

物理学咬文嚼字之三十七

溅

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

淇水汤汤,溅车帷裳。
——《诗经·氓》

摘要 碰撞过程(impact, bombardment, collision)难免崩出来一些物质,于是就有了 sputter, splash, spatter, spurt 等物理上也算常见的词汇,它们同 spew, spit, sputum, sprout 等同源。

据说宇宙中有四种基本相互作用,都是些无须接触就能感受到的,所谓 action-at-a-distance, 汉译超距作用。注意,是四种相互作用,而不是四种相互作用力。从力学(mechanics¹⁾)中剔除了力的概念,则所谓的四种相互作用直接同势(potential)的概念相联系。当然,以笔者的愚见,势能的概念似乎也是多余的。如同力学里没有力,物理学一样也可以建筑在不含势能概念的基础上。既然世界的本质是时空,那个空字(space,不是 emptiness)对应的就是存在的构型(configuration of being)而已, a physics without the concept of potential 可能才是正经,引入势能然后描述时空有绕路的嫌疑。不过,这样绕弯路可能有些历史的必然性。关于相互作用,我们一开始也是不太情愿接受 action-at-a-distance 的观念的。我们的经验是,有接触然后才有压迫(forcing)的效果,于是才有力(force)的概念。伟人谈“扫帚不到,灰尘照例不会自己跑掉”^[1]的时候,一定是静电吸尘器还未广泛使用的年代。

关于相互作用的研究,关键词是碰撞(collision)和散射(scattering)。说碰撞和散射贯彻物理学的研究,应不为过。验证动量守恒的碰撞演示实验,用的是质量为几十克量级的球状或盘状刚性物体,速度差不多是 1.0m/s 的大小,碰撞后各自分开,完好无损。这给了我们一个错误印象,以为这般温和的接触就是碰撞。其实,真切的、接触式的相互作用难免让参与作用者有些损伤,崩出点什么也是常事。考虑到参与碰撞者的参数(质量、刚性、自旋、电荷什么的),在不同的相对速度上碰撞能撞出一部物理学之大部,我们就是依赖碰撞来理解物质的构成和这个世

界的起源的^[2]。碰撞能产生碎片(小至电子,大至一个行星甚至星系。关于更基本粒子的碰撞研究,此处不论),这就引入了溅射的概念。

物理上常说的溅射,就是用一束高能粒子轰击固体表面,使得被轰击物体的组分以各种形式(电子、中性原子、离子或团簇²⁾)飞溅出去(见图 1)。溅射是对英文 sputtering 的翻译,相应的法文为 pulverisation(粉末化),德语为 Zerstäubung(弄成粉末),比较直白,也有些不准确。溅射强调的是自原来的集体中轰击出一些构成单元来。前苏联电影《这里的黎明静悄悄》里有一幕:男上尉冒失地闯入女兵宿舍,引起一通混乱,他自己赶紧退出门外(back scattering,背散射。脸朝外退出来的,还是脸朝里退出来的,代表两种人品³⁾),女兵班长和两个女兵也跟着出来了(溅射产物, sputtered species),算是对溅射过程的宏观演示。此过程的溅射产率(sputtering yield)等于 3。

溅射在材料分析和材料制备方面有非常重要的应用。要用固体靶材生长薄膜,就要把靶材汽化,溅射就是很有效的手段,常见的有 magnetron sputtering(磁控溅射)等,这时大家就看出了溅射的法语说法 pulverisation 和德语说法 Zerstäubung 的道理来了。利用一定能量的粒子轰击固体表面,可以将一

- 1) 英文的 mechanics 似乎并不百分百对应中文的力学,而是比力学的意思要广泛的多。——笔者注
- 2) 至于光子是否算物质,以及溅射出的光子的来源,是个哲学和科学都犯难的问题,此处不讨论。——笔者注
- 3) 物理上叫内禀自由度,比如自旋、极化等,当然不一定是两种状态。——笔者注

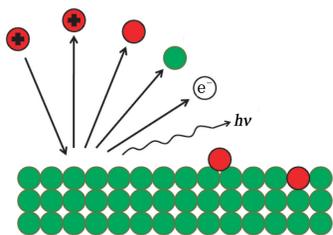


图1 溅射.一束粒子(一般为离子)轰击固体表面,造成光子、电子、原子、离子或团簇的出射(ejection). 溅射的前提是获得足够的背离固体表面的动量

块固体一层层地剥蚀掉,这样就能将原先深藏的部分暴露出来,配合一种表面分析设备(比如光电子能谱、二次离子质谱等),就能够揭示样品在深度方向上的成分分布,这就是所谓的 sputter depth-profiling (溅射深度轮廓技术). 这个分析技术曾被广泛使用过. 可惜的是,粒子轰击固体表面,不是把固体一个原子层一个原子层地轰击出来,而是会在一个小范围内引起混乱 (mixing effect. 想象一下狗窜进鸡窝的情景),只有那些在表面附近获得了足够的朝向自由空间方向的动量的粒子才会脱离固体,成为溅射产物. 因此,不断地轰击,实际上引起了一个累积的混合效应,用数学术语表示,就是存在一个卷积. 这样的结果是,您在表面测到的成分可能与预期的很不一样⁴⁾. 笔者曾证明了溅射深度轮廓是一个数学上条件不足的逆问题,因此原则上是不正确的,算是给这个技术定了性^[3,4]. 这些年笔者不做这个问题了,不知道这个技术还有人用否? 笔者的结论非常得罪人. 记得当年论文发表不久,一个研究溅射的德国大牛 W 教授,给了我个电子邮件:“把那篇文章发给我一份(语气很横!)”. 对 sputter depth profiling 的研究引起了我对实验物理的怀疑,对不确定原理(uncertainty principle)的研究则引起了我对理论物理的怀疑. 一个学物理的人,发现物理里其实很少有可靠的东西,不能不说是一种幻灭! 扯远了.

Sputtering, 汉译溅射,属于绝妙的翻译. 溅射和水有关,夏日大雨后走在马路边,一车飞驰而过,你立马就理解了什么叫水花四溅. 当然,溅射不都是这么缺乏美感和德行的.《木兰辞》有句云:“但闻黄河流水鸣溅溅(jiān jiān)”,这里溅溅既有水声,恐怕也允许溅(jiàn)起水花的联想. 如果您愿意仔细观察牛奶(水滴、油滴等)在液面上的溅射,就会惊喜地发现,条件合适时,会形成皇冠状的结构(见图2). 当然,这个溅射过程有太多我们不理解的地方,利用高速摄影技术,目前此领域的研究正不断给我们带来新的知识. 为什么说溅射是关于 sputtering 的绝

妙翻译呢,因为 sputtering 也和水有关,虽然一呀,phew—是口水. 英文 sputter 同 spew 一样,来自荷兰语 sputteren (spotten)⁵⁾, 与吐痰、吐口水有关(一口老痰的英文即为 sputum),强调的是乱喷(to throw out in an explosive manner). Sputter (sputtering) 常见于英文中的形象化描述,如 somebody speaks sputteringly (某人说起话来唾沫飞溅), the candle sputtered out (蜡烛发出毕毕剥剥的声音,还时不时有残渣蹦出),等等.

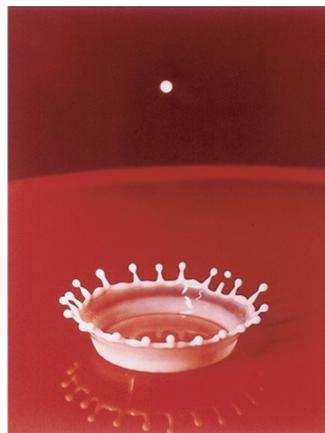


图2 美艳不可方物的牛奶溅起的王冠状结构(milk crown)

在 Art & Physics 一书中,有个关于 sputtering 的奇怪用法 the coughing and sputtering to life. 原句为 The coughing and sputtering to life in the early nineteenth century of the industrial revolution reinforced Alberti's realistic perspective, Newton's mechanistic ideas, and Kant's reasoned explanations (十九世纪早期工业革命时期的“the coughing and sputtering to life”强化了 Alberti 的现实主义观点、牛顿的机械观以及康德的理性诠释)^[5]. 短语 sputtering to life 同古希腊神话中 Cassandra 的故事有关. 神阿波罗给这个美貌的姑娘的礼物,也是个魔咒,就是通过往她嘴里吐口痰(spitting into her mouth)实现的:姑娘因此有了预言的本领;但是尽管她的预言是正确的,却没人相信(Even though her predictions were correct, no one would believe her). 因此,这个“sputtering to life”的对象成了具有深刻洞见却又无能为力的集合体(combination of deep understanding (insight) and powerlessness

4) 笔者 2000 年遇到的真实案例:因为氩离子轰击(清洁表面的常规过程)后测得的样品成分和预期相差太远,一个研究生把人家实验员给骂哭了.——笔者注

5) 奇怪的是,作为其源头的德语吐痰一词是 spucken,同它们的差别却很大.——笔者注

(helplessness)), 乃人类悲剧境地之一例. 如何翻译, 怕是个很啰嗦的事情, 请方家指教.

刚才提到的牛奶在液面上的溅射, 对应的更贴切的英语该是 splash, 是鲤鱼跃出水面溅出水花那样的动作, 这样激起的响动也是 splash. 将水泼向任何一个表面, 因为重力的关系, 溅起的水花总要落回去, 所以是 splash, 而不是 sputter off. 由于水有很大的表面张力, 表面张力加上重力, 以及动能的分布, 就构成了 splash 的花样. 目前, 虽然人们获得了很多迷人的 splash 花样 (见图 3), 但是, 对过程的描述似乎还是不得其门而入. 外物的冲击使得这池水之一部分获得足够的背向运动从而脱离整体. 如果水泼你身上四处溅射, 那对应的是物理学中的背散射而非 sputter.



图 3 一定动量的水滴落入水面激起的 splash 花样

与水滴的 splash 最终要落入水中一样, 小行星撞击地球、月球激起的尘埃最终也要落回地(月)面. 不同的是, 水面因为是牛顿流体, 水面最终还是平的, 撞击以后了无痕迹; 而小行星、陨石之类的撞击却留下了撞击坑(crater). 地球遭遇的强烈撞击行为所激起的高温(部分离化的?)尘埃, 还有夹杂尘埃的冲击波, 可能是大规模生命灭绝的原因^[6]. 同样地, 用离子轰击固体表面产生足够的溅射(sputter)后, 也会留下 crater. 地球上的撞击坑由于水、空气和生物的作用, 可能变得不易辨认了, 而月球上的撞击坑的原始形貌得到了有效的保持, 提供了研究撞击和 splash 的样本. 因为 splash 以及 sputter 出来的物质分布在一定空间角内, 这个区域有时就叫做 splash zone, 应该理解为某事件的殃及地区(有时特指辐射区), 如“this is the splash zone!”就有很强的警告意味. 中文语境中警告看热闹的人“离远点, 别崩一身血”, 就是要躲开血以及这件纠纷的 splash zone 的意思. 液体在 splash 以后受重力影响仍要落回, 如果不是回到自身的液面, 而是落到比如地面、纸面上则会形成一定的图案——常常是在人类想象力之外的图案. 一些艺术家似乎看到了这其中的机会⁶⁾. 运用 splash 这种艺术形式, 汉语所谓的泼墨,

纽约学派制造了大批量的画作(… the New York school splashed copious amounts of paint all across the art world…)^[5]. 这口气似有不恭敬的成分.

与 sputter 外形、意思很近的词还有 spatter (bespatter), spurt 等, 可能汉语都要翻译成溅、洒落, 例句如“As the car went by it spattered us with water and mud (从旁边驶过的汽车溅了我们一身泥水)”. 这种自一处(有点主动的感觉)往外水呀、泥呀、气呀的喷溅, 容易使人联想到火山. 实际上, spatter cone 就是指火山喷发物围成的锥体, 图 4 所示即为一 cinder-and-spatter cone. Spurt 来自古英语的 sprutten, 与德语词 spriessen 有关, 意为 to spring fort, 强调的是往前喷、涌, 而不是像 sputter 那样出射物集中在法线垂直于表面的一个锥中, 例句如“blood spurted out (血喷涌而出)”以及“the volcano spurted out rivers of molten lava (熔岩自火山喷涌而出)”. 要是某人一下子 spurted into popularity, 那是成名了.



图 4 火山的 spatter cone. 往上喷射然后四下飞溅, 此为 spatter; 而粘稠的熔岩顺着火山口的外壁涌出, 则是 spurt

前述的 sputter, 总是造成被 sputter 的物体变小了. 如果我们让一块物体净出射光子、电子, 物体自然看不出少了一块, 不知是否可算作 sputter. 笔者赞同图 1 中的理解, 倒是算的好, 毕竟机理和形象上都是一致的. 物理学史上最重要的溅射实验要数用光子轰击金属表面的溅射实验了. 将一束光照射到物体上, 会有电子出射. 此现象由德国科学家 Heinrich Hertz 于 1887 年在金属电极上首次观察到. 当然, 不是什么光照到物体上都会有电子出射的, 否则阳光灿烂的白天我们就没法出门了. 研究者发现, 对应于某种特定的材料(比如某种金属电极), 光波长要小到一定程度上才会有电子出射(在图 5 的电路中能测量到电流). 或者说, 你将一束含有多种频率的光(这是当时实验的真实情况)照射到物体上, 发现自那里出射的电子的动能有个最大值——若将被照射电极对面的收集电极置于一个足够大的负电位上, 电流会消失(见图 5). 如何解释这个现

6) 贪天之功算艺术吗? 我总以为艺术最重要的要素是你能而绝大多数人不能. ——笔者注

象呢? 1905年, 爱因斯坦给出了他对这个现象的解释: 光由一个个的小能量包(光子)组成, 光子的能量同光(束)的频率成正比, $E = h\nu$; 物体中的电子以“all-or-nothing(要么全部, 要么一点也不)”的方式吸收光子的能量; 这样电子出射的动能为 $E_{kin} = h\nu - \phi$, 其中 ϕ 被称为功函数(work function), 表征材料对电子的束缚能力, 只与材料本身有关. 1921年, 爱因斯坦因对光电效应的成功解释获得了诺贝尔奖.

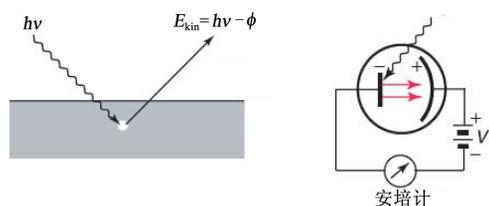


图5 光电效应实验示意图. 在光照射下, 有电子从金属电极上出射, 被对面的电极收集, 从而能在电路中测量到电流

当然, 关于光子自物质中溅射出电子的故事远远没有结束. 关于离子自固体中溅射出原子(离子), 我们可以追究哪个离子溅射出了哪个原子. 如果问哪个光子自物体中溅射出了哪个电子, 似乎是个很外行的问题, 因为我们习惯于用光子、电子的全同性来搪塞类似的问题. 不过, 随着单光子、单电子器件日渐变得时髦和可能, 也许真得问问哪个光子溅射出了哪个电子. 设想用一束单光子流照射一个两能级的单个原子, 每个能级上只有一个电子, 则单个电

子出射的时刻可以指认是哪个光子的功劳, 而电子的动能可以作为示踪参数指示它来自哪个能级⁷⁾. 这样的实验不知是否能回答哪个光子溅射出了哪个电子的问题, 以及是否能带出什么有意义的物理来. 抛之以为砖.

参考文献

- [1] 毛泽东. 毛泽东选集. 第4卷, 第1131页
- [2] Newton Roger G. Scattering theory of waves and particles. Springer, 1982
- [3] Cao Z X, Oechsner H. Nucl. Instrum. and Meth. B, 2000, 168:192
- [4] Cao Z X, Oechsner H. Nucl. Instrum. and Meth. B, 2000, 170:53
- [5] Schlain L. Art & Physics. Harper Perennial, 2007. 96
- [6] Bonnet R M, Woltjier L. Surviving 1000 centuries—Can we do it? Springer, 2008

7) Is it proper to ask the question that which photon in the beam strikes which electron out from a matter? Suppose we have a two (or more) — level atom, with each level occupied by just one electron, under the illumination of a single — photon light source, by registering the moment of presence, and the kinetic energy, of the photoelectrons we can perhaps answer the question which photon strikes out which electron. Even if each energy level hosts two electrons, as in the case of a helium atom, the determination of which photo strikes out electron from which energy level may also lead us to something expected. ——笔者注