

μ 子催化冷核聚变

何景棠

(中国科学院高能物理研究所)

本文介绍冷核聚变的历史和最新进展,并介绍利用冷核聚变生产商品能源的可能性及需解决的问题。

一、热核聚变和冷核聚变

氢的同位素(氢核即质子 p,氘 d 和氚 t)可以产生下列核聚变反应:

反应	Q 值
(1) $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5.4MeV
(2) $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3.3MeV
$\rightarrow t + p$	4.0MeV
(3) $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17.6MeV

按照量子力学的原理,原子核有一定几率穿透库仑位垒,发生核聚变反应。原子核的大小约为 10^{-13}cm ,而核外有电子围绕核而旋转,原子的大小约为 10^{-8}cm 。由于电子的阻隔,核与核之间的平均距离太大,因此在普通的分子中,难以产生聚变反应。必须让核获得足够的动能才能克服核库仑斥力,穿透库仑位垒而产生上述聚变反应。

氢弹爆炸是激烈的核聚变。首先爆炸一颗原子弹,再利用原子弹爆炸产生的高温、高压,使装在核弹头的氘、氚等聚变材料发生激烈的核聚变,释放巨大的能量。氢弹爆炸是不可控核聚变。对于可控核聚变,通常采用磁约束方案。例如利用托卡马克装置,一方面约束等离子体,一方面加热等离子体,使其温度达到约一亿度;或者采用惯性约束方案,即利用粒子束或激光束轰击氘氚靶丸,使靶丸内部产生高温、高密度等离子体,从而产生上述核聚变反应。由于这些方案牵涉到约一亿度的高温,因此一般称为热核聚变。

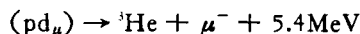
如果一个带负电荷的 μ 子取代了原子中围物理

绕原子核旋转的一个核外电子,就形成了 μ 子原子。由于 μ 子的质量约为电子质量的 200 倍,所以 μ 子原子的尺寸只是普通原子尺寸的 200 分之一。尺寸与相对动能成反比。 μ 分子平衡态的平均距离为

$$R_0 \approx 500\text{fm} \quad (1\text{fm} = 10^{-13}\text{cm}).$$

振动能为 $E_{\text{振动}} \approx 250\text{eV}$ 。

这表明,在 μ 分子内部,两个核非常接近且有较高的相对动能,这情况与白矮星内部情况相似。因此,由 μ 子束缚的氢氘分子,很容易发生核聚变反应。例如,



放出的 μ^- 还可继续引发另一次核聚变反应,直至 μ 子衰变为止。在这里 μ 子起着像化学反应中的催化剂一样,所以这类核聚变反应叫做 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 μ 分子的外部环境,仍然可以是低温的液相状态或者是室温下的气相状态。因此,这种反应又叫做冷核聚变。这只是表明它不牵涉到约一亿度的高温,不牵涉到等离子体,也与氢弹爆炸无关。

dt_μ 聚变过程如图 1 所示: μ^- 与 d 或 t 形成 μ 原子,然后形成 dt_μ 分子,发生聚变反应 $d + t \rightarrow \alpha + n$,这时 μ^- 重新被释放出来,或者 μ^- 被聚变产生的 α 粒子吸附,直至 μ^- 衰变而损失。因为 μ 子的寿命为 $2.2 \times 10^{-6}\text{s}$,因此 μ^- 一生所能催化的聚变数目,决定于两个主要因素:

1. 形成 μ 原子、 μ 分子以及产生聚变的整个过程所需的时间;

2. μ^- 被聚变产物 α 粒子所吸附而损失的

几率 ω 。

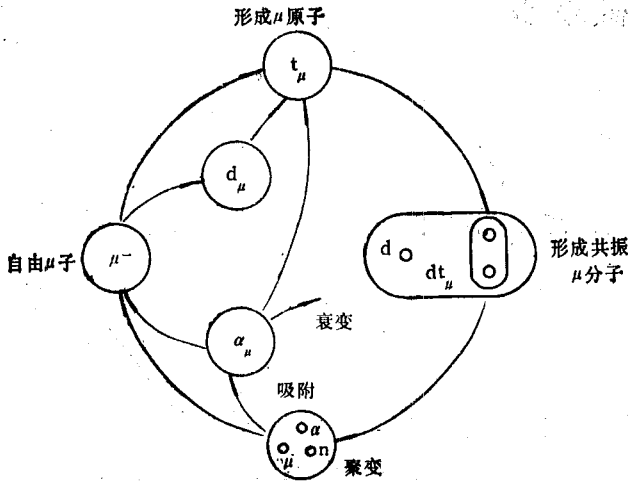


图1 μ 子催化核聚变过程

可用公式表示聚变产额如下:

$$Y = \frac{\phi \lambda_c}{\lambda_n} = \left[\omega + \frac{\lambda_0}{\phi \lambda_c} \right]^{-1},$$

$$\lambda_n = \lambda_0 + \omega \phi \lambda_c,$$

式中 λ_0 是 μ 子的自然衰变率, ω 是 μ 子被 α 粒子吸附而损失的几率, λ_c 是 μ 子催化聚变的循环率, ϕ 是相对于液氢的密度 ($\phi = 1$ 相当于 4.25×10^{22} 原子/cm³).

如果 $\frac{\lambda_0}{\phi \lambda_c} \ll 1$, 则 $Y \approx 1/\omega$.

也就是说, μ^- 被 α 粒子吸附而损失的几率决定了一个 μ^- 所能催化核聚变的最大数目。

聚变反应的燃料氘可直接从海水中提取, 一升海水中所含氘 (0.03g) 的聚变能相当于 300 升石油所能产生的能量, 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} kg 的海水, 即有 10^{17} kg 的氘。因此, 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。目前, 世界各国都投入大量人力、物力去研究核聚变。以前偏重于研究热核聚变, 但是最近十年来, 冷核聚变取得了出乎意料的突破, 引起科技界的极大重视。

二、 μ 子催化冷核聚变发展的历史回顾

阿尔瓦雷兹 (L Alvarez) 于 1957 年第一次在液氢泡室实验中观察到 μ^- 引发的核聚变反应^[1]。我们取后来拍照得到的一个 μ 子接连催化两次核聚变的液氢泡室的照片加以说明。如图 2 所示: OA 是入射的 μ 子径迹, 在 BA 处发生了第一次核聚变, BC 是放出的 μ 子径迹, 这个 μ 子在 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 子, 随后 μ 子在 E 点处死亡, 衰变成电子。

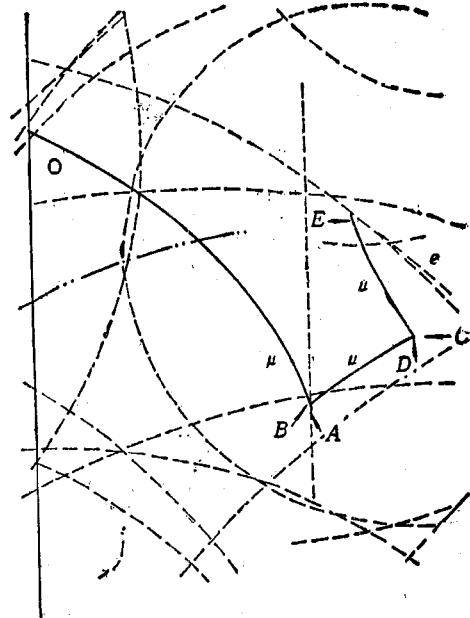


图2 一个 μ 子接连催化两次核聚变的液氢泡室照片

1968 年阿尔瓦雷兹因在基本粒子物理研究方面的贡献而获得诺贝尔奖金物理学奖。他在受奖时所作的演说中, 回顾了当时发现 μ 子催化核聚变后的激动心情, 他说: “当我们想到我们已经解决了人类今后的全部燃料问题时, 我们十分兴奋。一些匆促计算表明, 在液态氘中, 一个负 μ 子在它衰变以前催化足够多的聚变反应, 供给的能量足以开动加速器, 产生更多的 μ 子, 足以从海水中提取氢和氘, 而且能量

还有剩余。正当其他人力图通过把氢等离子体加热到数百万度来解决核聚变时，我们代之以非常低的温度，偶然地找到了另外的解决办法”。

道路总是曲折的。1957年，杰克孙(J. D. Jackson)计算了 μ^- 一生能催化的如前面所述的核聚变反应数目^[2]，如表1所示。一个 μ^- 一生催化核聚变获得的能量输出最多只有 ~ 2 GeV，但需要约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 $\eta_a \approx 0.2$ ，所以产生一个 μ^- 所需能量为 $2\text{GeV}/\eta_a \approx 10\text{GeV}$ 。也就是说，能量输入与能量输出的比是10:2，输入大于输出。这以后，研究 μ^- 催化核聚变的实验也没有什么新结果，因此“ μ^- 子一生最多只能催化100次核聚变”似乎成了不可超越的极限。冷核聚变的研究到此就冷淡下来了。

表1 μ^- 一生催化的核聚变数及能量输出

	核聚变数 Y	每次聚变的Q值 X(MeV)	μ^- 催化聚变能输出 $E = X \cdot Y$ (MeV)
反应(1)	10^{-4}	5.5	5.5×10^{-4}
反应(2)	10	4.0	40
反应(3)	100	17.6	1760

1966年，苏联的德捷列波夫(Dzheleпов)在杜布纳利用工作气体为氘气的扩散云室测量了氘的 μ 分子($d_\mu d$)的形成时间^[3]，扩散云室只能工作在室温。德捷列波夫发现，室温下的 $d_\mu d$ 形成时间比低温下液氘泡室所测得的 $d_\mu d$ 形成时间快十倍。这表明， $d_\mu d$ 的形成时间与温度有关。1967年，苏联的威斯曼(Vesman)提出共振形成理论以解释 $d_\mu d$ 的形成时间与温度有关。如果 d_μ 的动能为 E_k ， $d_\mu d$ 分子的结合能为 E_b ，而 $d_\mu d$ 分子存在振动和转动的激发能 ΔE ，则共振形成的条件是

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

其中 E_k 是与温度有关的。

1977年，苏联的伽什廷(Gershtein)和波诺马列夫(Ponomarev)从理论上仔细研究了

物理

威斯曼提出的共振形成理论^[4]。他们发现，对于氘氘的 μ 分子($d_\mu t$)也存在共振形成的能级，且 $d_\mu t$ 的形成时间比 $d_\mu d$ 的形成时间快两个数量级，即一个 μ^- 可催化的核聚变数可超过100次，且预言在 $T = 540\text{K}$ 时，形成时间最小。

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，以验证上述理论预言的正确性^[5]。他们将氘的含量少于8%的氘氘混合气体冷却到93K和加热到613K，他们得到的结果是：

1. $d_\mu t$ 的形成时间比上述理论预言的要快一个数量级以上；

2. 没有看到 $d_\mu t$ 的形成时间与温度有关。

理论与实验有矛盾，原因何在呢？

三、 μ 子催化冷核聚变实验的新进展

1982年，在美国的洛斯阿拉莫斯离子工厂LAMPF，开始研究在氘氘混合气体中 $d_\mu t$ 形成时间与温度的关系^[6]，他们获得的实验结果如图3所示。

1. 在氘氘混合气体中，氘的含量少于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。

2. 每个 μ^- 可催化的聚变数目(即聚变产

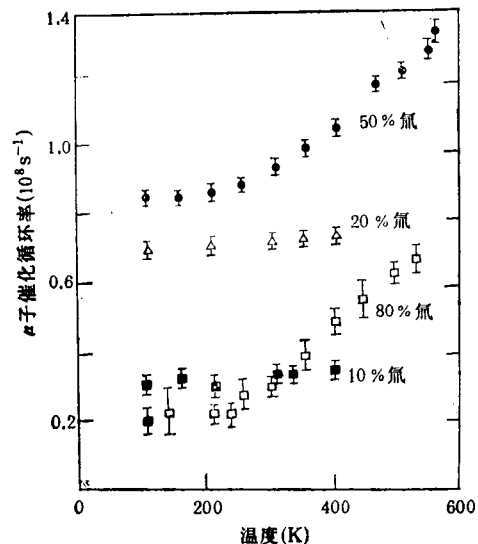


图3 μ 子催化循环率 λ_c 与温度的关系

额)随温度的升高而增加,但是并不象理论预言那样,在 540K 时聚变产额达到最大值,实验发现,直到 800K,聚变产额还在增加.不过,后来理论又预言, $T \approx 1200\text{K}$ 时,聚变产额可达最大值.

3. 发现了 $d_{\mu}t$ 形成时间与密度有关,聚变产额随气体密度增加而增加(如图 4 所示).

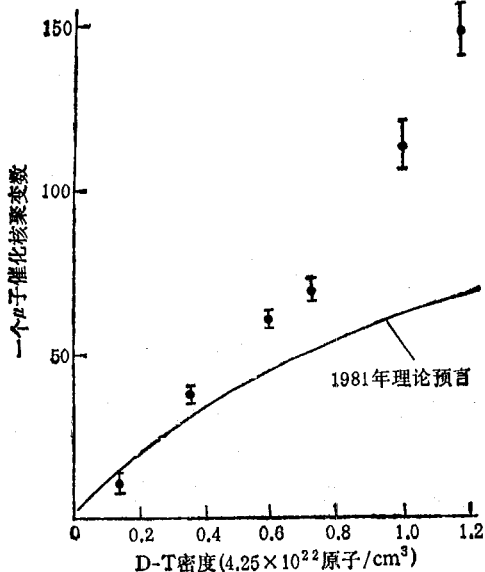


图 4 一个 μ 子可催化聚变数与密度的关系

瑞士、日本和苏联也开展了 μ 子催化核聚变的系统性研究,结果都支持洛斯阿拉莫斯的发现.目前实验上已达到一个 μ^- 可以催化约 150 次聚变.

关于 α 粒子吸附 μ 子的几率 ω_s , 1985 年以前的理论认为, $\omega_s^0 = 1.2\%$. 但是,被吸附的 μ^- 有一定的几率脱离 α 粒子而重新催化核聚变. μ^- 脱离 α 粒子的几率理论计算为 $R = 24\%$. 所以, μ 子被 α 粒子吸附而丢失的几率是

$$\omega_s = \omega_s^0(1 - R) \approx 0.9\%$$

而一个 μ^- 可催化的核聚变数目为

$$Y = 1/\omega_s = 1/(0.9\%) \approx 110 \text{ 次.}$$

图 5 表示实验测量到的 ω_s 值远小于以前理论的预言值. 目前理论给出 $\omega_s^0 \approx 0.8\%$, 所以 $\omega_s \approx 0.6\%$, 但仍高于实验观察到的 ω_s 值. 此外,还可以看到 ω_s 与密度有关,密度越大, ω_s 越小. 目前,理论还无法解释 ω_s 与密度的关系.

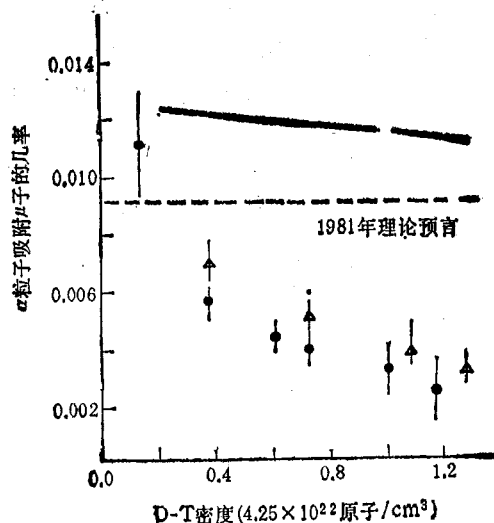


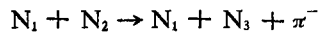
图 5 μ 子被 α 核吸附而丢失的几率 ω_s 与气体密度的关系

四、利用冷核聚变生产商品能源

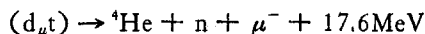
μ^- 催化核聚变实验的最新成果,使冷淡了 20 多年的课题“利用冷核聚变生产商品能源”,又旧话重提了. 理论计算表明,如果要利用纯粹聚变反应去生产商品能源,那么就要求 $Y \approx 1000$ 次,即一个 μ 子要催化 1000 次聚变. 目前,只达到 $Y \approx 150$ 次. 人们提出一些折中方案来利用冷核聚变生产商品能源.

1978 年,苏联列宁格勒核物理研究所的彼得洛夫 (Yu. Petrov) 基于一个 μ 子只能催化 100 次核聚变,提出用聚变-裂变混合堆来生产核能^[7],如图 6 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:



从这里反应分两路进行. 在 A 路, π^- 介子在转换器中衰变,产生 μ^- , $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$. 彼得洛夫估计约需 5GeV 的能量产生一个 μ 子. μ^- 在聚变器内催化核聚变:



用铀 238 包围在聚变器外面. 铀 238 不会产生链式反应,通常被认为是“无用”的燃料. 现

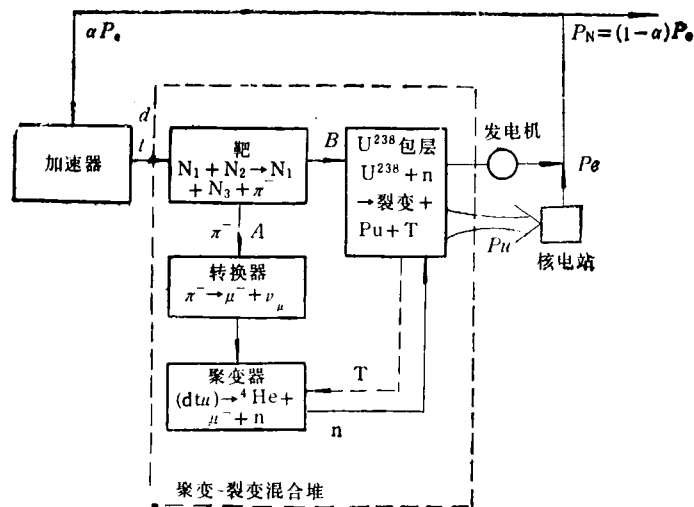


图6 聚变-裂变混合堆方案

在利用聚变产生的 14MeV 的快中子,可以引起铀 238 裂变,每个快中子引起一个裂变,裂变能可用来发电,同时产生四个慢中子,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,而用剩余的三个慢中子去生产钚 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 0.2GeV,因此一个聚变快中子可引起五个裂变反应,获得约 1GeV 的能量。如果一个 μ^- 催化 100 次聚变,则 A 路获得能量倍增为

$$1\text{GeV} \times 100/5\text{GeV} = 20 = f_A.$$

再看 B 路,利用没有发生碰撞的核子,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 $f_B = 18$ 。考虑到要用大约 20% 的能量返回去用于加速器再生产束流粒子,所以 $f_B = (1 - 0.2) \times 18 \approx 15$ 。

总的能量倍增因子为 $f = f_A + f_B = 20 + 15 = 35$ 。

假设核电站输出的热功率为 P ,转换成电能效率为 $\eta_e = 0.35$,输出的电功率为 P_e ,其中要有 α 份额的电能返回用于运转加速器生产束流粒子,设 $\alpha \approx 0.1$,整个系统的总效率为 η_s ,纯功率输出为 P_N ,

$$P_N = (1 - \alpha)P_e = (1 - \alpha)P \times \eta_e,$$

$$\eta_s = P_N/P = (1 - \alpha)\eta_e.$$

$$= 0.9 \times 0.35 \approx 0.3.$$

纯的能量倍增为 $f \cdot \eta_s \approx 10$ 倍。

人们认为彼得洛夫的方案太理想化,因为还存在其他的能量消耗因子,例如还应考虑附加的功率消耗份额,用于运转泵,制冷器和裂变燃料的处理系统等。再细致的考虑给出的结果如图 7(a), (b) 所示。图中 Q 为聚变功率倍增因子; f_{aux} 为附加功率损耗份额; η_{th} 为热功率转换为电功率的系数; η_A 为加速器的效率; M_A' 为聚变、裂变功率倍增系数,与上述的 f_A 相似; M_N' 为电核倍增系数,与上述的 f_B 相似; Q_E 为整个系统的纯功率倍增因子,亦称为工程 Q 值。

在图 7(a) 中,所考虑的参数与彼得洛夫的基本相同,

$$Q = \frac{E_F}{E_\pi} Y,$$

E_F 为每次聚变释放的能量, $E_F = 17.6\text{MeV}/\text{聚变}$; E_π 为产生一个 π^- 所消耗的能量,彼得洛夫估计 $E_\pi = 5\text{GeV}/\pi^-$; Y 为一个 μ^- 催化的聚变数目,彼得洛夫设 $Y = 100 \text{次}/\mu^-$ 。因此,

$$Q = \frac{17.6\text{MeV} \times 100}{5\text{GeV}} \approx 0.35.$$

如果 Y 增加或产生一个 π^- 所消耗的能量 E_π 减少,则 Q 增加。目前,实验给出 $Y \approx 150$,而产生一个 π^- 所消耗的能量有可能达到 $E_\pi \approx 2 \sim 3\text{GeV}$,因此可达到 $Q \approx 1$ 。图 7(b) 中,设

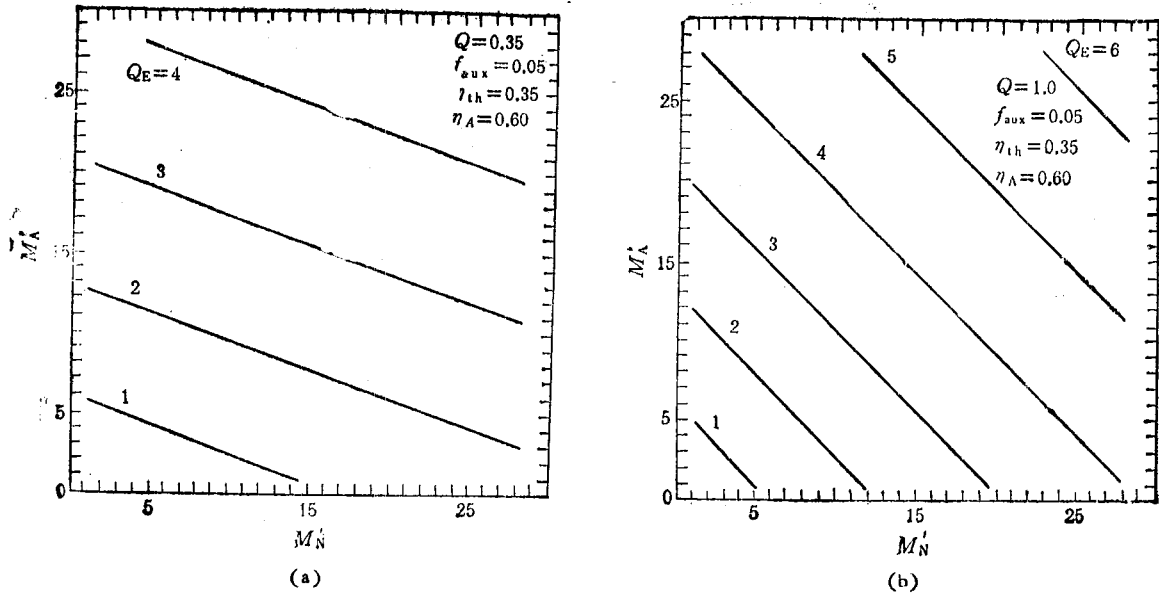


图 7

$Q = 1$. 在图 7(a) 中, 我们看到, 对 $Q = 0.35$, 若 $M_{A'} = 23 \sim 26$, 则在大范围的 $M_{N'}$, 可获得 $Q_E = 4$. 在图 7(b) 中, 对 $Q = 1.0$, 若 $M_{A'} = 25$, 则只要 $M_{N'} = 15$, 就可获得 $Q_E \geq 5$ 的结果.

在现有技术基础上, 利用 μ 子催化冷核聚变生产商品能源, 似乎是可行的.

五、有待解决的问题

为了利用冷核聚变生产商品能源, 还存在一系列尚待解决的问题.

首先是物理问题. 应该确定一个 μ 子能催化聚变的最大数目是多少? μ 子的循环催化率与密度及温度的依赖关系的最佳条件是什么? 能否降低 α 粒子吸附 μ 子的几率 ω_a , 定出它与

密度和温度的依赖关系. 要解决这些问题, 都要进行大量的基础研究.

其次是工程技术问题. 例如, 设计出效率更高的加速器, 以便降低生产一个 π^- (或 μ^-) 所需的能量, 在 $\pi^- - \mu^-$ 输运过程中, 尽量减少 π^- 或 μ^- 的损失. 此外, 还有在整个聚变、裂变系统中, 各个环节的工程技术问题.

图 8 是一个概念性设计^[8], 以便更有效地产生 π^- 和 μ^- . 加速器加速 d 或 t, 打击用 d 或 t 作成的靶子, 将产生的 π^- 送到 π^- 衰变室, 使发生 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ 衰变, 产生的 μ^- 被慢化和聚焦, 送到聚变室产生 μ 子催化核聚变. 原始碰撞中产生的 π^+ 和质子等被用来增殖能量; 原始碰撞中产生的中性粒子 π^0, n 和 γ 也被用来增殖能量; 没有碰撞的原始束 d 和 t 粒子, 被送

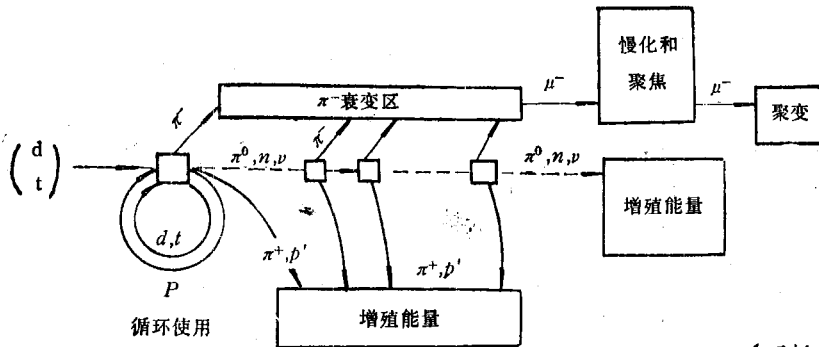


图 8 μ 子催化核聚变改进的概念性设计

(下转第 508 页)