

轻子动力:是幻想,还是未来的事实?

R. P. Olenick

一、引言

人们早就知道,利用氢同位素在高温下的热核反应可获得极大的能量。1957年,阿尔瓦雷斯等人(1957年)发现了另一种产生聚变的方法^[1],这就是用 μ 子在液氢中引起的冷聚变或催化聚变的现象。其实,这种现象早由夫兰克(1947年)^[2]和 Zel'dovich (1954年)^[3]在理论上作过预言。但是继最初的一些实验之后不久,就发现 μ 子催化聚合反应在技术上无法作为实际能源投入使用(杰克逊 1957年)^[4]。

尽管 μ 子的寿命太短,限制了它成为行之有效的聚变催化剂,但粒子物理学的最新发展,展示出催化聚变可能最终会在实际上成为可能的前景。这方面的进展之一,是发现了迷人的夸克, Zweig (1978年)^[5]由此假定奇异状态的重夸克,能够可靠地催化轻核发生聚合反应。另一进展,就是 τ 轻子的发现,这意味着这种重轻子可能是很合适的催化剂。但是,尽管 τ 轻子比 μ 介子要重九倍,可惜它比 μ 子更不稳定,其衰变时间仅为 10^{-12} s。不过,似乎可能存在着其它一些更重的带电轻子,只是现有粒子加速器的能量小于这些粒子的产生阈,故至今尚未发现[例如,约克(1980年)^[6]从宇宙射线中鉴别出一种带电粒子,其质量 $m \approx \frac{9}{2} m_p$,寿命 $\tau \gg 10^{-8}$ s]。天文物理学家认为,可能存在一种新的中微子,这也就暗示存在着一种新的重轻子,它比 τ 子更重(施拉姆 1978年)^[7]。

一旦这种轻子被找到,它的稳定程度如何呢?对于 μ 子和 τ 子来说,之所以不稳定,是因为每个 μ 子或 τ 子总是与中微子联系在一起,通过弱相互作用而衰变产生中微子。当然

中微子本身不能发生这种变化,它是稳定的。任何质量为 m_L 的带电轻子的寿命可按下式预计:

$$\tau_L = 2 \times 10^{-6} (m_\mu/m_L)^5 \text{s}. \quad (1)$$

因此,所产生的轻子越重,它就会比 μ 子或 τ 子衰变得越快。但是,如果这种新的带电轻子比与其相联系的中性伴生物(即重中微子)轻,那么后者就会衰变,而这种带电轻子却可以是稳定的。

与热核聚变不同,重轻子催化聚变不需要极高的温度,以克服核与核间的静电斥力。重轻子催化聚变的方法是利用大质量的轻子以及量子力学中的隧道效应。质量为 M 的重轻子 L 射入含有中性轻核原子的反应室内,速度就会减慢。于是,由于静电力的作用,吸引一个质量为 m 的轻核 N ,形成束缚态,用符号 $L-N$ 标记。因为轻子的质量大($M > m$),所以轻核 N 绕轻子 L 旋转,其玻尔轨道半径为

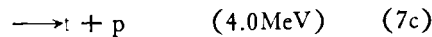
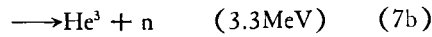
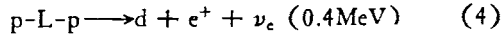
$$a_0 = \hbar^2 / \mu K e^2, \quad (2)$$

其数量级为 10^{-14} m,式中 μ 是 $L-N$ 系统的约化质量,即

$$\mu = Mm / (M + m), \quad (3)$$

$K = 1/4\pi\epsilon_0$,是静电力恒量。 $L-N$ 系统是一个坚实的中性结构,它可以进一步靠近其他轻核,将其吸引过来,而形成 $N-L-N$ 系统,即轻子复合束缚态(leptomolecule)。这种轻子复合结构很象一个 H^- 离子:一个重轻子被两个轻核所环绕。但是,在这种轻子复合结构中,两个轻核相距很近,其数量级一般为 10^{-14} m。因此,这两个轻核穿越它们之间的库仑势垒的可能性就大大增加,于是在强力作用下就会发生放能的聚合反应。这个轻子不受强相互作用力的影响,它作为真正的催化剂不参与聚变,并无限制地继续充当催化剂,引发更多的聚合反应。

已知各种氢的同位素间可能会发生的放能聚合反应如下:



上述各反应所释放的能量是根据质量差算出的,聚变前轻子复合系统的结合能未计算在内。(4)式表示的反应是一个弱过程,其反应率仅有 $10^{-6}/a$, 因此这一反应作为实际能源是不可行的。考虑到海水中氘很丰富,我们自然就很注重(7)式表示的那几个反应。我们分析一下 d-L-d 系统的能量,及其中两个氘核的间距、减速时间、聚变率和重轻子的催化效率。

二、N-L-N 系统的能量

在本节中,我们要确定轻子复合系统 N-L-N 的基态能量以及两个轻核间的距离。因为形成这样的三体结构对于聚变过程至关重要,所以应当首先考察一下它的稳定性。判定该系统稳定性的物理条件是,三体结构的总能量应比二体结构 N-L 的基态能量小。

与氢原子相仿,N-L 系统的基态能量为

$$E_{LN} = -\mu K^2 e^4 / 2\hbar^2. \quad (10)$$

但是,轻子复合系统 N-L-N 的能量却不能表示成如此简单的形式,而应当从量子力学上考虑。如图 1 所示,这个三体系统的哈密顿函数为

$$H = \frac{-\hbar^2}{2} \left[\frac{1}{M} \nabla_{\mathbf{R}}^2 + \frac{1}{M} (\nabla_{\mathbf{R}_1}^2 + \nabla_{\mathbf{R}_2}^2) \right] + V(R, R_1, R_2), \quad (11)$$

式中 \mathbf{R} 是轻子的位置矢量, \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 是两个轻核的位置矢量。该系统势能 $V(R, R_1, R_2)$ 的形式为

$$V(R, R_1, R_2) = -Ke^2 \left(\frac{1}{|\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}|} \right.$$

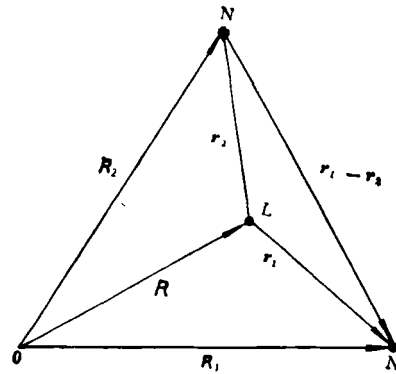


图 1 三体系统 N-L-N 的相对坐标

$$+ \frac{1}{|\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}|} - \frac{1}{|\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2|}). \quad (12)$$

若引入下列质心坐标和相对坐标

$$\rho = (M + 2m)^{-1}(M\mathbf{R} + m\mathbf{R}_1 + m\mathbf{R}_2), \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{R}_i - \mathbf{R}, \quad (i = 1, 2),$$

则上述哈密顿函数可改写为

$$H = \frac{-\hbar^2}{2(M + 2m)} \nabla_{\rho}^2 - \frac{\hbar^2}{2\mu} (\nabla_1^2 + \nabla_2^2) - \frac{\hbar^2}{M} \nabla_1 \cdot \nabla_2 + V[r_1, r_2, |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|]. \quad (14)$$

将质心运动分离出来,那么相对运动的薛定谔方程就是

$$(-\hbar^2/2\mu)(\nabla_1^2\psi + \nabla_2^2\psi) - (\hbar^2/M)\nabla_1 \cdot \nabla_2\psi + V\psi = E\psi, \quad (15)$$

式中波函数 ψ 一般是 r_1, r_2 和 $|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$ 的函数。

在上述 N-L-N 系统中, $\mu \lesssim M$, 所以(15)式中的第二项有其特殊的意义。假定把它作为微扰来处理,暂时略去这一项不考虑,剩余的方程已由 Hylleraas 和 Midtal (1956 年)^[8] 就 H^- 离子的情况,使用变分法解出。根据解出的结果,N-L 系统的基态能可表示为

$$E = -1.0555(K^2 e^4 \mu / 2\hbar^2). \quad (16)$$

为了估计(15)式中第二项的数值,我们把它看成是一个微扰,这需要计算下式:

$$s = \frac{-\hbar^2}{M} \int \psi \nabla_1 \cdot \nabla_2 \psi dV. \quad (17)$$

应用格林定理,并取无限远处的面积分为零,得

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2}{M} \int \nabla_1 \phi \cdot \nabla_2 \phi dV. \quad (18)$$

这一微扰表示由于轻子的运动,使这个三体系统解体的离解能.为说明这一点,设波函数为两个平面波的简单乘积:

$$\phi = \exp(i\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r}_1) \exp(i\mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r}_2). \quad (19)$$

在这种情况下,有

$$\nabla_1 \phi \cdot \nabla_2 \phi = -\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{K}_2 \exp[i(\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r}_2)]. \quad (20)$$

因为当 \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 平行或者反平行时,(11)式具有最大值,所以(15)式中第二项就表示两个轻核的动量之间的相互关系.如果轻子复合系统中两个轻核有同向聚拢的趋势,那么处于平衡运动状态的轻子,其活动范围就会比两个轻核反向聚拢时更大.因此,上述这一项表示两个轻核的相对运动能使轻子复合三体系统“崩溃”的程度如何.

为了便于计算(18)式表示的离解能,我们引入 Hylleraas 坐标 s, t, u , 这种坐标的定义如下^[9]:

$$s = r_1 + r_2, \quad (21a)$$

$$t = r_1 - r_2, \quad (21b)$$

$$u = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|. \quad (21c)$$

这样,体积元就简化为

$$dV = 2\pi^2 u (s^2 - t^2) ds du dt. \quad (22)$$

波函数化为

$$\phi(s, t, u) = e^{-\frac{1}{2}Ks} (1 + C_1 Ku + C_2 K^2 t^2), \quad (23)$$

式中 K, C_1, C_2 是变分参数.用变分法计算离解能 ε , (18)式变为

$$\begin{aligned} \varepsilon = \frac{\hbar^2}{M\eta} 2\pi^2 \int_0^\infty ds \int_0^s du \int_0^u dt \left\{ \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial s} \right)^2 - \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)^2 \right] (s^2 + t^2 - 2u^2)u \right. \\ \left. - \left(\frac{\partial \phi}{\partial u} \right)^2 (s^2 - t^2)u \right. \\ \left. - 2 \frac{\partial \phi}{\partial s} \frac{\partial \phi}{\partial u} (u^2 - t^2)s \right. \\ \left. - 2 \frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial u} (s^2 - u^2)t \right\}, \quad (24) \end{aligned}$$

其中 η 是归一化常数.将(23)式的波函数代入

可得

$$\begin{aligned} \varepsilon = \frac{\hbar^2 K^2}{M} (10C_1 + 16C_1^2 - 24C_1C_2) \\ / (32 + 280C_1 + 384C_2 + 2464C_1C_2 \\ + 768C_1^2 + 4608C_2^2). \quad (25) \end{aligned}$$

贝蒂(1929年)^[10]曾用该式对H原子的情况做过计算,他取 $K=1.535/a_0, C_1=0.20, C_2=0.05$.

轻子复合系统的总能量为

$$E_t = E + \varepsilon, \quad (26)$$

稳定性的判据即为

$$E_t < E_{LN}, \quad (27)$$

其中 E_{LN} 是二体系统的基态总能量.根据以上分析,我们就能确定哪个系统稳定,以及结合能的大小.另外,两个轻核间的平均距离可由下式算出:

$$\begin{aligned} \langle u \rangle &= \int \phi^* u \phi dV \\ &= 2\pi^2 \int \phi^2 u^2 (s^2 - t^2) ds du dt. \quad (28) \end{aligned}$$

将(23)式的波函数代入,得

$$\begin{aligned} \langle u \rangle &= \frac{1}{K} (140 + 768C_1 + 1232C_2) \\ &/ (32 + 280C_1 + 384C_2 + 2464C_1C_2 \\ &+ 768C_1^2 + 4608C_2^2). \quad (29) \end{aligned}$$

对 τ^- 轻子(质量 = $1784 \text{ MeV}/c^2$) 和质量为 $4690 \text{ MeV}/c^2$ 的假想重轻子,应用前述几个公式进行计算的结果见表1.二体和三体系统中的两个轻核分别是氘核和氚核.这些计算结果表明,轻子复合系统的组态应当是稳定的,两个轻核间平均距离的大小容许它们穿越相互间库仑斥力的势垒,实现聚变.

三、N-L-N 的形成时间

前节我们确定了稳定的轻子复合系统应该具有的结合能和二轻核的平均间距.接着就会提出:当催化剂轻子射入含有轻核原子的反应室后,形成束缚态 N-L-N 要多长时间呢?对这一问题的解答,关系到提取这种催化聚变所产生的有用能量的问题.另外,任何可能充当催化剂的不稳定轻子的寿命,必须远大于 N-L-N

表1 对 τ^- 轻子 ($M_\tau = 1784\text{MeV}/c^2$) 及某种重轻子 L ($M_L = 4690\text{MeV}/c^2$) 的三体轻子复合系统进行计算的结果

物理量	系统	d- τ -d	τ - τ - τ	d-L-d	τ -L- τ
约化质量 $\mu(\text{MeV}c^{-2})$		914.4	1091.1	1340.1	1756.9
玻尔半径 $a_0(\text{termi})$		29.56	24.78	20.17	15.38
未微扰能量 $E(\text{keV})$		-25.71	-30.68	-37.68	-49.40
尺度参数 $k(\text{fm}^{-1})$		51.92	61.96	76.09	99.77
离解能 $e(\text{keV})$		0.81	1.15	0.66	1.14
N-L-N 能量 $E_{\text{N-L-N}}(\text{keV})$		-24.90	-29.53	-37.02	-48.26
N-L 能量 $E_{\text{N-L}}(\text{keV})$		-24.36	-29.07	-35.70	-46.80
结合能 $E_B(\text{keV})$		0.54	0.46	1.32	1.46
平均间距 $\langle u \rangle(\text{fm})$		39.3	32.9	26.8	20.45

系统的形成时间,以便能够产生大量的聚合反应。

假定轻子射入反应室时带有大约 50—100 MeV 的动能,在它能够俘获轻核形成束缚态前,必定在媒质中减速。当速度 $v \gg \alpha c$ 时 (α 是精细结构常数),其初始能量因与轻原子的电子相碰撞而损失。由于电离作用而引起的总能量损失率可由贝蒂-布洛赫公式求得:

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{2\pi NZ(Ke^2)^2}{m_e v} \ln \frac{2m_e v^2}{I}, \quad (30)$$

式中 Z 是原子序数, N 是原子数浓度, I 是减速剂原子的有效电离势, m_e 是电子质量。速度从初值 v_i 减小到终值 v_f 所用时间为

$$t = - \int_{v_i}^{v_f} \frac{dE}{dE/dt}. \quad (31)$$

设轻子质量为 M , 将经典动能公式和(30)式代入上式,即得

$$t = \frac{m_e M}{4\pi NZ(Ke^2)^2} \int_{v_i}^{v_f} \frac{v^2 dv}{\ln(2m_e v^2/I)}, \quad (32)$$

取积分,得

$$t = \frac{m_e M c^3}{8\pi NZ(Ke^2)^2} \left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^3 \left[E_i\left(3 \ln \frac{v_i}{\bar{v}}\right) - E_i\left(3 \ln \frac{v_f}{\bar{v}}\right) \right], \quad (33)$$

其中 E_i 表示指数积分,

$$E_i(ay) = \ln y + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ay)^n}{nn!}. \quad (34)$$

另外,

$$\bar{v}/c \equiv (I/2m_e c^2)^{1/2}. \quad (35)$$

当速度的数量级降为 αc 时,(30)式不再适用。在这种情况下,流失到电子上的能量很少,而必须考虑因核间的库仑力碰撞引起的能量损失。外脱曼(1950年)确定出轻子在氢原子中的能量损失率为^[11]

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{2\pi NZ^2(Ke^2)^2}{M_N v} \ln \frac{12\mu^2 v^2}{M_N m_e c^2}, \quad (36)$$

式中 M_N 代表轻核质量, μ 是该系统的约化质量。由此式可得减速时间为

$$t = \frac{m M c^3}{4\pi NZ^2(Ke^2)^2} \left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^3 \left[E_i\left(3 \ln \frac{v_i}{\bar{v}}\right) - E_i\left(3 \ln \frac{v_f}{\bar{v}}\right) \right], \quad (37)$$

其中

$$\bar{v}/c \equiv (M_N m_e / 12\mu^2)^{1/2}. \quad (38)$$

我们以液氢作为减速剂,设重轻子的质量是质子质量的二倍,液氢的原子数密度取为 $N_{\text{LiH}} = 4.3 \times 10^{28}/\text{m}^3$ (氢气的原子数密度比此值

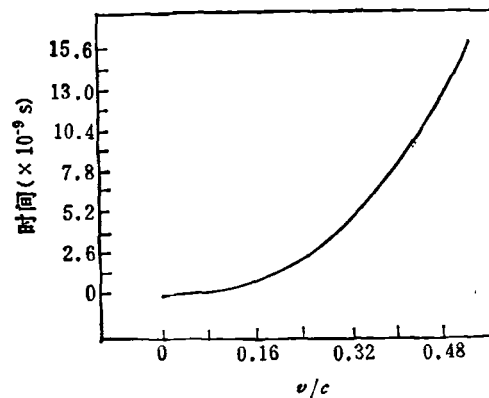
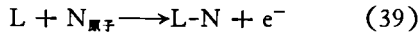


图2 重轻子 ($M_L = 2m_p$) 在液氢中的减速时间

要小三个数量级),利用上述公式进行计算的结果,大致如图2所示。

尽管当轻子仍以速度 $v = \alpha c$ 或更大的速度运动时,就俘获轻核,但大多数是在 $v \ll \alpha c$ 时,通过俄歇过程俘获的。



为了估计这个过程中对轻核的俘获率,首先考虑一种缓慢变化的极限情况,即设想轻子和轻核都处于静止状态,相距为 R ,电子在它们的周围绕恒定的轨道旋转。这样,轻子和轻核就构成一个电偶极子。当 R 足够小时,这偶极子没有束缚态[外脱曼(1950年)确定^[11],临界距离 $R_c = 0.639a_0$],而当距离 R 再小时,电子便脱离轻原子。每当电子离开轻原子,轻子也离开轻原子,其动能减少,减少的动能就等于氢原子中电子的电离能,即 $Ke^2/2a_0$ 。轻子就这样一次次地失去能量,直到它的能量小于 $Ke^2/2a_0$,已不够释放时为止,最后形成 L-N 束缚态。在这一过程中,因电离而造成的能量损失率估计为

$$-dE/dt > (Ke^2/2a_0)\pi R_c^2 N v. \quad (40)$$

这意味着减速时间

$$t_{\text{减速}} < (Mc/\pi R_c^2 N)(Ke^2/2a_0)^{-1} \cdot (v_i/c - v_f/c). \quad (41)$$

设 $v_i/c = 2.0 \times 10^{-4}$, $v_f/c = 1.0 \times 10^{-4}$,在液氢中,轻子的减速时间 $t < 10^{-13}s$ 。

在 L-N 系统形成之初,略去离心势垒效应不计,其状态的主量子数 n_i 可由下式求得,

$$T - Ke^2/2a_0 = -\mu(Ke^2)^2/2\hbar^2 n_i^2, \quad (42)$$

其中 T 是轻子在最后一次碰撞前的动能。若取 $T \approx 0$,可求得

$$n_i = (\mu/m_e)^{1/2}. \quad (43)$$

设轻子的质量 $M = 2m_p$,轻核为氘核,则算得初主量子数 $n_i \approx 43$ 。

轻子和轻核形成 L-N 束缚态后,可通过多种机制去激发,如外俄歇过程或斯塔克混合态。但是这些过程都不会形成去激发时间的上限。因为 L-N 系统的初主量子数很大,所以可用经典的拉摩公式

$$-dE/dt = (2Ke^2/3c^3)|\dot{\mathbf{v}}|^2, \quad (44)$$

计算辐射去激发时间。例如在有库仑势的情况下,

$$t_{\text{辐射}} = (\mu c^2)^2/4\alpha^2 \hbar^2 c^3 \cdot (R_i^3 - R_f^3), \quad (45)$$

式中 R_i, R_f 分别表示初始轨道和最终轨道的半径。在 $R_i = 0.53 \text{ \AA}$ 的情况下,辐射去激发时间为 $t \approx 2.4 \times 10^{-5}s$ 。这是去激发时间的上限,它表明 N-L-N 三体系统的最终形成时间的数量级估计为 $10^{-6}s$ ^[12]。

正如本节所述,能否用不稳定的重轻子作为催化剂以获得实际的能源,L-N 系统的去激发时间是重要依据,而不是该系统的减速时间或形成时间。也就是说,重轻子的寿命应大大超过 $10^{-5}s$ 。另外,形成轻子复合系统所用的时间越长,在每秒钟内每个轻子能够催化促成的聚合反应就越少,要提供一定的输出功率,就需要更多的轻子。

四、聚变率和催化效率

轻子复合系统一旦形成,轨道上的两个轻核就会通过强力作用急速聚合。轻子本身并不参与聚变,而是获得聚变反应释放出的动能,进一步自由地催化后续的聚变反应。本节我们来确定聚变率和催化效率。

轻子复合三体系统中的两个轻核在尚未发生放能的聚合反应之前,必须克服或者穿越它们相互间的库仑势垒(隧道效应)。如表1所示,当两个轻核处于 N-L-N 束缚状态时,它们的平均间隔数量级为 $10^{-14}m$,而且轻核的速率数量级为 αc ,因此它们贯透势垒的穿隧几率便增强了。势垒穿透率可用下式求得:

$$N = (v/r_0)T, \quad (46)$$

式中 v 是轻核冲击势垒的相对速度, r_0 是它与势垒最靠近的距离。根据 WKB 近似法,势垒的穿隧几率 T 为

$$T \approx \exp\left\{-2(2\mu_N/\hbar^2)^{1/2} \int_{r_i}^{r_0} [V(r) - E]^{1/2} dr\right\}, \quad (47)$$

其中 μ_N 是双轻核系统的约化质量, r_i 和 r_0 是

两个经典的转折点,在这两点处, $E = V(r)$.

因为强相互作用势的表达式尚不得而知,所以我们采用势垒一般表达式的伍德-萨克森修正形式,

$$V_{ws}(r) = \frac{-V_0(r/b + 1)}{r/b + \exp[(r - R)/a]}, \quad (4b)$$

式中 R 是强力的作用距离, a 是扩散参数, V_0 是势垒的最大高度, V_0/b 确定势垒底部的形状. 据实验提供的数据^[13] (可能适用于 $ep \rightarrow eN^*$ 的电生过程), $R = 1.4\text{fm}$, $a = 0.005R$, $b = 0.3R$, $V_0 = 9.83\hbar^2/\mu R^2$. 这样, 二轻核间的总势垒即为

$$V(r) = V_{ws}(r) + V_{ne}(r). \quad (49)$$

其具体式是

$$V(r) = -198\text{MeV} \left\{ \frac{r}{0.42} + 1 \right\} / \left\{ \frac{r}{0.42} + \exp[(r - 1.4)/0.07] \right\} + \frac{1.44\text{MeV}}{r}, \quad (50)$$

式中 r 的单位为费密. 图 3 以氦-氦系统为例画出了这个势垒的函数曲线, 不过对于给定的 R 值, 质子-质子、质子-氦的势垒曲线与此大致相同. 根据图 3 还可确定经典转折点.

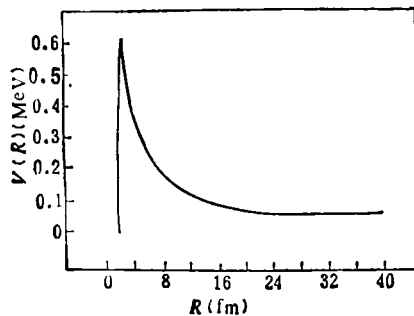


图 3 二氦核间的总势垒

根据势垒方程 (50) 式, 取氦核的几个能量值 E 用 (46) 式算出的势垒穿透率, 列于表 2. 由表 2, 可以看出, 势垒穿透率不象在二轻核 $N-N$ 聚变时那样逐渐变小直到零, 而是逐渐增大. 根据穿透率逐渐增大的趋势可以推知, 聚变率的数量级为 $10^{14} - 10^{18}\text{s}^{-1}$.

为了确定重轻子催化聚变到底实用不实用, 还有一个问题需要研究. 这就是, 许多聚变

表 2 d-L-d 系统在氦的不同能量时穿透伍德-萨克森势垒的聚变率

E (keV)	v/c	r_i (fm)	r_0 (fm)	T	$\lambda(\text{s}^{-1})$
50.0	1.0×10^{-2}	1.8	27.0	4.95×10^{-2}	5.5×10^{18}
40.0	6.5×10^{-3}	1.8	35.0	2.88×10^{-2}	1.6×10^{18}
30.0	5.7×10^{-3}	1.8	47.0	1.33×10^{-2}	4.8×10^{17}
20.0	4.6×10^{-3}	1.8	69.0	3.86×10^{-3}	7.7×10^{16}
10.0	3.3×10^{-3}	1.8	144.0	1.92×10^{-4}	1.3×10^{15}
8.0	2.9×10^{-3}	1.8	180.0	5.90×10^{-5}	2.8×10^{14}

过程都要产生氦的同位素 [见 (5)–(9) 式], 轻子可能会依附在这些氦同位素上. 因为这种轻子-氦核复合系统呈现正电荷, 所以其它核就不能充分接近这个系统以实现聚变. 因此, 这些在环绕氦同位素的轨道上运动的轻子, 就不再能够起催化反应的作用, 致使催化聚变的效率受到限制.

我们用突然扰动理论来确定轻子被氦同位素束缚住的几率. 在聚变过程中, 轻子逐渐过渡到氦离子的基态, 因此

$$\psi_i = (Z^3/\pi a_L^3)^{1/2} \exp(-Zr/a_L), \quad (51)$$

就氦来说, 式中的 $Z = 2$, a_L 表示轻子-氦核复合系统的约化质量. 聚变发生后, 氦原子获得一定的反冲能量 E 和反冲速度 $-v$. 轻子相对于氦也刚刚反冲, 其波函数为

$$\psi_f = \exp(i\mu v \cdot r/\hbar) \psi_i. \quad (52)$$

将轻子俘获而构成 L-He 的基态的几率 P 应为

$$P = \left| \int \psi_f^* \psi_i d\tau \right|^2. \quad (53)$$

将 (51) 式和 (52) 式代入, 得

$$P = [1 + (v/4ac)^2]^{-4}. \quad (54)$$

以 (7b) 式的反应为例, 轻子被 He^3 核俘获的几率为 12%, 与轻子质量无关. 这个效应是累加的结果. 这表明对于 d-L-d 反应来说, 即使轻子是稳定的, 它在遭受氦中毒之前, 平均也只能催化大约八次聚合反应.

五、结 论

我们对于重轻子催化聚变所作的分析表

明,所谓轻子动力在两个问题尚未解决之前,仍将是一个未来的幼想。在这两个问题中,一个属于亚原子物理学研究的内容,另一个则是技术上的问题。虽然这种反应过程从能量观点来看是可行的,而且这种聚变的速率也是令人满意的,但是减速时间却限制住催化剂必须是极长寿的重轻子。为了有利于提取能量,实际用来催化反应的重轻子应当是稳定的,以便一个轻子最少能够催化一百次聚合反应。即使找到了如此稳定的重轻子,并能用加速器大量生产,氮中毒的技术难题仍然有待攻克。不过,在用稳定的轻子催化聚变时,或许使用激光或者电场能把轻子从氮离子的束缚下解放出来。催化聚变的美好前景是世人瞩目的能源,它是亚原子物理学中许多新发现的重要应用之一,其是否能够实现,则要看亚原子物理学自身的发展如何了。

(岳瑞民译自《European Journal of Physics》,
3-1 (1982), 50)

参 考 文 献

- [1] L. W. Alvarez et al., *Phys. Rev.*, **105** (1957), 1127.
- [2] F. C. Frank, *Nature*, **160** (1947), 525.
- [3] Y. B. Zel'dovich, *Dokl. Akad. Nauk S. S. R.*, **95**(1954), 493.
- [4] J. D. Jackson., *Phys. Rev.*, **106** (1957), 330.
- [5] G. Zweig, *Science*, **201**(1978), 973.
- [6] P. C. M. York, *Phys. Rev. D.*, **22**(1980), 61.
- [7] D. V. Schramm, Proc. Neutrino-78, Purdue: Purdue University, (1978), 87.
- [8] E. A. Hylleraas and J. Midtal, *Phys. Rev.*, **103** (1956), 829.
- [9] P. M. Morse and H. Feshbach, *Methods of Theoretical Physics Part 2*, New York: McGraw-Hill, (1953), 1737.
- [10] H. A. Bethe, *Z. Phys.*, **57**(1929), 815.
- [11] A. S. Wightman, *Phys. Rev.*, **77**(1950), 52.
- [12] Y. B. Zel'dovich and S. S. Gershtein, *Sov. Phys. Usp.*, **3**(1961), 593.
- [13] S. Ono, *Phys. Rev. D*, **9**(1974), 2005.

第一届国际光伏科学与工程会议简讯

第一届国际光伏科学与工程会议(太阳能电池发电会议)于1984年11月13—16日在日本神户人工岛国际会议中心召开。参加会议的共有25个国家的500余名代表。太阳能电池、非晶硅材料等方面的许多著名专家都出席了会议。我国天津电源研究所等单位派代表出席了会议。著名的非晶硅太阳能电池专家、日本大阪大学教授滨川圭弘先生担任了该次会议的总主席。

会议共收到20多个国家的论文200余篇,分别以口头和壁报形式作了介绍,另外还介绍了29篇特邀评论。论文和评论的内容十分广泛,包括各个国家和地区的太阳能电池发电计划和实行情况、制作太阳能电池的新材料和新技术、太阳能电池的结构设计和理论分析、空间和地面太阳能发电系统的实验报道和系统分析、太阳能电池发电的经济效益分析等。

从会议上发表的较新数字看,目前单晶硅太阳能电池的最高转换效率已可达到19%以上,非晶硅太阳

能电池的最高转换效率可达到11%以上,CdS/CdTe丝网印刷电池的最高转换效率也可达到12.8%以上。随着太阳能电池制作技术的进步和工业化大量生产的实现,太阳能电池的成本显著降低,现在全世界太阳能电池的年产量约为20万千瓦,太阳能电池列阵的成本已由1974年的每瓦30美元左右降低到现在的每瓦6—8美元左右。现在日本每月制造的用于电子计算器和手表的非晶硅太阳能电池已达到500万块左右。

会议期间还举办了太阳能利用展览会,来自世界各国的52家公司参加了展览。展出的产品有制备太阳能电池的各种设备及原材料,以及各种单晶硅、多晶硅、非晶硅太阳能电池、CdS/CdTe异质结太阳能电池,还有太阳能电池发电工厂的照片、太阳能电池海水淡化器、太阳能电池水泵等太阳能利用设备。引人注目的非晶硅太阳能电池玻璃瓦和连续的太阳能电池生产线,使人感到太阳能电池发电的实用化前景就在眼前了。

(魏光普)