

物理学咬文嚼字之二十九

探针、取样和概率

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

Οἶδα οὐκ εἶδωζ(我知道我不明白)!

——Plato in Apolog

摘要 Probe, sample, prove, try, probability 等词汇常见于科学文献, 它们之间有一些微妙的联系, 但在汉语译文层面上却可能被掩盖了. 理解它们之间的联系或许有助于在阅读西文文献时得到更多的信息, 比如在理解 EELS 和 SPM 所表示的一类分析技术时.

人类依赖当前已有的知识理解遇到的新问题与新现象, 如果这种理解是令人满意的(比如没有逻辑上的矛盾, 或者数值上同预期没有什么大的差异), 则这样的理解就可被纳入已有的知识体系. 而如果在当前框架内做不到这一点, 人们就会在已有的知识(架构)基础上, 构造一些新的见解或理论体系, 再试着(try)达成某种理解; 如果发现有所偏差或错误之处(error), 则检讨差错从而对原有的见解或理论体系进行修订¹⁾, 然后再从头来过, 直到取得令人满意的结果. 这即是所谓的试错过程, 英文为 trial and error 或者 trial by error. 当然 trial and error 不只是针对获取知识, 它还是解决问题、确定方案的一种普遍采用的方法.

这里说到的 try 和 trial, 取其 to put to the proof, test 的意思²⁾, 即汉语所谓的“试、试验、测试、尝试”的意思. 与这个意思近似的有一些很有意思的词都出现在物理学和数学文献中, 它们之间意义上的重叠与微妙差别若仅从汉语译文上很难看出来. Try 作为动词“尝试”在德语里的对应是 probieren, 德国人常说的“probiere mal”就是“just try it (试一试)”. 同 probieren 同源的德语动词还有 proben, 是排练、练习的意思. 这个动词, probieren 或者 proben, 其名词形式为 die Probe (样品、练习), 传入英文就采用了简单的 probe 形式. 在英文中, probe 既是名词又是动词, 其本身以及由其拓展而来的词汇充斥物理学文献.

Probe 作为动词, 中文简单地翻译为探测, 似乎忽略了点什么. 在“to probe the structure of Minkowski space in more detail, it is necessary to introduce the concepts of vectors and tensors”一句中, probe 的意思

是探究、to make a searching examination, 因此翻译为“为了从细节上探究 Minkowski 空间的结构, 有必要引入矢量和张量的概念”或许合适. 而在“Lepton and quark are structureless at the smallest distances currently probed by accelerators (轻子和夸克在当前加速器能探测的距离上是无结构的)”一句中, “加速器能探测”在中文语境下似乎有点别扭. 这就是因为 probe 仅仅被翻译成探测, 有些内容未被同时传达的缘故. Probe 不仅仅是探测这个动作, 它还是一种较特殊的探测方式, 一种依赖某种外来的(易操控、易测量、或者有较可靠认识的)信号, 从该信号或该信号的变化中提取关于待测对象信息的探测方式.

Probe 这种探测方式, 中国古人早就聪明地运用过. 战国时齐王的大太太死了, 后任拟从齐王的七个贴身姬妾中选出. 相国田婴为了能向齐王推荐齐王自己中意的新夫人, 就买了七个耳环——其中一个比其它的要好一些——献给齐王, 由齐王分给了姬妾们. 第二天田婴看到那个特殊的耳环戴在了某位姬妾的耳朵上了, 于是就提议齐王立那位女士为夫人, 于是君臣皆大欢喜³⁾. 这个计策采用的就是 probe 技术,

1) 如果所需对旧知识的修正太多, 以至动摇其根基, 那该算作是一场认识上的革命. 然革命不过是更彻底些的修正而已, 其需求和实现的可能深深地植根于和充分地表现在旧体系里, 比如狭义相对论之于经典力学. ——笔者注

2) Try 的本意是分离, 比如通过加热把油从猪肉中榨出来, 提炼金属等等, 多用 try out 的形式. ——笔者注

3) 原文见《战国策·齐策三》:“齐王夫人死, 有七孺子皆近. 薛公欲知王所欲立, 乃献七珥, 美其一, 明日视美珥所在, 劝王立为夫人.”——笔者注

所用的 probe 就是耳环,具体的探测过程是观察 probe 的去向.这种狡猾的诡计及其变种如今也常能在一些场合见到.

上述的例子阐述了用 probe 方法探测的精髓.设想我们要探测一个固体样品(我们下文会谈到样品在德语中是 die Probe)的化学或结构信息,可利用的能携带信息的载体无外乎离子、电子、光子、中子之类的微观粒子,问题是这些信息载体从哪里来?一种是信息载体来自样品内部,可以是自发发射的(spontaneous),或是受到外界激励后才发射的(excited),比如在电子束照射下发出 X 射线荧光.还有一种是,外界的信息载体,比如一束电子或离子,到达样品表面或内部,而后离开该样品.分析信息载体(的变化)可得到关于样品的信息,所用的信息载体束就是 probing beam.这样的分析技术,包括用一种类型的粒子束激发另一类检测信号的(这种情况下 probing beam 指激发用粒子束),都称为 probe analysis, probe spectroscopy 或者 spectrometry.前面提到的所谓“probed by accelerator”,就包含了加速器本身提供了至少一束 probing beam 的事实,因此,简单地翻译成“加速器探测到粒子结构”实际上是漏掉了一些关于实验细节的信息.

上述方法中涉及的电子束、离子束等作为 probe 常常被翻译成“探针”(相应地,那些谱学方法就被译为探针分析、探针技术或探针谱).用“针”这个词以强调其小(典型的是微米大小的束斑),但是这种添加额外限制词的翻译习惯的危害是很大的,它给本来就混乱的关于 probe 的翻译带来更多的麻烦.首先,probe 在一些探测设备中指深入或连接到待测对象的小部件(相对来说是小的),如对高压取样并分压的高压测量探头(high-voltage probe)(图 1),或者只包含几个电极测量样品电阻特征的 conductivity probe(测量土壤电阻特征的被译为探头,测量薄膜电阻率的被译为探针),这些 probe 都是宏观大小的,未必有“针”的形象.此外,在空间探索事业中用到的 space probe,固然相对于空间(space)任何人造设备都有深入空间的形象,且同空间相比也是“针”那么小,但这种场合下 probe 还是被翻译成探测器.Space probe 把探测信息转化成数字信号传给地面上的研究者,形象上等同于一个人类伸出去的 probe,但它们一般是大大头的设备.比如,美国航天局计划 2015 年发射的太阳探测器(solar probe)就重达半吨,其离待探测的太阳表面的距离约为 660 万公里(图 1).为了强调利用电子束、离子束的 probe analysis 能够利用束斑之

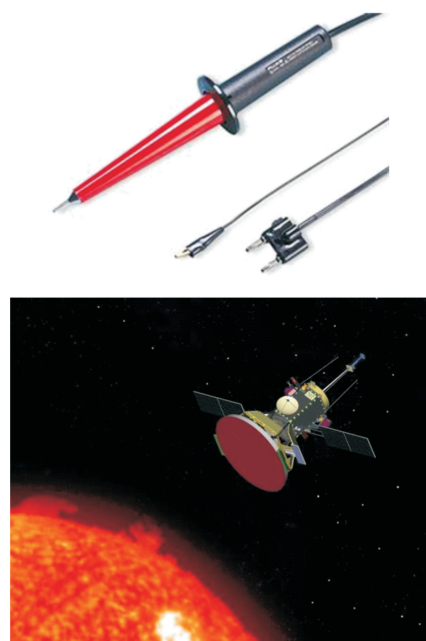


图 1 大块头的 probes. 上图为实验室用高压探头(high-voltage probe),下图为美国航天局计划发射的太阳探测器(solar probe)(图片来自 NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory)

小达成微区分析,人们会在 probe 前面加个 micro,称为 microprobe(微探针).电子探针技术利用电子束本身经历的能量损失过程或激发的 X 射线荧光,达到分析样品化学成分的目的.此技术发展于上世纪五、六十年代.

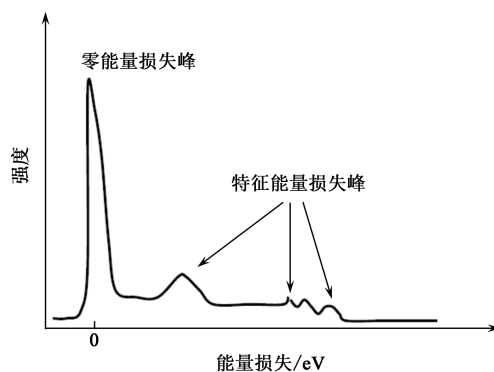


图 2 典型的电子能量损失谱

电子能量损失谱(electron energy loss spectroscopy, EELS)技术作为电子探针技术中一个有趣的成员值得多费些笔墨.将一束单色的电子束照射到固体样品上,则此一 probing beam 中绝大部分电子会反射回来,反射电子中的一部分会经历一些同样品中(上)的某些存在之间的相互作用,表现为损失了一部分能量.图 2 为普适的能量损失谱.不失一般性,图谱的基本特征包括一个对应零能量损失的主峰(弹性峰)和叠加在不高的背景上的一些特征能量损失峰.取决于初始 probing beam 的能量,出现的特征峰可能源于电

子束同样品间不同的相互作用过程,因而会揭示样品的不同特征(注意,只有当入射束的能量同某个特征过程的典型能量值般配的时候,该过程才会被大量激发而被探测到)^[1]. 当 probing 电子束的能量为几百 MeV 时(这要在加速器上才能实现),原子核内部的能级(典型值为 MeV 量级,比如¹²C 原子核的前三个激发态的能级就分别是 4.4, 7.7 和 9.6 MeV)被激发造成入射束的能量损失. 此类能量损失谱证实了原子核是有内部结构的. 当 probing 电子束的能量为几十至几百 keV(透射电镜用的电子束能量常常是 200 或者 400 keV)时,大量的原子内层芯能级(keV 量级)被激发,因此能量损失谱上 keV 水平上的特征能量损失对应的是样品中原子内能级的激发. 由于原子内能级是原子的特征,因此该类电子能量损失谱可以用作对样品的元素分析. 如果初始电子束的能量只在 keV 量级(扫描电镜常用 5keV 能量的电子束),主要的能量损失峰为能量十几或二十几 eV 的等离子体激元(plasmon),根据该峰的峰位可以计算样品中价电子的浓度,直观上可以判断样品是导体还是绝缘体. 如果入射电子束能量为 20eV 左右,则能量损失主要由与吸附在固体表面上的原子、分子有关的振动、转动能级引起,典型能量损失值为 0.1eV 量级. 利用这种能量损失谱,其能量分辨率如今能达到 1meV,能够研究原子在固体表面的吸附位置、吸附分子的构型等内容. 这个领域的权威是 H. Ibach, 笔者印象中有将这种可作为 surface probe 的能量损失谱称为 Ibach EELS 的说法,未知确否,不过以 Ibach 命名的此类能量分析器却是有的.

科学上利用 probe 的技术来自大自然和日常生活. 人类依赖多种感觉来感知环境,并开发多种工具拓展感觉能力. 动物也会利用和故意强化某些感知能力. 啄木鸟、多种水鸟的长喙是 probe(图 3),蛇的舌头、盲人的手杖也是 probe. “黑夜之中,只听得笃、笃、笃……一声一声自远而近地响着,有人用铁杖敲击街上的石板,一路行来……(金庸《鸳鸯刀》)”,就是一个盲人利用机械探针的工作场景. 利用各种可能的 probe 原理,人们自上世纪八十年代已经研制出了一类扫描探针技术(scanning probe spectroscopy)(图 3),包括扫描隧道显微镜、原子力显微镜、近场光学显微镜、扫描霍尔探针显微镜等等,具体探测的信号包括隧穿电流、振荡频率的漂移,等等. 扫描探针技术肇始于 1981 年发明的扫描隧道显微镜,它利用隧穿电流对电子态密度和势垒宽度的灵敏依赖,使人类实现了“看”原子的梦想. 扫描隧道显微镜倒是用到了金属“针”尖,不过其对应的名词是 tip(图 4),

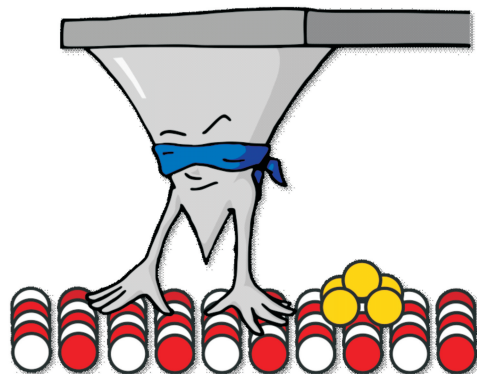


图 3 啄木鸟(上图)以及许多生活在湿地、浅滩的鸟类都靠长长的喙作为探针觅食;扫描探针技术(下图)是将某一类探针安装在能够精确移动的悬臂或底座上,探针的工作原理提供表面上某点的信息,移动探针可获得该信息在表面上的分布. 这两者有某些共同点,比方使用敲击模式(tapping mode)工作

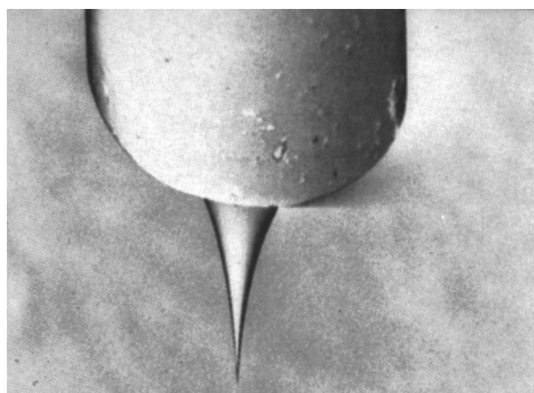


图 4 典型的 STM 使用的金属针尖(tip),其顶端甚至被要求为原子级尖锐的

针尖以及安装针尖的压电陶瓷底座一起构成 probe. 利用 probe 技术可以研究样品的许多性质,化学的、力学的、物理的,具有原子或者原子状态分辨能力的扫描探针谱技术极大地促进了科学技术的发展. 此外,探针的功能当然不限于 probing,而且还有操控(manipulation)的能力(图 5). 扫描探针搬运原子,光镊子移动大分子都是基于同样的考虑.

利用 probe 技术可研究样品的性质,有趣的是,

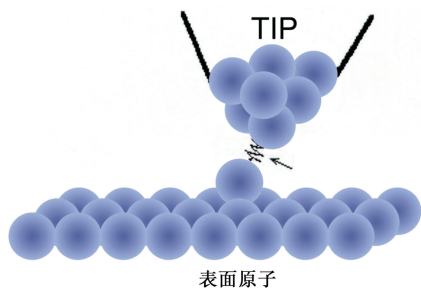


图5 Probe 不仅探测,还能操控.水鸟的喙能捡起小螃蟹,扫描隧道显微镜的 tip 能移动原子

probe 在德语中本身就是样品、样本的意思,例如 eine Probe vom Blut (血样), Probenvorbereitung (样品制备) 等等.考虑到扫描隧道显微镜的发明人、研发 EELS 技术的许多大家都是说德语的,知道这一点也许是有益的.样品,英文常用 sample,但 sample 也是动词.sample,也即 example,来自拉丁语,名词形式为 exemplum,动词形式为 eximere,本意为取出(to take out),这近似地也正是 try 的本意.Sample (取样),或者 take for example,就是自某个整体中取出一部分,因此 sample 可以是某个整体或群体之一小部分,这样品是被寄予了能代表全体的希望的.比如,为了检查火柴是否合格,当然不能把所有生产的火柴都划一遍,实际采用的是随机抽取一些样本(此过程为 random sampling)加以检验;为了研究南极冰层所记录的气候变迁的信息,当然不可能把整个冰盖到处给切开来看,实际的做法是选择一些地点钻探取出冰芯样本(ice-core sample)(图6).取样(sampling)的做法是为了用少量的成本从局部获取关于整体的信息.地质钻探也属于 probing skills 的一种.

补充一点,汉语中的样品、样本有时对应的西文词是 specimen. Specimen 这个词同 spy, spectre 同源,是看、观察的意思.笔者印象中这个词多用于生物学、医学方面的样品,如尿样(urine specimen)、血样(blood specimen)、植物标本(plant specimen)等,可能因为历史上对这些样品的研究手段只是观察而已.

许多读者可能早已注意到,西文中 p, v, b 之间经常会客串,将 probe 的字母“b”替换成“v”,我们就得到了 prove, 其本意为试探以求证实(to test, to show, to



图6 利用钻探这种 probing 技术获得的冰芯 sample

establish to be true),同 try 的意思很近.实际上,probe 与 prove 都来自拉丁语 probare. 其相关的形容词为 probable, 名词为 probability. 在刚才谈到取样时,笔者压住了指出它是概率论这门科学中的专业词汇的冲动.概率论,英文为 probability theory, 如果我们知道了 probability 的动词形式为 probe, prove, 不知是否对这门科学的内容和方法会有会心一笑的理解? 注意,将 probability 随手翻译成概率是不负责任的,它只在落实到(0,1)之间的某个数值或被表达为某个比值时才是概率.很多时候它的意思就是“可能性”;比如 the probability of resolving a single atom (分辨单个原子的可能性),关注的就是“行还是不行”的问题.

本文笔者分析了 probe, prove, sample, try, probability 以及相关词汇的血缘关系和用法,可以看到这几个词(try 除外)之间存在词源上的微妙关系.因为历史的原因,中文翻译不能顾及到它们之间的内在联系,因此也妨碍了我们理解这些词汇作为科学专有名词所表达的科学内涵.比如,探针(probe)技术的工作方式就是 to probe, 亦即到 to test, to prove. Probe 的敲击模式(tapping mode)就是一个 sampling 过程,而像扫描隧道显微镜这个最先出现的扫描 probe 技术,实际探测的就是电子隧穿的 probability. 由此,笔者想起了 Michael Polanyi 的一句话:“No statement can carry conviction unless it is understood, and all understanding is tacit(大意是,任何表述只在被理解了才传达信念,而所有的理解都是默认的)”^[2]. 当我们阅读的时候,我们的理解很多时候恰恰依赖于我们知道多少那些字词当其时未能明确表达的意思.而翻译,如果未能照顾到那些原有的默认的(tacit)意思,其所带来的理解上的损失,想必有一些吧.

参考文献

- [1] 曹则贤. 物理, 2004, 33: 282; 33: 372 [Cao Z X. WuLi (Physics), 2004, 33: 282; 33: 372 (in Chinese)]
 [2] Polanyi M. Rev. Mod. Phys., 1962, 34: 601