

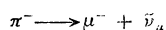
何景棠

一、激动人心的发现——冷核聚变

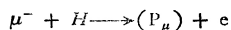
1948年，张文裕先生利用多层薄膜的云雾室研究宇宙线与物质相互作用时发现，一个带负电荷的 μ 子以低速穿过物质时，由于受到物质原子核的正电荷的吸引， μ^- 被核俘获，代替了原来围绕原子核旋转的其中一个电子， μ^- 与原子核组成新的

原子，成为一种新的物质形态—— μ 子原子。后来，许多理论工作者预言， μ^- 可以催化核聚变反应。

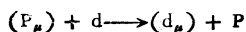
实验上，首次发现 μ^- 催化核聚变的是阿尔瓦雷兹(L. Alvarez)。1957年，阿尔瓦雷兹的研究组在贝克莱实验室利用液氢气泡室研究 κ 介子的相互作用。当时的 κ 介子束流质量很差，因为在 κ 介子束流中含有大量的 μ 子，可是正是这种不希望的“杂质” μ 子，导致了激动人心的发现。实验上当 π^- 介子停止接着产生衰变：



从这个两体衰变反应中放出的 μ 子应具有4.1 MeV的能量。但阿尔瓦雷兹他们观察到大量的所谓“反常” π 衰变，其中放出的 μ 子具有5.4 MeV的能量。用 π 介子在飞行中衰变的假设也难以解释所观察到的事实，因为 π 介子飞行中衰变，则飞出的 μ 子必然具有各种不同的能量。但是，实验上看到的飞出的 μ 子的径迹出奇地相等，即飞出的 μ 子具有相同的能量。正确的解释应该是发生了 μ^- 催化核聚变。我们取后来拍照得到的一个 μ^- 接连催化两次核聚变的液氢气泡室的照片加以说明。图1中，OB是 μ^- 径迹， μ^- 在液氢中慢化至能量为几个电子伏时，形成了 μ^- 的氢原子：



由于液氢中含有氘分子，随后， μ^- 便转移到氘上，形成 μ^- 的氘原子：



当 (d_μ) 原子与氢原子碰撞时，就形成 (Pd_μ) 分子。由于 μ 子比电子重约200倍，所以由 μ^- 束缚的分子，其尺寸较小，尺寸与能量成反比。人们发现， μ 子分子平衡态的平均距离为：

$$R_0 \approx 500 \text{ 费米 (1 费米} = 10^{-13} \text{ 厘米)}$$

$$\text{振动能: } E_{\text{振}} \approx 250 \text{ 电子伏。}$$

这表明，在 μ 分子内部，两个核非常接近且具有较高的相对动能，这情况与白矮星内部情况相似，因此很容易发生核聚变反应：

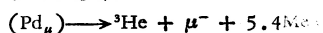


图1中，在BA处发生了第一次核聚变，BC是放出的 μ^- 的径迹，这个 μ^- 在DC处再引起第二次核聚变，DE是从这次核聚变反应后放出的 μ^- ，随后 μ^- 在E点处死亡，衰变成电子。在这里我们看到， μ^- 起了两个作用。

1. 它使两个核非常接近，且具有较高的相对运动速度；
2. 一旦两个核发生聚变之后， μ^- 被重新释放出来，开始引起新一轮核聚变反应。

在这里 μ^- 起着像化学反应中的催化剂一样，所以，这类核聚变叫做 μ 子催化的核聚变。虽然在 μ 分子内部的局部环境中，两个核的相对动能较高，可是在 μ 分子的外部环境中，仍然是低温的液氢状态，由于这种核聚变反应可在低温或常温下进行，因此这种核聚变反应又叫做冷核聚变。这只是表明它不牵涉到约1亿度的高温，不牵涉到等离子体，也与氢弹爆炸无关。

发现 μ 子催化核聚变使阿尔瓦雷兹无比激动，他以为这将解决人类今后全部燃料问题了。

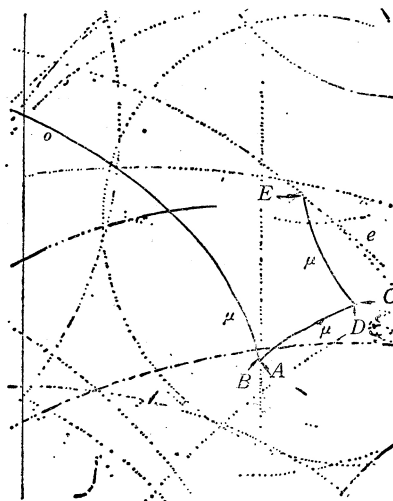


图1 一个 μ^- 接连催化两次核聚变的液氢气泡室照片

二、令人失望的结果

究竟 μ 子催化核聚变能否提供商业上可利用的能

源呢？美国普林斯顿大学的杰克逊于1957年对此问题进行了深入的研究。 μ^- 的寿命只有

$$\tau_{\mu^-} = 2.2 \times 10^{-6} \text{ 秒}.$$

在 μ^- 的一生中能够催化多少次核聚变呢？这主要由两个因素决定的：首先是形成 μ^- 分子所花费的时间，其次是所有聚变反应都形成了氦核， μ^- 有一定的几率被粘附于氦核上，直至 μ^- 衰变成电子，只要 μ^- 被氦核粘附着而丢失，催化反应就停止。

杰克逊计算结果表明：一个 μ^- 一生最多只能催化100次核聚变，获得的能量输出最多只有2 GeV，但是需要约2 GeV的加速器束流输入能量才能产生一个 μ^- 而从电能转变成加速器束流能量的效率约为0.2所以产生一个 μ^- 所需能量约为10 GeV。即能量输入与能量输出的比是10:2，即输入大于输出。如果再考虑从核聚变释放的核能转换到电能的时候还存在一个效率问题，输出会更小。看来不可能利用 μ^- 作为催化剂去催化核聚变而获得可利用的能。

人们也曾研究过利用 μ^- 催化其他轻核，例如



使之产生核聚变的几率。发现，即使形成了轻核的 μ^- 分子，其直径很小，但对于原子序数较大的核，其库仑位垒较高，核穿透库仑位垒而产生聚变的几率很少。

从1957年起到1977年，约20年内，人们每当谈起 μ^- 催化核聚变都会想起杰克逊的计算结果。“ μ^- 一生最多只能催化100次核聚变”这一概念束缚着人们的思想。杰克逊的计算结果向冷核聚变的热心人泼了冷水，客观上使冷核聚变的研究冷淡起来。只有苏联仍有人坚持在实验和理论方面继续 μ^- 催化核聚变的研究。

三、有利可图的方案

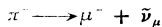
1978年，苏联列宁格勒核物理研究所的彼得洛夫基于 μ^- 一生只能催化100次核聚变，提出把聚变与裂变堆结合组成聚变-裂变混合堆来生产核能。彼得洛夫的方案如图2所示。

加速器将入射束粒子加速至其能量可有效地产生 π^- 介子。

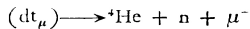
为了增加每次碰撞中， π^- 介子的产额，他建议利用富中子的氘或氚作入射束粒子和靶粒子。入射粒子与靶粒子产生下列反应：



从这里兵分两路： A 路是 π^- 介子在转换器中衰变得到 μ^- ：



彼得洛夫估计约需5 GeV的能量就能产生一个负 μ^- 。 μ^- 在聚变器内催化核聚变：



以铀238包围在聚变器外面。铀238不会产生链

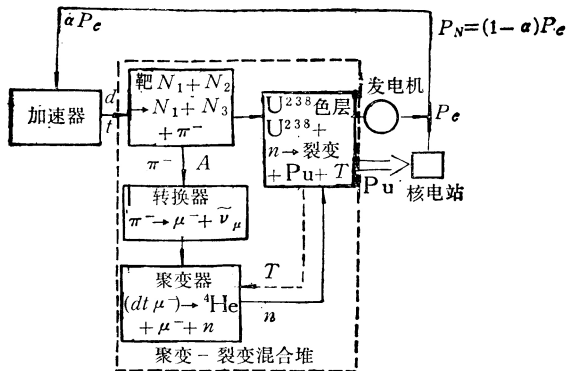


图2 聚变-裂变混合堆方案

式反应，因此，通常被认为是“无用”的燃料。现在利用聚变产生的14 MeV的快中子，可以引起铀238裂变，每个快中子引起一个裂变(裂变能用来发电)，同时产生4个慢中子，铀238吸收一个慢中子变成有用的核燃料钚239。设用一个慢中子去生产钚，以补充钚的消耗，而用剩余的3个慢中子去生产钚239。在反应堆中，消耗一个钚核可产生1.6个裂变，每次裂变能为0.2 GeV，因此一个聚变快中子可引起5个裂变反应，获得约1 GeV的能量。如 μ^- 一生催化100次聚变，则 A 路获得的能量倍数为 $1 \text{ GeV} \times 100 \text{ 次} / 5 \text{ GeV} = 20. = f_A$ 。

再看 B 路。利用没有产生碰撞的核子，直接打击铀238，去生产有用的核燃料钚239，标准的理论和实验给出能量倍增因子 $f_B = 18$ ，但考虑到要用大约20%的能量返回去用于加速器再产生束流粒子，所以 $f_B = (1 - 0.2) \times 18 \approx 15$ 。

总的能量倍增因子 $f = f_A + f_B = 20 + 15 = 35$ 倍。也就是聚变-裂变混合堆获得了正的能量输出。

四、出乎意料的突破

1966年，苏联的德捷列波夫在杜布纳利用工作气体为氘气的扩散云室测量氘的 μ^- 分子($d\mu^-$)的形成时间。扩散云室只能工作在室温。德捷列波夫发现，室温下的 $d\mu^-$ 形成时间比低温下液氘泡室所测得的 $d\mu^-$ 形成时间快10倍。这表明温度会影响 $d\mu^-$ 的形成时间。这是实验上出乎意料的偶然发现。

为了从理论上解释观察到的 $d\mu^-$ 形成时间与温度有关。苏联的威斯曼在其研究生毕业论文中提出共振形成的理论。威斯曼指出， $d\mu^-$ 分子可在 D_2 分子内直接形成，不会引起氘分子的破裂而放出电子。如果 $d\mu^-$ 分子存在振动和转动的激发能级 ΔE ，而 $d\mu^-$ 分子的结合能 E_b 及 $d\mu^-$ 原子的动能 E_k 符合条件：

$$E_b + E_k = \Delta E,$$

则共振形成条件得到满足。 E_k 则是与温度有关的项。

1977年苏联的伽什廷和波诺马列夫从理论上仔

细地研究了威斯曼提出的共振形成理论。出乎意料地发现对于氘氚的 μ 分子 ($d\mu t$) 也存在共振形成的能级。在 540°K 时, $d\mu t$ 的形成时间最小, 它比 $d\mu d$ 的形成时间快两个数量级。即在 540°K 时, 一个 μ^- 可催化的聚变数目达到极大值。这使冷淡了约 20 年的冷核聚变研究又热乎起来了。

1978 年, 苏联的实验物理学家在杜布纳的高能加速器上进行实验,

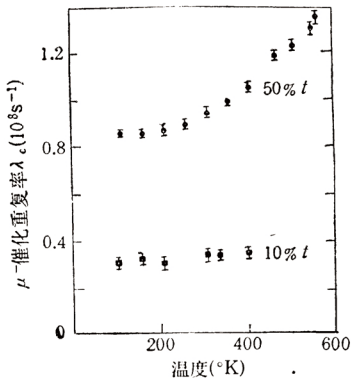


图 3 μ^- 催化重复率与温度关系

进一步的实验研究。

1982 年在美国的洛斯阿拉莫斯介子工厂, LAMPF, 开始进行实验, 以研究在氘氚混合气体中 $d\mu t$ 形成时间与温度的关系。他们利用一个可加热和冷却, 且可承受一千个大气压的容器来装盛氘氚混合气体。他们发现: 1. 在氘氚混合气体中, 氚的含量少于 10% $d\mu t$ 的形成时间与温度无关。这使杜布纳 1978 年的实验结果得到了解释。如图 3 所示。

2. 每个 μ^- 可催化的聚变数目, 即聚变产额, 随温度的升高而增加, 但并不象理论预言那样在 540°K 聚变产额达极大值。实验发现聚变产额直到 800°K 还在增加。如图 3 所示。

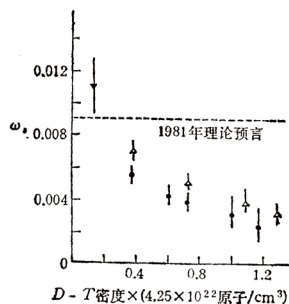


图 4 μ^- 被氦核粘附而丢失的几率 ω_s 与气体密度的关系

不过最近新的理论则预言。在 $\sim 1200^\circ\text{K}$ 聚变产额才会达到最大值。

3. 聚变产额随气体密度增加而增加。

目前实验已发现一个 μ^- 可催化 150 次聚变反应。这也是出乎预料的, 因为 1985 年以前的理论认为, 聚变中产生的氦原子即 α 粒子有 1.2% 的几率俘获 μ^- 子, 但 $\alpha\mu$ 原子在氘氚混合气体中运动时, μ^- 有可能脱离 α 粒子而重新催化核聚变, μ^- 从 α 粒子脱离的几率为 $R = 24\%$, 所以 μ^- 被 α 粒子吸附而丢失的几率是 $\omega_s = \omega_s^0(1 - R) \approx 0.9\%$ 。而

每一个 μ^- 可催化核聚变的最大数目为 110 次。

图 4 表示测量到的 ω_s 值远小于理论的预言值。图 4 还表示 ω_s 与气体密度有关。密度越大, ω_s 越小。目前理论还无法解释为什么 ω_s 与气体密度有关。

理论家利用三体碰撞模型又预言 $\omega_s \approx 0.1\%$ 即一个 μ^- 最多可催化 1000 次核聚变。

五、难以预测的前景

由于聚变反应的燃料氘可直接从海水中提取, 一升海水中所含的氘 (0.03 克) 的能量相当于 300 升的石油, 而提取氘的费用远比分离铀为低, 况且海水是取之不尽, 用之不竭的。地球上约有 10^{21} 公斤的水, 即 10^{17} 公斤的氘。所含聚变能足供人类使用几百亿年, 聚变后的产物不像裂变产物那样具有强烈的放射性, 因此污染问题并不严重, 聚变核电站要比裂变核电站安全可靠, 不存在失控爆炸和放射性废物大量外泄的危险。人类多少年来一直梦想利用聚变能源。

科学家企图通过高温等离子体实现受控热核聚变, 奋斗了几十年, 现在仍未获得正的能量输出。另一方面, 由于实验和理论的进展, 一个 μ^- 一生有可能催化 1000 次聚变。实现了这一点, 则有可能通过冷核聚变的途径利用纯聚变能源。目前苏、美、日、英和瑞士等国正加紧这方面的研究。

热核聚变和冷核聚变, 这两条途径中, 究竟哪一条途径首先获得纯聚变能输出呢? 前景难以预测, 需要投入更多的人力、物力去继续奋斗。