

物理学咬文嚼字之三十八

# Channel and Tunnel

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

村与村,户与户,地道连成片……  
——《地道战》

穿过县界长长的隧道,便是雪国。  
——川端康成《雪国》

**摘要** Tunnel,channel 都是多侧面的物理学概念,与之相近的 funnel, canal 也是;基于 tunneling 和 channeling 还发展出了重要的物理学分析方法。

英文的 channel, 中世纪英语写成 *chanel*<sup>1)</sup>, *canel*, 原意与水有关, 是“the bed of a running stream, river (河床, 水沟)”的意思, 以及“a body of water joining two larger bodies of water (水渠、运河、海峡? 这要看水体有多大了)”, 扩展为任何液体的通道 (a tubelike passage for liquids), 所以 channel 近似地等同于 watercourse, waterway.

Channel 作为水体之连接, 常常出现在河流的流域盆地. 水源处是雨水或者融化的雪水, 不同的小水流(溪流)汇成支流(tributary), 支流再汇成干流(mainstream), 最后注入大湖或海洋. 所以, 从入海口倒过来看, 一条河的流域形貌像一棵树(图1). 不过与树不同的是, 流域盆地的“树枝”之间可能有连接, 这就是“channel”. 当然, 流域盆地的树枝状结构的树枝也大致可看作是 channel, 如下句“The shape of a drainage basin is determined by the river network itself as it incises channels into the landscape (在地面上刻出了水道)”<sup>[1]</sup>. 著名的 channel 有 English Channel(英吉利海峡), 连接大西洋和北海. 虽然其最窄处也有 34 公里, 相较于海和洋, 它依然是狭窄的, 所以是海峡.

Channel 作为“两大水体的连接”的意思, 应用最广, 且被引申为“任何通过或传输的方法/工具 (any means of passage or transmission)”, 大约对应中文的管道、渠道、通道、途径等, 中文翻译视具体

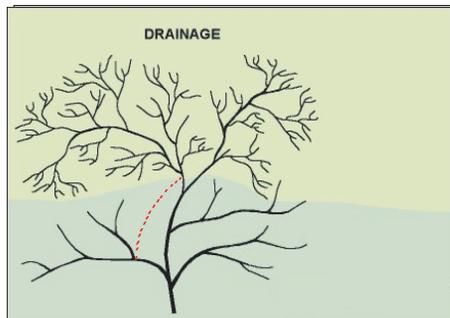


图1 流域盆地(drainage basin). Running water 在地面上冲刷出水沟和支流, 向低处汇成一条大河. 虚线表示的就是一条 Channel

的语境而定, 如外交管道(途径, diplomatic channel), 电视频道 (television channel)<sup>2)</sup>, 纳米通道 (nanochannel)<sup>3)</sup>, 等等.

作为物理学概念, channel 在涉及电导的情景中经常能够遇到, 如细胞中的离子通道 (ion channel), 双通道近藤模型 (two-channel Kondo model) 等等, 都是和途径(path)有关. 可以想见, 在微电子学领域, channel 是一个多么常见的词汇. 举例来说,

- 1) 社会大众所熟悉的 chanel 是 chanel(香奈儿)这个时尚品牌, 是由法国的 Garbielle “CoCo” Chanel 女士创立的. Coco 是她是在咖啡厅唱歌时的昵称. ——笔者注
- 2) 电视 channel 指的是频段, 属于虚拟的通道 (virtual channel). 无线电信号采用不同指定频带中的频率主要是避免互相干扰. ——笔者注
- 3) 纳米管是有效的离子甚至分子的通道. ——笔者注

利用 MOSFET(金属-氧化物-半导体场效应管)可以产生开关的作用,就是用一个门电压来控制导电通道 (conductive channel) 的产生和消失. 图 2 所示为一个 n-型 MOSFET,其体材料是 p-型半导体,源和漏都是 n-型重掺杂区域. 若门电压不够大,在源和漏之间电导很小,开关处于关的状态;当门电压超过某个阈值时,在源和漏之间的体材料-介电材料界面处出现了一个 n-型的导电通道,源和漏之间能够导电,开关处于开状态. 如果导电通道和耗尽层(depletion layer)的厚度可比拟,这样的导电通道很短,会引起包括表面散射、速度饱和等 short-channel effect,是器件高密度集成时需要格外留意的问题.

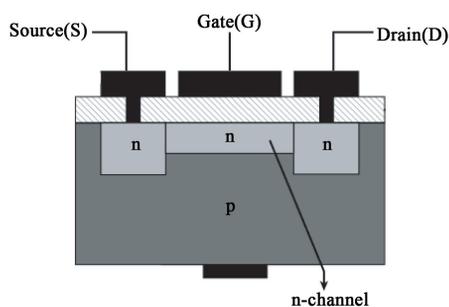


图 2 n-MOSFET 示意图. 当门电压超过某个阈值时,源和漏之间的体材料-介电材料界面处出现了一个 n-型 channel

Channel 还可以用作动词,有“导入通道”中的意思,如下句“(Duchamp) channeled the mainstream of his intellectual energy into the game of chess”,说的那么文雅,实际是说“(杜尚)把大部分心思(转而)花在下棋上”. 另外,作为动词,channel 可能有“穿过通道”的意思,比如在“ion channeling effect”这个概念中. Ion channeling effect, 汉译离子沟道效应,是高能离子照射晶体时会发生的一种现象. 完美的晶体可以看作是原子列的有序排列. 入射离子沿着某个主轴方向入射时,其遭遇的散射会可观地减小,因此会以较大的几率通过晶体样品(图 3),因此在某些特定的方向上能测得离子通量的峰 (flux-peaking). 此即所谓的离子沟道效应,为 Lindhard 于 1965 年首次报道<sup>[2]</sup>. 相应地,离子入射引起的其它效应,包括核反应、大角弹性散射、X 射线发射等,会表现出极小值. 若晶体结构中含有缺陷,则会在对离子的散射上表现出来,所以离子沟道效应是研究晶体损伤、缺陷密度等内容的有效手段. 离子沟道谱一般常用 He 离子,能量在 MeV 量级.

Channel,还有 canal,其本意是水道,以前承载着运输的重任,是物质和人借以流动的脉络. Chan-

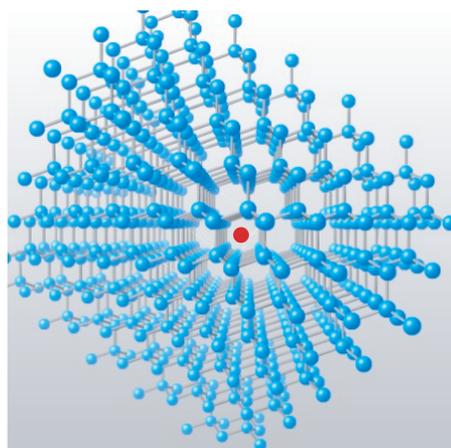


图 3 晶体中原子的有序排列为入射离子(中心处)提供了通道(channel)

nel 作为一个用来比拟许多现象的学术名词,甚至是发现的场所,也就不足为怪了. 约在 1844 年,英国人 Scott Russell 坐在一艘行驶在引水渠(channel)中的船上发现当船突然停止的时候,水渠中被船带起的水却没有停止. 船头处的水先是聚集、激荡成一个孤傲的凸起(solitary elevation),然后突然绝尘而去,留下轮廓清晰且形状与速度相当稳定的身影. 这就是孤立波发现的过程<sup>[3]</sup>.

与 channel 容易混淆的词是 canal. Canal 来自拉丁语 canalis,与 channel 同源,英语字典里解释为 artificial waterway(人工水道),汉译运河. 著名的运河有巴拿马运河(图 4)、苏伊士运河(1869 建成)以及中国古老的京杭大运河. 当然,单用运河来翻译 canal 是不够的,比如 alimentary canal 就要译成消化道,auditory canals 要译成听道.



图 4 巴拿马运河(Panama canal)

区分 channel 与 canal 是很有必要的,但却是相

当困难的. Channel 与 canal 的同源以及意思易混还引起一段趣事. 19 世纪末到 20 世纪初, 曾有火星上有运河 (canals on Mars) 的说法. 这个说法的产生是因为一个不足道的语言上的错误 (trivial linguistic mistake)<sup>4)</sup>. 意大利的 Giovanni Schiaparelli 在 19 世纪末用望远镜观测火星表面, 于 1877 年制作了一幅图, 图上标有线形的地理标记, 被记作 ‘channel’. 但是, Schiaparelli 用的是意大利语 canali, 英语翻译被随手写成了 canals. 因为是 canal, 当然是人工的 (And Canals, of course, are not natural features but artifacts). 受这一有趣想法的启发, 美国人 Percival Lowell 先入为主地对火星作了自己的观察. 那些在火星上看到的道道 (channels) 就被解释为人工灌溉的痕迹, 成了火星存在智慧生命的依据. 后来, William Kenneth Hartmann 给出了正确的解释, 早期望远镜看到的道道只是在山或者撞击坑下风处堆积的条形尘土而已. 1965 年, Mariner 4 号飞船发回了火星的近距离照片, 明白无误地呈现给我们一个荒凉的、冰冷的星球 (图 5). 当然, 火星上可能存在过河流, 因为“流动的水在岩石表面刻下了许多 channels 和支流 (running water has carved channels and tributaries into the rock face)”.



图 5 红色星球火星. 早期观察曾把看其表面上的 channel 当成 canal, 从而有火星表面曾存在高等生命的臆断

Canal 与科学相关的词有 canal ray, 又叫正射线 positive ray. 如果气体放电的阴极是带孔的, 则放电条件下有微弱的发光射线从孔中 (德语 Kanal) 穿过. 此射线由带正电的粒子组成, 1886 年德国人 Eugen Goldstein 首先发现这一现象, 并将射线命名为 Kanalstrahlen. 根据气体的组成或者离化状态的不同, canal ray 在磁场下会有不同的偏转, 为离子的质量分析提供了可能. 质谱分析就是在 canal ray 现象上发展起来的. Canal ray 也叫 anode ray (阳极射线), 与 cathode ray (阴极射线, 即电子) 相对. 不过, 读者请勿望文生义来理解这两个概念. 实际上,

cathode ray 由阴极发射的电子和离化气体产生的电子组成, 而 anode ray 则是由离化气体产生的正离子组成, 不一定是发生在阳极附近.

现在谈谈 tunnel. Tunnel, 中世纪英语写成 tonel, 中世纪法语写成 tonnelle (tonnel), 本意为 a net with wide opening and narrow end (开口大, 底部小的网), 大家很容易想到漏斗. 对, 这个词就是和漏斗 (funnel) 有关. Tunnel 指任何的过道 (passage-way), 不过偏向非暴露的过道, 如穿过山体或者在水体之下的隧道, 挖煤的巷道, 兔子、獾等动物挖的地洞, 等等. 在地里打洞, 单一出口的是地洞, 多连通的才叫地道. 《地道战》<sup>5)</sup> 中, 冀中平原的乡亲们就是在实践中认识到了连通的重要性, 做到了“村与村, 户与户, 地道连成片” (图 6).



图 6 冀中人民创造的地道战. 一种无奈的选择

Tunnel 是要打 (挖、钻) 出来的, 对应的英文动词有 dig, drill, make 等, 如 a mouse dug a tunnel under the lawn (老鼠在草地下打了洞). 在冰川里钻隧道, 则溶化的冰水汇流成河, 可以有目的地加以利用 (Rivers have been created artificially for this purpose in some glaciers by *drilling tunnels* into the ice) (见文献[1]. Tunnel 本身可以作为动词, 中文字面上大约对应“穿 (钻) 过去”. 火车从山洞中 tunnel 过去, 或者小偷从人家窗户 tunnel 进去, 都算不得大本领. 如果能从致密的墙中穿过, 那才能开辟一片新天地. 早先有位王生就渴望有这样的本领, 并且据说崂山道士还教会了他 (图 7), 谁知回家给媳妇演示的时候出了问题: 穿越没成功, 脑袋还差点撞破了. 估计王生可能是没学到 tunneling 机制的真谛.

- 4) 可见翻译不是翻字典的体力活. 翻译, 总要懂得所涉及的两 (多) 门语言, 还要弄懂一篇文字涉及的内涵, 包括印在纸面上的、字里行间的以及原作者欲说还休的东西, 又以及那篇文字之所以值得翻译所隐含的文化、语言、学术甚或历史的背景. 时常翻看一些翻译的书, 真想当面问问那些译者, 您凭什么敢动翻译的念头? ——笔者注
- 5) 电影《地道战》的拷贝累计复制发行了 2800 多部, 乃为世界电影史上的奇迹. ——笔者注



图7 王生正在 tunneling 一面致密的墙,旁边的崂山道士是其导师

Tunneling 不久前还真的就有了可能. 在经典力学中,具有能量  $E$  的粒子不能进入势能  $V > E$  的区域,也就是说,用一面势能  $V > E$  的墙,就能圈住动能为  $E$  的小偷. 按照量子力学的观点,就算粒子的能量  $E < V$ ,可只要这高度(能量)为  $V$  的墙(势垒)不是太厚,一个粒子还是有一定的几率,或者一群粒子还是有一定的比例,能穿过去,此即所谓的量子隧穿(quantum tunneling)效应. 对于高度为  $V$ ,宽度为  $a$  的势垒,动能为  $E$  的粒子的隧穿几率为  $T \propto e^{-2\alpha\sqrt{2m(V-E)}/\hbar}$ . 若  $(V-E) \sim 1.0\text{eV}$ , 则  $a = 0.1\text{nm}$  附近的变动能引起显著的隧穿几率变化. 我们知道隧穿过去的电子如被一个电极收集,就能产生一个电流;电流与到达的电子数目成正相关,也就是与隧穿几率成正相关. 如果我们能够分辨足够小的电流的变化,我们就能计算出势垒宽度的变化. 对一个导体(电子源)和一个金属针尖(电子收集器)之间的隧穿,电流同势垒宽度,也即针尖到表面的距离,成正相关. 这样就可以将隧穿电流同固体表面的电荷密度及其空间起伏联系起来,通过扫描获得的 2D 隧穿电流图像能近似地解读为表面原子的分布,也就是说,利用隧穿现象能获得原子分辨的固体表面图像,这就是扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope)的粗略原理. 扫描隧道显微镜是物理概念、设备制造、实验技术等方面的完美、聪明的组合,其借助压电陶瓷模拟尺蠖的运动从而实现快速进针和  $0.01\text{nm}$  的空间分辨率,用山田队长的话来评价,是“狡猾狡猾的”. 1986 年,扫描隧道显微镜的发明者 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 获得了诺贝尔物理学奖. 扫描隧道显微镜打开了一个广阔而深邃的微观世界,但也带来了一些戏剧性的效果——在利用扫描隧道显微镜获得了清晰的原子像<sup>6)</sup>之后,人们发现此前大量关于 Si(111)  $7 \times 7$  重构的原子模型,竟然没有一个是正确的. 在扫描隧道显微镜中提到的 tunneling,涉及的是单个电子的行为. 在

Josephson 结(两个超导体夹一个介电势垒层)中,电子则以 Cooper 对的形式从介电势垒中隧穿过去.

量子理论到达的地方,就有 tunneling, 哪怕 tunneling 的主体是整个宇宙. 按照超弦理论,真空能量可以以  $10^{500}$  不同方式发生(不同的值). 这么多不同的方式让一些迷信实验能验证物理理论的人多少犯了为难. 最后人们只好乞灵于“人择原理”,但这个原理解释不了宇宙怎么就选择了当前的值. 2000 年, Raphael Bousso 和 Joseph Polchinski 认为宇宙采纳所有的弦论,按照任一给定的理论运行直到该理论导致宇宙成了碎片(come to bits?),然后会“tunneling”到别的弦理论<sup>[4]</sup>. 宇宙从对应一个弦论“tunneling”到对应其它的弦论,这是怎样的 tunneling(最初看到这个理论时,笔者想起了 Mermin 写的一段文字<sup>[5]</sup>:当我听说在普朗克尺度上时空变成了泡沫,我没有起身去拿枪.(我没枪.))?  $\text{NH}_3$  分子从氮原子在氢原子平面的一侧的构型到氮原子在氢原子平面的另一侧的构型之间的 tunneling,或者王生在崂山道士的指导下从墙的一侧到另一侧的 tunneling,恐怕都无法为弦论的 tunneling 提供譬喻或类比. 2006 年, Paul Steinhardt 与 Neil Turok 提出了“tunneling”理论的一个变种:即我们的宇宙是一个轮回的宇宙,在 Big Bang 过程中膨胀,在 Big Crunch 过程中收缩<sup>7)</sup>,差不多每 10 亿年重复一次. 这个理论就多少有点人间烟火味.

Tunneling 虽被当作是量子力学中的行为,但是在经典光学里却早已出现类似的现象. 在经典光学中,当发生全反射时,消逝波(evanescent wave)能深入到光疏介质不远处,如果在离界面不远处再放一个光密介质,则光能够穿越光疏缝隙进入到第三种介质. 这个过程被成为阻错(frustrated)内全反射,它同量子隧穿非常相似.

在 Webster 字典里, tunnel 的一个释意是 funnel(漏斗<sup>8)</sup>), 两字只差一个字母,看起来就很像. 同 tunnel 一样, funnel 也被用作学术词汇,形象地描述一些效应. 不过,使用时应注意区别 funnel effect 和 funneling effect. Funnel effect 是个流体力学的概念,

6) 哪里有什么清晰的原子像. 扫描隧道显微镜获得的是隧穿电流的分布图,它也只是个隧穿电流分布的 pseudocolor graph 而已. 如何理解这个假色图像,取决于研究者的物理功底. ——笔者注

7) Big Bang, 很大的一声“砰”; Big Crunch, 很响的嘎嘎声, 想象一下慢慢夹核桃的动静. 有时真想问一声, 还有一点正经没有? ——笔者注

8) Funnel 指漏斗型的事物, 如烟囟. ——笔者注

当风(或别的流体)被挤压到一个狭窄的通道中时,速度会变得很大(山口处的风总是很大),这可用 Bernoulli 方程很好地解释:压力小的地方,速度就大.相应地, funneling effect 则与原子沉积有关.在衬底上形成的成长过程中的小岛,其陡峭的侧面不能够吸附住到达的原子,原子会 funnel downhill (顺坡下滚)到接近衬底的某个原子平台上去,在合适的地方被吸附住. Funneling effect 可以解释许多生长形貌,尤其是金属原子构成的沉积表面上的形貌.

在结束本文之前,再罗嗦几句关于 tunneling 的思考.量子力学教科书中所画的无缝的势垒,是个简化了的、理想化的图形.实际的势垒是个势能关于三维坐标空间的分布,其结构取决于物质间的相互作用.一块物质是否构成致密的势垒,或者是否存在,要看对哪种粒子来说.存在对火车隧穿概率为零的山,但不存在对水滴隧穿概率为零的山.对水来说,山体充满了 channels and tunnels. 400kV 的电子束能穿透微米量级的固体样品,而中微子能轻松穿过厚达 10 倍地球轨道半径的水体.对这些基本粒子来说,这个世界根本就是千疮百孔的.按照薛定谔的说法,电子,以及所有能够提供在电子看来是势垒的粒子们,最终不过是 form 而已.那种认为物质构成致密的、刚性的结构的想法,随着入射粒子能量的增加会慢慢变得动摇起来.可以用蜘蛛网打个不太恰当的比喻.蜘蛛网致密与否,不在于网本身,还在于试图穿越者,取决于两者之间的相互作用.对小蠓虫来说,蜘蛛网是实在的、可隧穿的;对蚊蝇甚至一些鸟类来说,蜘蛛网是致密的、经典的;而对瞎眼的大象来说,要获知蜘蛛网的存在可是需要想象力的(图 8).关于基于量子力学概念和一些显微技术所获得的对微观世界的认识,有必要牢记 Mermin 的提醒:把最成功的抽象当作我们的世界的真实性质是物理学家的坏习惯<sup>[5]</sup>.



图 8 蜘蛛网.右图中是一只没能成功 tunnel 蛛网的马蜂

### 参考文献

- [ 1 ] Ball Philip. Life's Matrix. University of California Press, 2001. 41
- [ 2 ] Lindhard J. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. ,1965,34:14
- [ 3 ] Scott Russell J. Report on waves. Fourteenth meeting of the British Association for the Advancement of Science, 1844. 关于当时场景的描写被许多文献引述,兹照录如下: I was observing the motion of a boat which was rapidly drawn along a narrow channel by a pair of horses, when the boat suddenly stopped—not so the mass of water in the channel which it had put in motion; it accumulated round the prow of the vessel in a state of violent agitation, then suddenly leaving it behind, rolled forward with great velocity, assuming the form of a large solitary elevation, a rounded, smooth and well-defined heap of water, which continued its course along the channel apparently without change of form or diminution of speed.
- [ 4 ] Stewart Ian. Why beauty is truth. Basic Books, 2008, 257. 原文为“Universe explores all possible string theories, sticking with any given one until it causes that universe to come to bits, and then “tunneling” Quantum-mechanically to some other string theory.”
- [ 5 ] Mermin David. Physics Today, 2009, 5:8. 原文为“ So when I hear that spacetime becomes a foam at the Planck scale, I don't reach for my gun. (I haven't any.)”以及“ It is a bad habit of physicists to take their most successful abstractions to be real properties of our world.”