

凝聚态核科学的实验研究

◎ 张武寿

自 1989 年弗莱希曼 (M. Fleischmann) 和庞斯 (S. Pons, 下面合称二人 为弗-庞) 宣布发现氘-氘 (D-D) 冷核聚变以来^[1], “冷聚变” 这个充满争议的研究领域已经形成有二十多年。如今, 该领域的研究范围已远远超出核聚变, 包括了一大类无法解释的, 在凝聚态中发生的核聚变、核嬗变以及核反应截面增高等异常现象, 通称为凝聚态核科学。

核反应与凝聚态核科学

最基本的核反应是裂变和聚变。裂变即重核分裂为多个轻核, 如原子弹利用的就是 (链式) 裂变反应。而聚变相当于裂变的逆过程, 即多个 (通常是两个) 轻核聚合成重核, 氢弹利用的就是氢同位素氘-氚 (D-T) 聚变为氦的反应。核反应放出的能量比化学反应高得多, 如 D-D 热聚变时平均每个氘核可放出 5.1 兆电子伏的能量, 换算成每克氘的聚变能相当于 8.5 吨标准煤的热值, 所以聚变反应蕴含着巨大的能源利用前景, 对其研究已经持续了半个多世纪。核裂变需要克服核内质子与中子间的短程吸引力; 核聚变需要克服反应核间正电荷的库仑排斥力, 其大小正比于两核各自正电荷数的乘积, 称为库仑势垒, 即使是最简单的聚变反应, 如 D-T 或 D-D 聚变也需要克服 0.288 兆电子伏的势垒, 这对应着约 30 亿摄氏度的高温。考虑量子隧道效应与热等离子体的能量分布后, D-T 聚变也要 1 亿摄氏度 (D-D 聚变要 2 亿摄氏度) 以上的高温才能发生可持续的反应。

核反应涉及的能量值 ($> 10^6$ 电子伏) 远大于化学反应和凝聚态层次的物理化学过程 (< 1 电子伏), 核反应截面比化学反应小 6 个数量级, 反应过程也快得多。因此通常情况下化学环境对核过程几乎没有影响 (穆斯堡尔效应等极少数情况例外), 这正是核性质的

化学无关性。而凝聚态核科学正相反, 实验发现适当的物理化学条件可极大地促进某些核反应的发生, 这相当于在传统的核物理与物理化学 (和凝聚态物理) 领域间的巨大鸿沟上架设一座座桥梁。

本文以特征能量为标准, 概述从 10^4 电子伏到 10^{-2} 电子伏能级 (相当于亿摄氏度到室温) 范围、从简单到复杂的多种体系中的异常核效应, 阐述凝聚态核科学现象。

主要实验结果

束靶反应中的屏蔽能异常增高

自卢瑟福通过散射实验发现原子的行星模型以来, 束靶反应成为研究核物理与高能物理的经典方法。有趣的是, 近十年来隶属于意大利国家核物理研究院的一个国际性小组 (简称 LUNA) 对许多含氘材料中的 D(d,p)T 反应 (氘-氘反应生成质子和氚) 的截面随束能量变化进行了系列测量^[2], 发现许多金属中反应的屏蔽能远高于半导体与绝缘体中的数值, 且无法用已有屏蔽理论解释。其中 B Ⅲ族、B Ⅳ族、La 系金属吸氢后形成化合物的屏蔽能与气体靶中的 25 电子伏接近。而采用含 D 的 Pt 靶上的 D(³He,p)⁴He 反应, 屏蔽能为 (680±60) 电子伏, 与氘-氘反应的屏蔽能 (670±50) 电子伏相同, 说明屏蔽是金属内禀性质, 与入射粒子无关。

不仅 D(d,p)T 反应在低能时出现截面增强, 而且 D(d,n)³He 反应亦然。如王大伦小组发现氘气放电产物 2.5 兆电子伏中子的测量值与张信威小组理论模拟值间比值随放电电压降低而增加, 电压愈低, 实际产额愈大于理论值, 在 4 千伏时实验值与理论值比值达 1000^[3]。

日本的笠木治郎太不仅发现了钯 (Pd) 复合膜中 D(d,p)T 反应的屏蔽能增高, 还证实了含锂 Pd 片中 ⁶Li(d,α)⁴He 反应的屏蔽能为 (1.55±0.40) 千电子伏, ⁷Li(d,α)³He 反应屏蔽能为 (1.76±0.30) 千电子伏, 而 Au 片中相同反应的屏蔽能只有 (0.06±0.15) 千电子伏^[4]。有

张武寿: 副研究员, 中国科学院化学研究所, 北京 100190。

Zhang Wushou: Associate Professor, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190.

趣的是后来用纯锂作靶时, 锂本身发生液固相变导致屏蔽能从 700 电子伏降为 400 电子伏。说明不同金属, 甚至相同金属的不同状态都对核反应有不同影响。

上述结果说明冷聚变不是孤立的物理现象, 而是低能条件下屏蔽能增高的极限情形, 也说明在高能核反应与低能核反应(凝聚态核科学的另一种说法)间存在过渡区域。

超声聚变

其实在冷聚变之外, 近年来人们还在其他近室温系统中实现了聚变, 其中引人注目的有气泡聚变以及其他超声聚变。

声聚发光使能量密度提高 10^{12} 倍, 因此有人设想利用该过程在桌面上实现热聚变, 这个设想由塔利亚克汉(R. Taleyarkhan)变成了现实^[9]。2002年, 他在美国《科学》上报道用超声波照射氘代丙酮(C_3D_6O)产生中子。测量表明中子产额为 $(4-8) \times 10^4$ 个/秒, 两年后增加到近 4×10^5 个/秒。氘与中子数目一致, 符合氘-氘聚变的产物比例。能谱测量表明, 中子应该是氘-氘聚变产物。此外, 对 10000 个声脉冲周期内产生的中子与光子进行测量, 发现二者大体同步, 说明中子产生于 C_3D_6O 气泡内聚变发光过程。 C_3H_6O 的对比实验表明无任何核异常。

该结果发表后, 就有多人撰文用理论与实验证明气泡内的能量即使考虑其上限也达不到发生可观测水平的聚变, 因此不排除该结果是冷聚变的可能性。

气泡聚变的主要问题还是重复性, 至今尚无人独立重复该实验。另外, 关于塔利亚克汉工作中的科研不端行为曾经多次闹得沸沸扬扬, 但多轮调查并未发现数据造假, 主要是组织程序等问题。

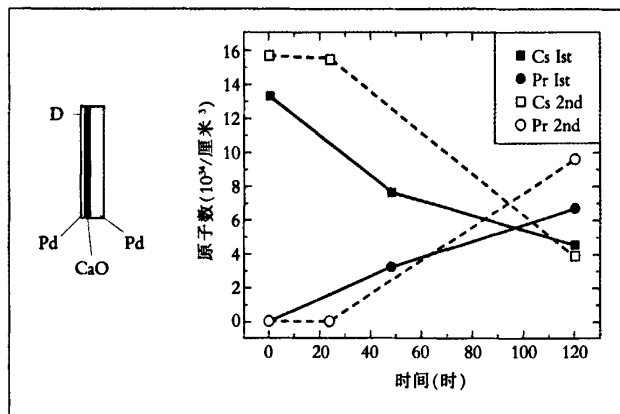
其实在凝聚态核科学研究中, 美国的斯特林厄姆(R. Stringham)早已用超声空化法激发了核反应。他把超声波输入内置 Pd 膜或 Ti 膜的流动重水反应室中产生超热。美国能源部的奥利弗(B. Oliver)对 Ti- D_2O 反应室中的气体产物进行质谱分析, 在 6 个月前对 3He 的测量表明与氦衰变产生 3He 量的变化相一致, 说明超声空化导致氦产生。2002 年报道 Pd- D_2O 反应室的主要核产物是 4He 。

钡-氦气系统

(1) 氦气扩散通过钡基多层膜中的核嬗变

日本三菱重工的岩村康弘用氦气扩散通过钡片多层膜观测到核嬗变现象^[9]。先用厚 0.1 毫米的钡片, 两面分别为氦气和真空, 氦气侧钡片交替沉积 5 层 CaO (2 纳米) 和 Pd (18 纳米) 膜, 再用电化学方法沉积 1 层铯(Cs), 然后使氦气扩散通过钡片。一周后用 X 射线光

电子能谱(XPS)检测发现铯(Pr)出现, 铯减少。用二次离子质谱(SIMS)分析表面, 发现产生的铯同位素分布与天然的不同, 而与铯分布有对应关系, 即可能的核反应途径为: $Cs+4D \rightarrow Pr$ 。当表面沉积铯时发现铯减少, 钼(Mo)出现, 可能的反应途径为: $Sr+4D \rightarrow Mo$ 。其他条件相同但用 H_2 取代 D_2 时未测到表面元素异常变化。



岩村康弘实验中 Cs、Pr 在样品表面密度随时间的变化

进一步研究表明 Pr 数量正比于通过 Pd 中的 D 流。对表面 Pr 深度分布的测量表明活性层厚度为 10 纳米。在 X 射线荧光(XRF)的表面二维元素分布测量中, 发现三个样品上有些位置有 Pr 似的 X 射线 $L\alpha$ 峰, 表明核反应集中于某些活性区。日本已有小组用感应耦合等离子体质谱(ICP-MS)和中子活化分析(NAA)在相似条件下证实了 $Cs \rightarrow Pr$ 反应, 还有人在真空侧(而非氦气侧)镀膜测到 $Cs \rightarrow Pr$ 反应。

根据核物理常识可知, 上面的核反应需要克服的库仑势垒是 55(或 38)个正电荷与 4 个正电荷之间的, 这种多体反应的截面比氘-氘反应截面小的倍数本身已是天文数字, 传统核物理根本不能解释此现象。该结果的重要性还在于它完全是一个物理实验, 不涉及化学变化, 符合物理学的简单性、理想性要求, 具有重要的科学意义。

(2) 纳米钡-氦气系统中的超热与核产物

日本荒田吉明-张月嫦小组与美国的凯斯(L.C. Case)都用钡微粒-氦气系统实现持续的热产生, 同时测到 4He , 该类系统的特点是比较简单, 如有其他人独立重复, 也有可能成为凝聚态核科学的判决性实验。

荒田-张氏小组的工作已进行了多年^[7], 他们的早期工作关注于内置钡粉的钡管阴极电解产生超热, 后来直接把内置钡粉的钡管放入高压氦气中, 这几年仅用 Pd 粉- D_2 系统获得超热。其特点是超热较大, 工作时间长, 结果兼具有应用价值。

2008年,荒田-张氏小组在大阪大学演示了他们的超热。结果表明:内置纳米Pd/ZrO₂的钢瓶充入100大气压的D₂气,在50小时后钢瓶内温比环境高1.6℃(约4瓦超热),用纳米Pd/Zr-Ni的内温比环境高1℃;而用H₂气、纳米Pd/ZrO₂的系统在8小时后内温就与环境相同。日本的北村晃、意大利的切拉尼(F. Celani)已部分重复了荒田-张氏小组的结果。此外国内的田坚小组、法国的比伯里安(J.-P. Biberian)也用钡-氙气系统获得超热。

钡-重水电解系统

钡阴极电解重水产生超热至今仍是凝聚态核科学中研究最多也是了解最深的现象,它已明确的特征如下:在电解过程中钡阴极吸收氙气进入金属内并在其中发生聚变,与热聚变不同,核产物主要是⁴He,只产生微量的氙、比本底计数稍高的中子等放射性元素。当然,因为现象本身的化学敏感性,结果要复杂得多,具体机理仍在不断争论与探索中。

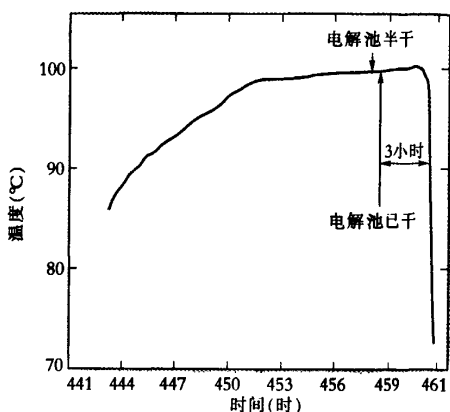
(1)超热

钡阴极电解重水产生超热的结果以弗-庞型为代表。弗-庞型电解池是一个细长的玻璃杜瓦瓶^[1],其中装入钡阴极和同心密匝缠绕的铂丝阳极、温度计、电阻加热器、排气管等,管口密封。电解液为氙氧化锂重水溶液,电解池放在恒温水浴中。通过温度测量获得电解池输出热功率,输出功与输入功之差称为超热(excess heat,实际是超功)。弗-庞典型超热结果的主要特征是电压降低而温度升高的正反馈现象,这说明是由电化学过程以外的热源所导致,否则只有负反馈现象。包括笔者所在的研究组等多个小组都观察到类似现象。

弗-庞型装置的缺点在于热测量的复杂性,为此人们设计专门仪器进行热功率测量。笔者也自制热导式量热计研究超热^[2],在反复实验中发现产生超热的关键有如下几点:一是样品的高温预电解处理有利于以后电解过程中出现超热;二是电解过程中的温度升高有利于出现超热;三是电解液中的添加剂有助于出现超热。在使用这些方法后超热重复性大幅度提高。

钡阴极电解重水的另一个显著特征是能够产生高超热,说明冷聚变不仅是科学现象还具有能源利用前景。在弗-庞的一轮实验中用4个试管、直径4毫米的钡棒同时恒电流电解,两周后每个电解池的温度都在半小时内突然升高到沸点,在电解液耗尽后仍保持100℃达3小时,即阴极不需要输入功就可自加热。因为杜瓦瓶内固定电极的聚三氟氯乙烯已融化,所以电解末期的温度应该在300℃以上。

日本水野忠彦的一个类似实验也很说明问题,约100克的钡管一直产生好几瓦的超热达一月,最后电



弗-庞1992年实验中观察到的热自持现象

极变得红热,超热已过百瓦,电解池无法继续冷却电极。水野忠彦遂把电极扔入一桶水中,水烧干后继续加水,如此在11天内共加入37.5升水才冷却下来。仅冷却水的蒸发热就达85兆焦,连同前期超热该电极共产生97兆焦能量,相当于2.8升汽油的热值,可驱使普通小轿车行进27公里。

这些高超热特点有四:一是开放电解;二是高温,常常在沸点附近,最高达300℃以上;三是大样品,样品尺寸都在毫米以上,没有毫米以下的样品;四是出现热自持现象。现在核电站的功率密度是20瓦/克或150瓦/厘米³,而上述弗-庞实验中的自持热功率达3.7千瓦/厘米³,由此看来,冷聚变将来很有可能用于供热、发电。

超热一般需要外源激发来产生,如多年来人们利用高电压、磁场、热等各种方法激发超热,其中使用激光的重复性较好。

最早发现该效应的是美国的莱兹小组(D. Letts)^[3],他们先使用Pd片电解充氙,然后使用Au辅助电极做阳极,Pd阴极镀金直到变黑。断开Au阳极电路并继续原电解过程,用红色激光照射阴极可激发超热产生。在三年内超过千次的实验中观测到比激光自身功率大5~30倍的超热。在一例实验中用682.3纳米、30毫瓦的激光照射产生最大达350毫瓦的超热。此后多个小组重复了该结果并发现只有适当的Au厚度才起最佳作用,但超热对波长依赖关系不太明显。莱兹小组、意大利的维奥兰特(V. Violante)小组皆证实激光极化方向影响超热。

2009年莱兹与哈格尔斯坦(P. L. Hagelstein)合作使用不同波长的激光形成拍频,在8.3太赫、15太赫、20.5太赫为中心、半峰高宽度为2太赫的三个拍频频附近出现超热峰值,其他拍频区无超热^[4]。

(2)核产物

在冷聚变出现初期,因为测到的辐射核产物中子和氦远低于热核聚变对应的期望值,所以有人推想反应途径主要是: $D+D\rightarrow{}^4\text{He}+23.85$ 兆电子伏,即主核产物是 ${}^4\text{He}$ 。迈尔斯(M. H. Miles)、高桥亮人、荒田-张氏等小组先后证实了 ${}^4\text{He}$ 与超热的正相关性。迈尔斯最早测得 ${}^4\text{He}$ 与超热的比值为 $(0.7\sim 2.5)\times 10^{11}$ 原子/焦,其上限已与期望值一致,说明上述设想正确且反应在近表面区。经过多年努力,麦库布雷(M. C. H. McKubre)和维尔兰特两小组测量出的 ${}^4\text{He}$ 为理想值的 $50\pm 15\%$ 至 $100\pm 10\%$ 范围内,说明 ${}^4\text{He}$ 确实是主要核产物。

另一个容易测量的累积核产物是氦。氦产生具有猝发性和随机性,且产量比 ${}^4\text{He}$ 少9个数量级左右,比较典型的几个结果如下。

美国的克拉克(W. B. Clarke)^[11]用荒田吉明提供的曾经电解半年左右、内含近5克钯黑的Pd圆筒内气相中测到原子数为 $(2.3\pm 0.5)\times 10^{12}$ 厘米⁻³的 ${}^3\text{He}$,相隔54天后测到 ${}^3\text{He}$ 增加,电极外壳上 ${}^3\text{He}$ 的分布随径向厚度变化,愈往外愈少,这些都说明 ${}^3\text{He}$ 是T衰变来的。

印度巴巴原子研究中心(BARC)在Pd阴极电解重水实验中观察到大量的氦产生,其主要特点如下:其一,氦、中子产生时间是随机的、猝发式的;其二,在测量到中子猝发后也观察到氦增加,说明二者同时产生;其三,中子与氦的比值为 $10^{-6}\sim 10^{-9}$ 。

国内王大伦小组最早于1989年4月用钯管电解重水观测到氦与中子产生,其模式与BARC的类似。

美国博克里斯(J. O. M. Bockris)小组于1993年在重水中长时间电解过的钯电极表面1微米厚度区域内发现很多新元素,这是最早的核嬗变报道并于其后得到多个小组确认。日本水野忠彦在钯阴极高温等离子体电解中也发现很多嬗变核产物。虽然与 ${}^4\text{He}$ 产生相比,嬗变产物的规律性还不十分明显,但有些模式已很明确。如笔者与美国的戴施(J. Dash)合作多次在重水中电解后的钯阴极,特别在边缘、裂缝与火山口形貌的中心等三种位置上测到明显的银元素信号,少数样品点主要是银,甚至是纯银。此外还测到镍、镉、金等产物,但出现概率要小得多。

美国海军武器实验室的斯帕克(S. Szpak)小组电解钯盐重水溶液,使钯与氦在阴极上共沉积以降低充氦时间,结果观察到超热、X射线和带电粒子等多种核辐射。2005年,他们用金箔为阴极,电解含钯盐,电解池外用平行铜板加6千伏高压形成平行于阴极面的电场。实验结束后用能量色散谱(EDX)在样品表面测到Al、Mg、Ca、Si和Zn等新元素。2007年,他们用CR-39底片在电场加磁场的条件下捕获很多质子与 α 粒子形成的径迹。特别是最近用CR-39观察到三

重径迹^[12]。在该系统中,只有9.6兆电子伏能量以上的高能中子才能引起碳的破裂反应 ${}^{12}\text{C}(n,n)3\alpha$,从而形成这种三重径迹,这说明Pd-D电解过程中产生了高能中子。这是冷聚变实验中第一次得到如此高能中子的证据。

钛-氦系统

在吸氢金属中,钛比钯便宜得多,如果钛能够产生超热无疑具有明显的实用价值。国内苟清泉小组和美国戴施小组都报道了钛阴极电解重水产生超热,但同类工作较少,钛-氦系统中最多的结果是关于核测量的。琼斯(S. E. Jones)最早报道用钛阴极电解重水产生中子,此后意大利的迪尼诺(A. De Ninno)小组最早在钛刨片-氦气密封系统中,在室温与液氮温度间高低温循环过程中用BF₃计数管测到中子发射,中子也是猝发式的。印度BARC在1989年用钛阴极电解重水测到比本底信号高1倍的中子,总共产生近 3×10^7 个中子,氦信号增加3个数量级,氦总量约为 1.4×10^{14} 个原子, $n/T=2\times 10^{-7}$ 。

BARC最显著的结果是用稠密等离子体聚焦装置(DPF)得到的^[13]。用一个钛柱分别作阳极、阴极多次放电后静置五周,然后用NaI探头在钛柱头上测到约392微居里的氦(10^{16} 原子),而当时放电产生的中子不过 10^9 个。为验证氦产生,用X光胶片放在钛柱头66小时,结果胶片曝光。在几个月后还可得到相同的影像,说明氦分布稳定。影像表明氦分布集中于电极边缘、晶格内的一些点和晶界上,但对经过相同处理的黄铜、不锈钢和铝的放射自显影没有影像,估计氦是在放置过程中产生的。

镍-氦系统

镍-氦系统的工作主要以美国多个小组的镍阴极电解轻水和意大利皮安特利(F. Piantelli)小组的镍-氦气系统为主,此处着重介绍前者。

1991年,米尔斯(R. L. Mills)小组最先报道Ni阴极电解H₂O时测到超热^[14]并为他人证实。该系统的最大进展是帕特森(J. A. Patterson)的镀镍微球电解轻水实验,微球是直径1毫米的苯乙烯塑料,先在微球表面镀铜闪,然后交替电镀镍、钯形成多层膜,用数以千计的小球作阴极电解轻水。在一个工业展览中输入1.4瓦的电解功率,输出热功率达到1280瓦。但只能维持几个小时即镀层脱落,无法继续工作。

美国的米利(G. H. Miley)等人在经过长时间电解的帕特森型镍和镍-钯多层膜阴极中用多种分析手段观测到原子序数在3~92间的稳定核素。所产核素集中于原子序数约为6~18、22~35、44~54和75~85的四群中,核素产率的峰值在原子序数约为12、30、48和80

处。其中一例是经过两周电解共生成 1 毫克的核素, 即有大于 40% 的金属嬗变为其他核素, 元素产率为每毫升金属膜每秒产 10^{16} 个原子, 平均每个金属原子产能近 60 千电子伏。产物的同位素丰度与天然丰度完全不同, 表明是核嬗变产物。核素集中分布于金属体内部也说明核素不是由外界扩散进去的。用磺化塑料球作阴极的对比实验也证明了观察到的核素不是杂质污染, 不同实验室的样品都给出相似的结果, 说明它是可重复的。用钨阴极也测到类似的四群核素, 但产率比镍和镍-钨多层膜低好几个数量级, 说明弗-庞型实验中用轻水测不到超热是反应率太低所致。当用玻璃代替塑料作为金属膜的衬底时高原子序数的两群核素产率明显降低, 表明衬底材料对核过程有明显影响。他们未测到中子、X 射线和 γ 射线。此外, 日本的水野忠彦也在重水高温高压等离子电解过的钨阴极中观测到大量嬗变核产物。他们的结果说明嬗变是比聚变更普遍的凝聚态核反应现象。

除上述系统外, 还有很多体系产生了现有理论无法解释的能量或核辐射。如乌克兰和俄罗斯小组用穆斯堡尔效应证实了各种酵母和病毒培养物中 Mn 和 D 存在时有 ^{57}Fe 生成, 可能的反应途径为: $^{55}\text{Mn} + \text{D} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$ 。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的克莱特 (T. N. Claytor) 在钨-氦气放电系统中测到显著的氦产生。俄罗斯科学工业联合体 (LUCH) 的卡拉布特 (A. B. Karabut) 小组在金属-气体放电系统中观测到超热、X 射线和中子, 国内王大伦小组在金属-氢 (氘) 气放电系统中测到异常的 X 射线等等。

理论解释

虽然凝聚态核科学的实验证据已很多, 但学界主流至今仍未承认, 其原因除实验本身的复杂、自治性不够和重复性低等问题外, 很重要一点就是理论上无法理解。虽然人类从来没有直接观察到过黑洞, 但人们普遍相信它的存在, 原因就在于理论支持它。其实从超导发现以来一个世纪的历史就可理解凝聚态核科学理论的困难所在, 昂尼斯 (K. Onnes) 在 1911 年就发现了金属的超导电性, 但过了近半个世纪由巴丁、库珀和施里弗提出 BCS 理论后人们才理解了超导的微观机理, 而 1986 年发现的高温超导现象直到现在其具体机理还众说纷纭。凝聚态物理这种区别于以前基础物理问题解决时间的原因在于其中包含了大量的多体复杂相互作用, 而科学的最根本特点是分析主义的, 正是复杂世界与简单分析之间的基本矛盾造成了凝聚态物理的很多理论困难, 这也是凝聚态核科学的基本困难所在。

按目前认识, 凝聚态核科学理论至少要解决三个

问题: (1) 库仑势垒问题: 即反应核如何在低能条件下克服如此高的库仑势垒; (2) 分支比异常: 为什么低能核反应路径完全不同于传统束靶反应, 明显者如 D-D 反应不放出氦和中子却放出大量 ^4He ; (3) 能量释放问题: 反应能为什么不是以核辐射而是以热量的形式放出。当然问题还有很多, 如为什么含氢系统的核反应以嬗变为主而含氦者以聚变为主等等, 所有理论都必须同时解决这些问题。另一方面, 如果理论可以正确解释其中的一个那么也应该可以解释全部问题。各种理论正是针对这些问题并结合一些实验现象提出的。

可以不夸张地说, 凝聚态核科学中的理论模型数目要多于其研究者——有人提出过好几个理论, 但得到众人认可的理论则很少。斯托姆斯 (E. Storms) 说, 现有模型的 99% 要淘汰掉, 笔者相信这也是 99% 理论工作者的意见, 虽然每个人都希望自己的理论成为幸存者。这些理论几乎遍历了物理学各个层次, 而绝大多数模型存在致命缺陷。实话说, 对具体模型的讨论费力不讨好, 这里仅概述一些具有共同特点或曾经有过一定影响的理论。

最接近传统解释的理论是基于凝聚态物理讨论各种屏蔽效应如何提高核反应率, 如上述的 LUNA 小组、美国的米利小组、意大利的维奥兰特小组、弗里松 (F. Frisone) 等就讨论内壳层电子、晶格变形与空位缺陷、等离激元和 d 电子等对屏蔽的影响, 当然这些理论都不足以解释实验结果。稍微走得远一些的路线是建立含氢金属中各种元激发与核反应的关系, 如哈格尔斯坦的声子理论, 丘博 (Chubb) 叔侄的离子带态模型, 金英一的玻色-爱因斯坦凝聚机理等等。

各种尺度、包含各种粒子的团簇模型也是理论家们钟爱的对象。理论家们希望以此降低核反应的库仑位垒。粒子数少的如各种小氢 (氘) 原子、分子模型有: 国内的张信威提出电子以光速运动, 会以比经典数值大的概率接近原子核形成新束缚态——小氢 (氘) 原子; 美国的米尔斯、穆伦伯格 (A. Meulenberg), 国内的张中良与张兆群、鲁润宝都提出新的氢 (氘) 原子或分子束缚态 (亚稳态)。多粒子团簇模型, 如斯托姆斯认为氦与金属形成团簇, 舒尔德斯 (K. Shoulders) 的电子团簇、刘易斯 (E. Lewis) 的类似于球形闪电的等离子体团、阿达门科 (V. Adamenko) 的电子-核子等离子体团簇等等。小尺度的有各种新的核结构理论, 如法国的迪富尔 (J. Dufour) 提出 D-D 间存在汤川型吸引势, 澳大利亚的霍拉 (H. Hora) 进一步发展原子核壳层模型, 提出更高的质子、中子和总核子数幻数的存在, 以解释米利观察到的嬗变核产物分布。而各种多中子态理论也一直不断, 如美国费希尔 (J. C. Fisher)、日本小岛英夫

分别提出的中子滴理论,杨介甫的双中子态模型等等。

另一种是借助于量子力学中各种提高隧穿概率的机制,如类似于传统 μ 轻子催化聚变的电子催化聚变,或早期如布什(R. T. Bush)、现在如李兴中等坚持的共振隧穿模型,李家全的复合隧穿模型等等。从更基础的物理角度解释冷聚变的理论也不少,如零点能模型(国内如江兴流)。因为凝聚态核反应实验都要求非平衡条件,所以也有人寄希望于量子力学中的含时相互作用,如日本的高桥亮人、俄罗斯的车臣(V. A. Chechin)等等。

虽然有很多学者期望提出好理论能解释并指导实验,现实情况是因为现象的复杂,理论还落后于实验。也许只能等到判决性实验出现后才可能真正指明理论努力的方向,就像超导中的同位素效应说明了声子参与超导机制一样,这还取决于实验工作者的努力。

笔者认为^[1],凝聚态核科学的实验结果首先表明人类可通过小型器件在比较容易达到的温和条件下实现以前只有大型加速器才能实现的高能反应,这意味着中低能核物理实验的小型化,而且对宇宙元素的产生和演化研究、核能利用可能产生革命性影响。

其次,聚变是人类能源问题的永久解决方案之一。按照冷聚变中D-D反应生成 ^4He ,且能源效率与现在的百公里耗油十升相当,那么现在零售价人民币150元的30毫升重水中氘-氚冷聚变释放的能量就足以驱动小轿车运行100万公里。而冷聚变的实现过程要比热聚变平和得多,也无核污染和温室气体排放。所以,

冷聚变有可能理想地解决全人类的能源问题。

此外,凝聚态核科学实验中物理化学层次的变化可以改变核放射性,因此现在核电站与核裁军产生的放射性核废物可通过该途径实现永久性安全处理。形象地说,冷聚变不仅可替热聚变拉车,还能为核裂变打扫卫生。凝聚态核科学对科学技术及人类生活方式的影响有些是可预见的,更多是超出目前人类想象的。

[本文相关研究工作得到国家重点基础研究发展计划(2009CB226113)与国家基金(20673129)资助。]

- [1] Fleischmann M, et al. *J Electroanal Chem*, 1989, 261:301; Erratum, 1989, 263:187.
- [2] Costantini H. *Rep Prog Phys*, 2009, 72:086301.
- [3] 王大伦,等.国家科学技术委员会与国家自然科学基金资助项目(19455001)总结报告.北京:国家自然科学基金委员会,1998:4-27.
- [4] Kasagi J, et al. *J Phys Soc Japan*, 2004, 73:608.
- [5] Taleyarkhan R P, et al. *Science*, 2002, 295:1868; *Phys Rev*, 2004, E69:36109.
- [6] Iwamura Y, et al. *Jap J Appl Phys*, 2002, 41(1A):4642.
- [7] Arata Y, Zhang Y C Y. *J High Temp Soc*, 2008, 34(2): 85.
- [8] Zhang W S, et al. *Proc ICCF12*. Singapore: World Sci Pub, 2006: 86; *Proc ICCF13*, Moscow: MATI, 2008: 202; *Thermochim Acta*, 2010, 499:129.
- [9] Letts D G, Cravens D. *Infinite Energy*, 2003, 9(50):10.
- [10] Letts D G, Hagelstein P L. *Infinite Energy*, 2009, 14(84): 32.
- [11] Clarke W B, et al. *Fusion Sci Technol*, 2001, 40:147; 152.
- [12] Mosier-Boss P A, et al. *Naturwiss*, 2009, 96:135.
- [13] Rout R K, et al. *Fusion Technol*, 1991, 19:391.
- [14] Mills R L, Kneizys S P. *Fusion Tech*, 1991, 20:65.
- [15] 张武寿. *前沿科学*, 2008, 2(3):75.

关键词: 凝聚态核科学 冷聚变 超热 核嬗变 □

跟踪·扫描

阿基米德和 太阳能蒸汽大炮

据英国 *New Scientist*, 2010, 207 (2769):10 报道,意大利那不勒斯费德里克二世大学的罗西(C. Rossi)指出,包括彼特拉克和达芬奇在内的一些名人都认为阿基米德发明了采用蒸汽压力从管子里发射高速炮弹的大炮。2006年,麻省理工学院的一个技术小组成功测试了由他们自行设计的蒸汽大炮。

人们一直在传说古希腊发明家阿基米德建造了了不起的战争武器,从弩炮到巨型爪,用于对付公元前3世纪包围西西里岛叙拉古的罗马人。最

有争议的故事之一是阿基米德利用凹凸镜将太阳光聚焦点燃了罗马船只。怀疑者认为不可能使阳光保持聚焦在移动船只上,而且慢慢产生的火很容易被扑灭。

罗西认为蒸汽大炮也许能解释凹凸镜的传说。他已完成一个使用太阳光聚焦镜子来加热炮腔内温度的设计方案。水送入炮腔后汽化,导致气压急速增加射出炮弹。虽然这样使用镜子看起来并不实用,但罗西认为叙拉古人采用此方法非常明智地避免使用明火,因为大炮就被安装在城墙上的木质平台上。罗西说,大炮发射的炮弹可能由黏土制成,并且里面充满了诸如由硫磺、沥青、氧化钙组成的混合燃烧液。他计算出一个直径20厘米、重6千克

左右的炮弹能以60米/秒的速度发射。以此速度,海拔10米处的大炮以 10° 仰角发射的射程将在150米左右。

科技史家认为罗西的设计很有趣,但这样的东西是否建造过则值得怀疑。伦敦帝国理工学院的科莫(S. Cuomo)认为,尚无令人信服的证据表明阿基米德使用过蒸汽大炮。中世纪时阿基米德的盛名使达芬奇等将他们听说的所有印象深刻的发明都归功于阿基米德。她说“阿基米德成为可以制造不可思议武器的科学家的神奇象征”。英国斯旺西大学的里尔(T. Rihll)认为,罗西没有解释为什么空心黏土的炮弹在发射时没有裂开,而投石机是投掷燃烧炮弹更实用的方法。

(乐毅)