小的尺子去量一下就知道。X射线作为电磁波的一种, 其波长就和原子直径差不多, 如果用一束X射线打进规则的晶体中去, 就会出现对称的衍射斑点。类似地, 用一束电子或一束中子也可以实现, 衍射斑点的分布就像你看到蝴蝶的花纹一样漂亮——这就是对称之美(图6)。可不要小瞧这微观世界的八卦阵, 它厉害着呢! 不同的原子排列方式不仅决定了材料的外形, 而且决定了材料的许多基本物理性质。举个最常见的例子, 一颗璀璨的钻石和一支写字的铅笔芯有什么异同? 它们都是碳原子组成的! 谁说朽木不可雕? 朽木可以变成木炭或铅笔, 也可以变成钻石! 区别在于, 铅笔芯里主要是石墨, 由一层的六角排列碳原子构成, 所以碳原子特容易剥落, 可以轻易

留下字迹; 但是钻石内部是由碳原子密堆起来的, 碳原子间存在非常稳定的结构, 形成了自然界硬度最高的材料——金刚石。碳原子的不同排布就如同孙悟空的七十二变一样, 除了石墨和金刚石, 还可以有单原子层的石墨烯, 卷成管子的碳纳米管, 60个碳原子组成的足球烯等等(图7)。这些材料性质千差万别, 又同宗同源, 我们称之为“同素异形体”。也不要太恐慌, 微观世界的八卦阵型其实并不是想象中的那么多。数学家告诉我们, 微观八卦阵(空间群)最多也就是230种, 这230种又可以划分为7大类和14小类^[5]。不要问我为什么, 反正, 世界, 就是如此简洁!

认识了微观世界的八卦阵, 接下来我们看看八卦阵里的兵法。

对于固体材料里面的原子而言, 离原子核最远的外层电子们因为“天高皇帝远”, 体会不到中央的精神, 整天都处于“游离”的状态。一些本事大(能量高)的电子甚至可以完全挣脱单个原子的束缚, 而在材料内部自由穿行, 我们称之为近自由电子, 加个“近”字, 是因为它并不是百分百自由的。别忘了, 我们还有强大法力的原子八卦阵, 电子要想穿过八卦阵, 就必须找到兵法窍门, 否则死在半路都不知道怎么挂的。还是以故宫为例, 去过故宫的都知道, 故宫以中轴线为中心, 两边侧殿对称分布, 主要大殿都在中轴线上。结果是——旅游团都只参观中轴线上几个大殿, 侧面的偏殿因为某些特别展览要收费也人烟寥寥, 游客都不约而同地集中在中轴线上(图3)。也就是说, 游客数目的分布其实和故宫整体的对称方式相关。这个在微观世界也

有类似规律，电子在规则排列的原子八卦阵里，它的分布是和阵法有关的。一方面，由于原子排列在空间上是重复规律分布，导致电子的运动在空间上也存在一定的周期性；另一方面，如果把材料内部电子按照能量从低到高堆在一起的话，它会在某些特定的方向有着特定的规律分布。

一句话，电子在八卦阵里不能乱来，要守规矩才有活路。

指出以上两条“兵法”的，是两位“布家”的物理学家——布洛赫和布里渊。莫激动，他们不是兄弟俩，也不是邻居。话说回来，划分14小类的原子阵法，也叫做14种布拉伐格子，真是“布衣出英雄”啊！言归正传，根据“布家兵法”，我们可以把材料内部近自由电子们按照能量和动量分布给排列起来。电子们只能在某些特定的能量和动量区间内出现，形成一条条“电子带”，又叫做“能带”，这就是它们的破阵大法了。最高能量的电子，也就是跑的最快的那些家伙们，按照动量的空间分布，构成了一个包络面，又叫做“费米面”，这就是它们的先锋队了。不同材料的费米面是千奇百怪的，如钾的费米面是一个闭合的球面，但铜和钙的费米面就会有或大或小的洞洞(图8)^[6]。由于空间上周期重复的阵法，某个特定区域内的破阵小分队就足以代表整个大部队，超出此区域的别人的孩子也等价于自己家的孩子，这个区域叫做第一布里渊区，简称布里渊区。一个三维的立方原子阵法，其布里渊区是一个削掉角的正八面体(图8)^[7]。嗯，此处有点烧脑。还好，本质还是八卦阵的破阵秘诀，电子在材料内部的动量和能量分布也是有一定对称规律

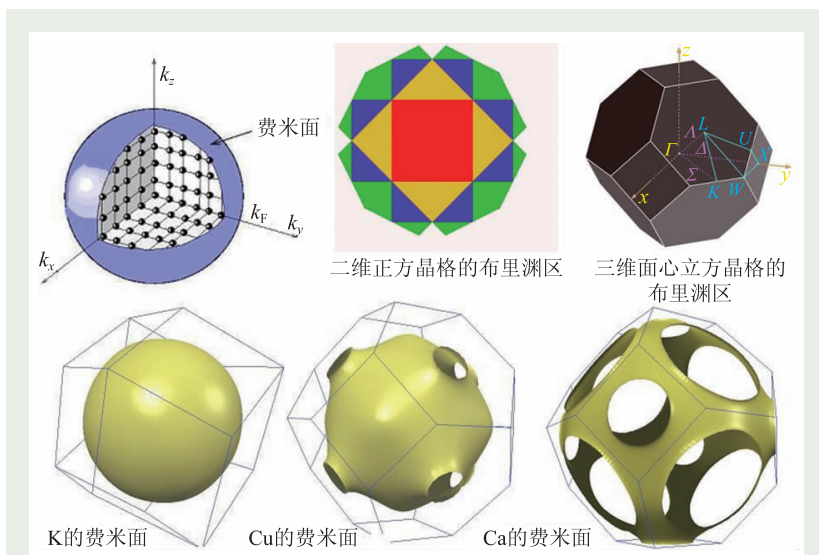


图8 典型的费米面和布里渊区(取自 http://www.snipview.com/q/Fermi_surface, <http://www.phys.ufl.edu/fermisurface/>)

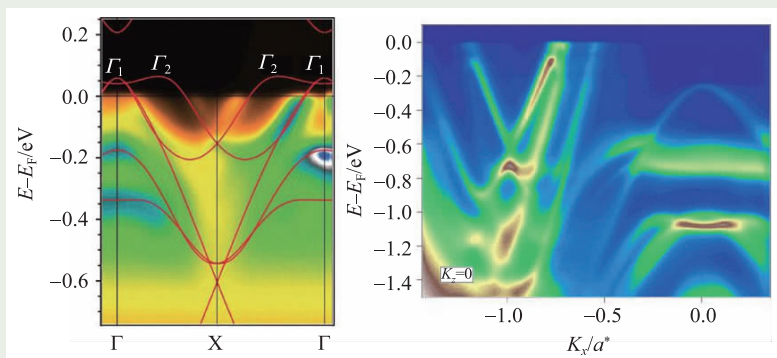


图9 实际材料的电子能带结构(取自斯坦福大学沈志勋研究小组主页 <http://arpes.stanford.edu/>)

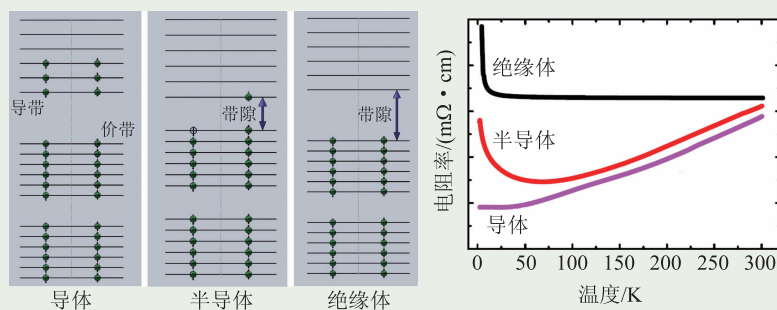


图10 导体、半导体和绝缘体的能带结构(左)与电阻规律(右)

的！当然，事实上，材料内部的电子部队结构还是非常复杂的，这就是宏观材料出现各种的电磁热等物理性质的原因(图9)。要理解材料的宏观物性，一是要破解原子八卦

阵法，二是要掌握电子破阵兵法，二者缺一不可。

作为“敌军”，电子也会受到阵里守方士兵(原子)的攻击，或改变运动方向，或改变运动速率，也可

实验室低温制冷系统



**High Power
Cryocoolers
1.5 W @ 4.2 K**

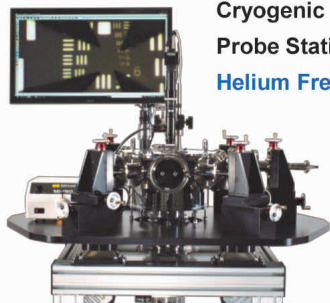
**ARS Manufactured
Closed Cycle
3 K — 1100 K**



**Top Loading
Fast Sample
Change**



**Cryogenic
Probe Station
Helium Free**



Advanced Research Systems

+1 610 967 2120

www.arscryo.com

ars@arscryo.com

能是受伤或者损兵折将，物理上称之为“散射”。举个具体例子，材料的导电性质就和内部电子受到的散射情况密切相关，如果电子遇到的散射很强，能量和数量上损失很大，那么就是电子大军受到强烈的阻碍——对，这就是电阻！我们知道，按照电阻率大小，可以分为绝缘体、半导体和导体。在微观上，它们的导电机理是可以“原子八卦阵法”来解释的。我们先定义高能量电子带叫做“导带”（电子可以导电），低能量电子带叫做“价带”（电子被束缚在原子核周围，不能参与导电）。导体内部近自由电子数量众多而且兵强

马壮（导带电子数目多），就能在极小阻碍的状态下轻松破阵；半导体大部分都是老弱病残电子兵（导带电子数目少），偶尔还需要问老东家借援军（比如向价带借走一个电子形成一个带正电的空穴），受到阻力不小，最后勉强出阵；绝缘体里面几乎无兵可用（没有导带电子），而且援军也过不来（价带与导带存在带隙，很难跳过去），基本全军覆没，导电效果极差（图10）。在实验上，区分导体、半导体和绝缘体的最好方法就是测量它们电阻随温度的变化，因为温度越低，原子的热振动就越小，原子阵型也就越稳定。对于导体而言，它更容易穿越原子大阵，所以电阻随温度降低而减小。对于半导体和绝缘体而言，本来兵就或弱或少，天寒地冻的结果导致不可挽回的损失，出阵反而显得更加困难了，所以电阻随温度降低会升高，其中绝缘体的电阻上升更加剧烈，甚至呈现指数发散的趋势（图10）^[8]。

怎么样？微观原子的八卦阵有够神奇吧？！

参考文献

- [1] 独孤及(唐). 云岩官风后八阵图, 诸葛氏宗谱, “八阵功高妙用藏与名成八阵图”
- [2] 王峰. 道尔顿与近代化学原子论. 武汉: 湖北师范学院学报, 2003, 23: 148
- [3] 夏代云. E·卢瑟福的科学精神, 广西大学2006年硕士论文
- [4] Yildirim T, Hartman M R. Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 215504
- [5] Howard H. Amer. Math. Monthly, 1986, 93: 765
- [6] Ziman J M. Electrons in Metals: A short Guide to the Fermi Surface, London: Taylor & Francis, 1963
- [7] Kittel C. Introduction to Solid State Physics, 8th Edition, Hoboken: Wiley, 2005
- [8] 黄昆著, 韩汝琦编. 固体物理学, 北京: 高等教育出版社, 1998