

粒子物理和新能源

——漫话 μ 子催化核聚变反应

顾以藩

在能源开发上走过的路

人类在开发和应用能源方面走过了充满历史变革的道路。

我们的祖先在旧石器时代学会用火。我国传说中有燧人氏钻木取火的故事，希腊神话中也有普罗米修斯从太阳偷火送到人间的叙述。这些传说和神话生动反映了人间火的来源又充分表达了人们对于驯火先驱者们的崇敬赞美之情。

掌握了火，人类也就在实际上学会了通过受控化学反应即燃烧过程来获得能量。木头和柴草是最早采用的燃料，一直到十九世纪末期才让煤最终取代。本世纪五十年代以来，石油又逐步成为主要的能源，此外还有天然气。人们把煤、石油和天然气统称为“化石”燃料。

本世纪中期，人类掌握了一种崭新的能源，即通常所说的原子能，更确切的名称应当是核能。当前得到可以控制的核能的实际途径是利用重核裂变现象，在称做原子核反应堆的装置中建立自持链式裂变反应，释放巨大能量，可以用来发电或者提供其它动力。原子核反应堆就象是锅炉，“燃烧”的是会裂变的材料，称做核燃料。目前这一代核电站采用热中子反应堆，以经过浓缩了的铀同位素 U^{235} 作为燃料。人们正在加紧研究发展新一代核电站，考虑采用快中子增殖堆，以在天然铀中占主要成分的 U^{238} 和钍作燃料。铀和钍被称做“岩石”燃料。

核能一旦得到开发，就很快发展起来。1954年第一座核电站建成。三十年来，全世界范围内已有三百

余座核电站投入运行，此外还有不少正在建造和计划建造的核电站。按照这个势头来预测，到2000年时，全世界电力的一半将会来自核能。

但是，核裂变不是获得核能的唯一途径。另一种可能的途径是核聚变。轻的原子核（例如氢的同位素氘和氚或氘和氘）在极高温（几千万度到上亿度）下能够聚合成为较重的原子核（例如氦），同时释放出巨大的能量。进行核聚变反应（有时也称作热核反应）的主要燃料是氘。在自然界中，每3500个水分子大约有一个是由氘组成的。地球上海水的总量超过 10^{18} 立方米，至少含有35万亿吨氘！而1立方米海水中所含的氘倘若完全“燃烧”，能够产生相当于2000桶原油的能量。照此推算，全部海水提供的氘足够全世界使用百百年之久。

许多人把最终解决能源需求问题的希望放在建造实现受控核聚变的反应堆装置上。从五十年代开始，这方面的研究经过了三个年代曲折的历程：从最初的热情探索，经过六十年代的一度怀疑失望，到七十年代间苏联和美国的科学家在称作托卡马克的装置上相继取得进展，从而激发了新的研究热情。目前全世界用于实现受控核聚变的研究费用高达二十亿美元以上，四十多个国家上万名科研人员在几百个实验装置上正进行着艰苦卓绝的奋战，决心攻克这个在技术上空前复杂困难的研究课题。

现在摆在人们面前的具体目标是要证明受控核聚变的实际可行性，首先就要实现“聚变盈亏平衡”，即聚变产生的输出能量等于加热处在等离子体状态的热核燃料的输入能量，用能量增益因子即输出功率与输入

功率比值 Q 来表示, $Q \approx 1$. 针对这个目标, 美国普林斯顿等离子体物理实验室建造了一个托卡马克型核聚变试验反应堆 (英文简称为 TFTR). 这是一座有三层楼高的巨大装置, 耗资三亿多美元, 化了七年时间建成, 于 1982 年 12 月 24 日首次获得了高温等离子体. 按照计划, 温度将逐步提高, 到 1986 年实现 $Q \approx 1$, 达到能量盈亏平衡的点火条件, 并且继续向 $Q \approx 2$ 进军. 根据最近的报导, 欧洲共同体的卡勒姆聚变实验室和日本原子能研究所也分别在类似的实验装置 JET 和 JT60 上取得了重要进展.

受控聚变反应的研究目前正处在一个关键性时刻. 有人估计到 2020 年可以建成核聚变实证堆. 虽然人们对于用海水获取能量的前景充满必胜的信心, 但是在真正用上廉价干净的聚变能之前, 看来还有相当一段路程要走.

那么, 在能源的开发和利用上, 这是否就是最后的一段路程呢?

基础研究和应用的关系

自然科学发展的历史告诉我们: 基础研究中的重大发现或迟或早地会导致实际应用上的突破; 但是对于应用产生了重大作用的基础研究成果却往往并不是在应用需要的直接或间接的推动下得到的. 核物理学和核能开发之间的关系在这方面提供了一个生动的例证.

三十年代间, 当核物理学还是一门纯粹基础科学的时候, 很少有人能够预见到它和应用之间的联系. 英国物理学家卢瑟福有一段经常被人引用的话可以看作是当时一种具有代表性的见解. 他说: “谁要期望原子的转变会成为动力的来源, 那是妄想.” 在这期间核物理研究的一系列重要发现——从 1932 年中子的发现到 1938 年铀原子核裂变现象的发现都是纯粹基础研究的成果; 同样, 氢原子核的聚变反应在那时也是纯属基础研究的对象. 但是, 正是这些研究成果日后对应用产生了空前巨大的推动作用. 重温历史, 可以清楚地看到: 人们如何从对中子和裂变现象的研究一步一步地走向当今核能的开发和利用的; 又如何从核聚变的发现并且借助于多种学科的自身发展逐渐明确开发核能的新途径的. 曾几何时, 核物理从所谓纯科学转变成为与应用密切相关的研究领域.

历史翻开了新的一章. 从核物理衍生发展起来的粒子物理今天处在三十年代以前核物理的相仿地位上, 成为探索微观物理世界的前沿科学. 它属于纯粹基础研究领域; 象卢瑟福当年一样, 人们无法预见这些研究的实用价值. 但是, 基础研究是要化钱和化工夫的, 现代粒子物理实验尤其需要在空前巨大的加速器上以空前规模的物力、人力以及时间来进行. 常常可以听到人们对于支持这种研究的必要性提出疑问和质

难. 我们唯有根据科学发展已有的历史事实去劝说他们放远眼光、建立以下的信念: 总有一天粒子物理会象核物理那样和应用直接联起来; 粒子物理日积月累的发现有可能最终向人们展示一条能源开发和应用的崭新途径. 实际上, 这种应用的可能性的确早已出现了. 这里说的是 1956 年 μ 子催化核聚变现象的发现, 它为新能源的产生投下了希望之光.

1956 年 12 月 29 日的纽约时报以这样的醒目标题从在加利福尼亚州蒙特瑞市举行的美国物理学会年会报导了一则消息:

原子能由新的、更加简单的方法产生

报导一开始写道: “在今天这里的会上描述了产生核反应的第三条和革命性的途径. 它不象裂变反应那样需要用铀, 也不象聚变反应那样需要百万度的高温. …今天描述的这种方式利用一个中等重量的原子粒子 (称作负 μ 介子) 作为催化剂使一个氢核和一个氘核聚合起来. 聚变是在低温下实现的.” 报道说: “这种过程目前不具有商业价值, 虽然它提示了具有不可度量重要性的可能的工业用途. 科学家们说, 它可能指出了一条通向制服氢弹的巨大热量使之成为平时时期目的服务的道路.” 报导还提到这么一点: “饶有趣味的是, 这个发现不是在正致力于为了应用而实现可控热核反应的利弗莫尔实验室里获得的, 却是在悉心从事基础研究的柏克莱实验室里获得的.” 所说的这两个实验室是同在加利福尼亚州旧金山附近的研究机构.

粒子物理实验中的偶然发现

这确实是一项偶然的发现. 美国物理学家阿尔瓦雷茨在接受诺贝尔奖金仪式上所作的讲演中追述了这段有趣的故事. 以他为首的实验小组从五十年代开始最先采用了先进的高能物理实验技术, 包括大液氢泡室、半自动径迹测量装置以及用在计算机上的运动学分析程序, 在称作 Bevatron 的 6.2 GeV 质子同步加速器上通过强子相互作用发现了大量共振态新粒子. 阿尔瓦雷茨以此于 1968 年获得诺贝尔物理学奖. μ 子催

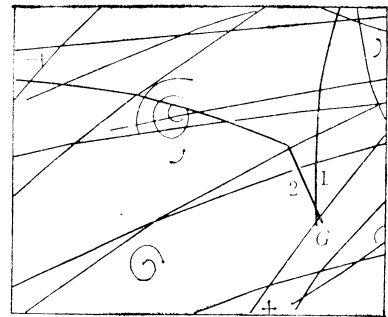


图1 μ 子催化 pd 反应的例子: 在初级粒子 (1) 和次级粒子 (2) 之间存在毫米数量级的间隙 (G)

化核聚变反应就是在这个研究过程中被发现的。

一切偶然性都有自己的原因。看来有两个情况促成了这项发现。一个情况是，从泡室拍摄的底片都是物理实验人员亲自扫描的；在那时还没有专职的看片人员，否则就一定会把异常事例丢掉了。另一个情况是，应用当时的分析技术， K^- 粒子和其它粒子的径迹之间是区别得不好的。 K^- 粒子的许多径迹实际是属于 π^- 和 μ^- 粒子的，另外还有一些带正电的粒子如 p ， π^+ 和 μ^+ 。这样，在分析有奇异粒子参加的事例时，一再发现看起来象是不平常的 $\pi^- \rightarrow \mu^- \rightarrow e^-$ 衰变。在这种衰变中大部分 μ^- 子径迹具有相同长度，而显著长或显著短的径迹则几乎不出现。显然，这同 π^- 介子在停止前衰变的假设是矛盾的。为了追索这种异常现象，根据径迹长度测定出 μ^- 的能量等于 5.4MeV ，对照静止 π^+ 衰变成的 μ^+ 的能量为 4.1MeV ，就愈加怀疑这些 μ^- 不是从 π^- 衰变出来的；但究竟来自什么粒子则不清楚。提出了一种假设：初级粒子可能是一种未知的弱相互作用粒子；它重于 π 介子，因而会衰变成 μ 子和中性粒子（中微子或者光子）。

就在这时，阿尔瓦雷茨他们注意到了这种异常现象的一个有趣的地方（见图 1）：在初级粒子径迹终端和次级粒子径迹起点之间往往有一段毫米量级的间隙。这暗示着一种长寿命负粒子在液氢中迁移，落到某个质子轨道上，最后组成了中性的系统。

在关键时刻局外人帮忙解开了这个谜。一天晚上，这个组的一位成员蒂柯和他的大学同学克劳福在一起吃晚饭。克劳福是个天文学家，虽然两人并非同行，但这并不妨碍他们在席间认真讨论了上面这些实验结果。最后，克劳福提出用某种核催化反应来解释的设想：假定静止的 μ 子和质子及氘结合为 pd 的 μ 分子，在这样的“分子”中质子和氘非常接近而产生聚变反应 $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ ，所释放的能量不以光子的形式而直接内部转换给 μ 子。他们做了计算，得到在一系列类似反应中释放的能量是和实验数据一致的。但是，不好解释的是，在泡室的液氢中氘的含量仅有百分之几，是怎样的机制造成这么多事例出现呢？

第二天，这个组经过讨论一致接受了克劳福的基本设想。于是全体走访了被称为氢弹之父的泰勒，在他家中进行了讨论。泰勒不负众望，当场对全过程作出了令人信服的解释，说明了反应几率所以这么大的原因。停止的 μ 子落到质子的低的玻尔轨道上形成氢的 μ 原子，其性质在许多方面和中子相仿，因而很容易在液氢中迁移。在这过程中，由于约化质量效应， μd 原子基态比 μp 原子基态在能量上约低 135eV ， μ 子就以很大几率从后者跳到氘的轨道上来。这时组成的 μd 原子得到反冲能量，在形成 μpd 分子离子并产生聚变反应之前有可能走出一段距离，导致实验观察到的径迹之间的间隙。

为了进一步验证以上图象，这个组加大了液氢中氘的含量，发现催化反应数目按照预期的增多，甚至观察到同一个 μ 子接连催化两次的事例；采用纯氘泡室也观察到了 μ 子催化的 $d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p$ 反应。

按照阿尔瓦雷茨的回忆，那时“我们经受了短暂的喜悦过程。我们觉得我们一劳永逸地解决了人类面临的能源问题。若干急于作出的估计断定 μ^- 介子在其寿命允许的时间过程中会在液态 HD 中持续产生催化聚变反应，其释放的能量足以保证为了产生补充的 μ 介子以及由海水生产液态 HD 所需要的能量。”这种过分乐观的调子确实没有维持太长时间。不久更加可信的估算表明，原来的估计少了几个数量级。

实际上，早在阿尔瓦雷茨等的实验发现之前，理论家们就已经对 μ 子催化核聚变进行过认真的研究。1947 年，英国固体物理学家弗兰克为了检验那时刚刚发现的 $\pi-\mu$ 衰变过程首次预言了 μ 子催化的可能性。循着弗兰克的思想，苏联物理学家萨哈洛夫于 1948 年，其后又有捷尔陀维奇于 1954 年，作了计算和进一步的研究。但是在柏克莱没有人知道这些工作，而阿尔瓦雷茨的研究组，就象他们自己说的那样，“得以一度体验了首先发现者的骄傲。”

三十年来的进展和前景

μ 子催化核聚变现象在实验上发现之后的一段时间里，人们对它作为一个新的聚变能源的前景展开了热烈的探讨和议论。在液态氘氘混合物中实现 μ 子催

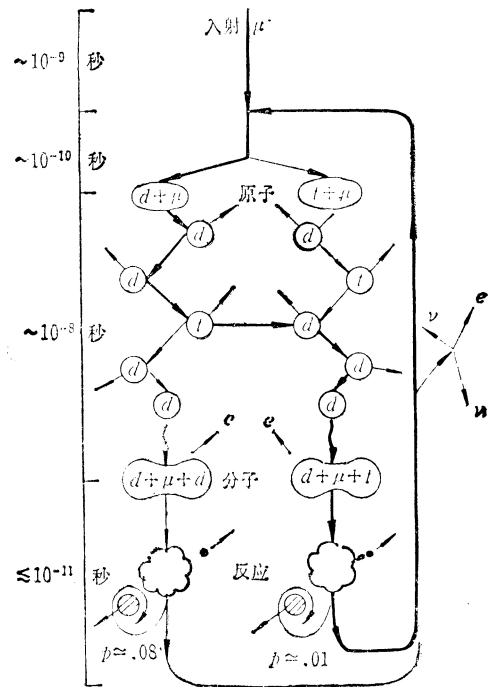


图 2 在液态氘氘混合物中 μ^- 粒子催化循环的简单图解

化循环可以简单地归纳为图 2 的情况。 μ 子先以 10^{-9} 秒的时间慢化，最后分别与氘和氚形成 μ 子氢原子。接着在大约 10^{-8} 秒的持续时间内进行电子交换和分子形成过程，成为 $d\mu d$ 和 $d\mu t$ 分子。催化核反应 $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ 和 $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ 分别在不到 10^{-11} 秒的瞬间发生，放出中子。小部分 μ 子被俘获到带电粒子的束缚轨道上，大部分 μ 子中一部分自然衰变，其余重新参加催化反应。如此循环反复，直至 μ 子全部死亡为止。 μ 子的寿命短，只有 2.2×10^{-6} 秒，这就限制了一个 μ 子催化引起聚变的次数，估计最多只有几次。这样，为了达到可能的应用目的，需要找到一种新的更加稳定的粒子来代替 μ 子实现催化聚变反应。

因此，在此后的大约二十年里，人们的兴趣显然减弱了。有一些理论计算工作，偶而也做些实验。唯独苏联的理论家们保持了较大的热情。他们着手对一个 μ 子和两个氢同位素组成的各种分子离子的能量态进行高度精确的计算。在 1977 年，理论上得出一个有意义的发现，即在某些情况下由于出现共振现象 μ 子分子 $d\mu d$ 和 $d\mu t$ 的形成截面可以变得非常大。计算表明：分子形成率可达 10^8 /秒(归一至液氢密度)，也就是说，比 μ 子衰变率要快一百倍以上。这一点随即在苏联联合原子核研究所从实验上得到了证实。

于是对于 μ 子催化核聚变反应的兴趣在最近七、八年里重新增长起来。这表现在苏联的杜布纳和伽钦纳、美国的洛斯阿拉莫斯、加拿大的温哥华和瑞士的苏黎世的实验组纷纷开始了各自的研究计划并且得到了大量实验结果。人们对于 μ 子催化核聚变反应的应用重新寄以希望。1984 年在美国怀俄明州的杰克逊召开了 μ 子催化聚变讨论会。会上的头号消息是美国爱达荷-洛斯阿拉莫斯小组关于 μ 子催化 dt 聚变反应的实验结果。根据他们的报导，每个 μ 子可以产生 90 ± 10 次聚变。这个数字十分接近于理论上限。这使人们对从实验上进一步突破理论估算值增添了信心。要是每个 μ 子产生多得多的聚变次数，建造一个 μ 子催化聚

变动力装置就真是大有希望哩！

但也有人对前景并不持那么乐观的态度。他们认为：即使每个 μ 子平均在液态氘氚混合物中引起五百或一千次聚变，直接的能量产生可以实现，但是装置的规模仍会受到限制。根据加速器技术的发展可能性，20—50 兆瓦将是上限。

还有人提出利用 μ 子催化聚变反应作为间接的能量源。这是将来自 μ 子催化 $d + t$ 反应的 14 MeV 中子引发快裂变从而增殖裂变物质。但是一些分析显示，这种方案并不能带来多大好处。

虽然应用的前景还不明朗，但就物理本身来讲，这个在大约三十年前从实验上开辟的研究领域至今有着相当广阔的活动天地。值得加以研究的奇特原子过程和分子过程是相当丰富的，而理论并不能解释所有观察到的现象。因此，无论实验上或是理论上都有不少工作可做，而这本身为探索 μ 子催化核聚变反应应用的可能性提供新的机会。

结束语

最近几个年代里，粒子物理取得了令人瞩目的巨大进展。它的许多研究成果直接改变着我们对物质世界的认识。在这些成果中， μ 子催化核聚变现象不过占有很小的而且在物理上并不重要的一席之地；但是就其与应用的可能联系来看，它是现在能找到的极少数例子中间的一个。在已经确认了的数以百计的粒子行列中， μ 子究竟能否继中子而成为走出实验室在实际应用中积极发挥作用的活跃分子，还远远不能作出肯定结论。完全可能在将来发现，能够发挥这种作用的会是另外一种粒子。但是， μ 子催化核聚变现象毕竟在粒子物理和应用的联系上给了人们以启发和鼓舞，使愈来愈多的人树立信念：突破总有一天会要发生。当然，实际突破点完全可能与 μ 子催化核聚变反应毫不相干。