

# 原子物理在受控核聚变中的应用

王友德

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 本文简介受控热核反应过程中遇到的许多原子物理问题,对于这些问题的了解和深入研究将有助于人类更早、更有效地控制热核反应.

**关键词** 原子物理, 等离子体, 受控核聚变.

## 1 引言

原子和分子物理对其它学科和现代技术的重要性是显而易见的,在估价利用核聚变产生强功率而提出的许多方法的可行性方面,原子过程截面的知识是起着决定性作用的.1991年11月9日,欧洲联合环形聚变反应堆首次进行了受控聚变,产生了大约1.7MW的电力,持续时间为2s,这是人类向获得安全的、清洁的和取之不尽的能源迈出具有里程碑意义的重要一步.本文简要地谈一谈受控热核反应的一些基本概念及其遇到有关原子物理的一些问题.

根据爱因斯坦的质量和能量的等价定律,  $E = mc^2$ , 在一个放热反应中,能量的释放意味着系统质量的减少,例如质量减少一个原子质量单位( $1.66 \times 10^{-24}g$ ),所释放的能量是931.141MeV.在放热化学反应中(如燃烧木材,或者矿物燃料),质量减少是很少的,并且每次反应能量释放决不超过几个电子伏.相反,在质量减少的放热核反应中,每个反应释放的能量却是非常大的,这就是为什么人们用巨额投资来研究这个新能源的原因.

图1表示原子核中每个核子的结合能  $E$  作为质量数  $A$  的函数<sup>[1]</sup>,在  $A = 60$  附近有一个最大值(在Fe和Ni的范围内),这就意味着

或者用分裂重的核(裂变),或者用合成轻的核(聚变)能够获得能量.现代核反应堆就是基于重核,如 $^{235}\text{U}$ 的裂变建造的,裂变产物是放射性的,就存在一个安全的问题.由于这个原因,在过去几十年中,人们作了许多努力,试图发展没有那样严重缺点的另一种能源——基于核聚变反应的反应堆.

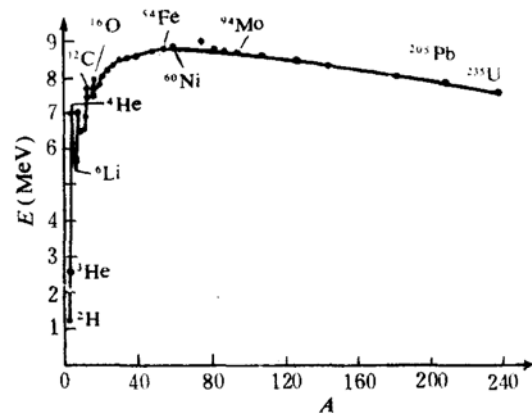


图1 每个核子结合能  $E$  作为质量数  $A$  的函数

聚变反应的主要障碍是克服由于两个核之间产生的静电相互作用而引起的库仑位垒,要使核聚变反应以相当大的几率发生,带电荷  $Z_A e$  和  $Z_B e$  的两个核就要靠得足够近,大约相隔距离  $R = 5 \times 10^{-15}m$ ,要求动能  $E$  大于库仑位垒  $E_B$ , 这里

$$E_B = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z_A \cdot Z_B}{R} \simeq 150Z_A Z_B \text{ (keV)} \quad (1)$$

事实上,这个估计是太大了,因为用量子力学的沟道贯穿位垒效应,就能在低得多的能量下以足够的几率发生这种反应.而真正切实可行的聚变反应仅仅是那些氢的同位素氘(D)、氚(T)两种轻原子核高速碰撞聚合成较重的氦原子核,并以高能中子(14.1MeV)与高能  $\alpha$  粒子(3.5MeV)的形式释放能量.从图 1 也可以看出,有小的  $A$  值的核,每核子却释放出很大的能量.可能的反应是:

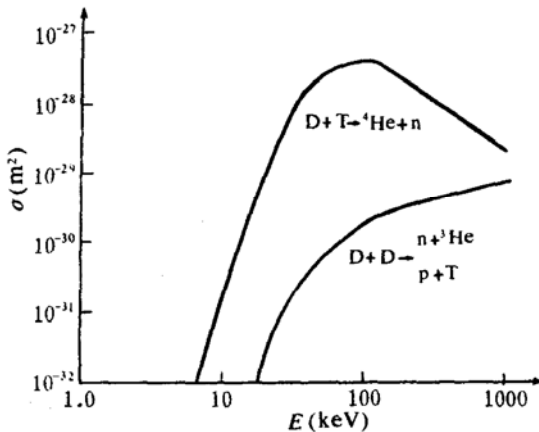
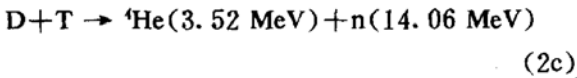
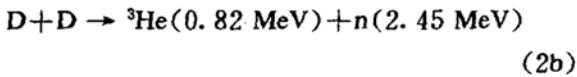
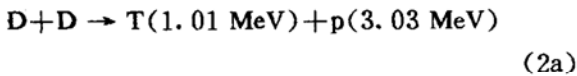


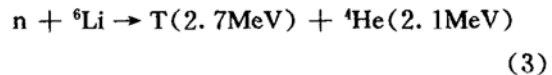
图 2 D-T 和 D-D 反应截面

D 是天然存在的,可以从海水中提取,其丰度大约在每 6500 个水分子( $H_2O$ )中就有一个是重水( $D_2O$ ),也就是说,每升海水中含有 0.03g D,地球上仅在海水中就有 45 万亿 t D.所以,D 是取之不尽,用之不竭的现成的燃料.因此,(2a)和(2b)式的反应将是我们所希望的.但是从图 2 可以看出,在相对低的能量时,(2c)式 D-T 反应的截面要高得多,而且每次反应放出的能量也要高得多,遗憾的是,T 不是天然出现的,是半衰期大约为

12.4a 的放射性物质,它必须由人工产生,而且要严格控制.

## 2 聚变堆的概念

在 D-T 反应的聚变堆中,以中子动能转变成热能的形式释放能量.同时,产生的中子与 Li 发生再生反应,生成 T.



${}^6\text{Li}$  同位素的丰度在天然锂中大约占 7.5%,而天然锂从一般的矿物中是容易得到的.

要获得能量输出 100 MW 的发电站,每秒钟需要大约  $10^{21}$  个 D-T 反应,这样的反应率要求平均动能大约 10keV,对应的温度  $T \approx 10^8 \text{ K}$ ,在这样的温度下,D-T 混合完全是电离化的,并且形成含有 D 和 T 核及电子的等离子体,没有一个反应堆容器能够在  $10^8 \text{ K}$  时经得起与等离子体直接接触的,所以必须想出一种办法来维持等离子体远离反应堆的壁.在这样一个等离子体中产生的热核功率密度由下式给出<sup>[2]</sup>:

$$P_{th} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E \quad (4)$$

这里的  $n_D$  和  $n_T$  分别表示 D 和 T 离子的密度, $\sigma$  是在相对速度  $v$  时的 D-T 反应截面, $E$  是每个反应输出的能量(17.58MeV),而符号  $\langle \rangle$  表示在等离子体中速度的麦克斯韦分布的一个平均值.

即使完全热隔离反应堆容器的壁,由于韧致辐射,放热的等离子体将减弱能量,这是因为等离子体中的电子在核库仑场中被加速,每个单位体积辐射的韧致辐射功率密度是:

$$P_{br} = 1.7 \times 10^{-38} n^2 T_e^{1/2} \text{ W/m}^3 \quad (5)$$

这里的  $n = n_D + n_T$  是离子密度(它等于电子密度  $n_e$ ),而  $T_e$  是电子温度,用 eV 表示(即电子动能温度,  $1\text{eV} = 1.2 \times 10^4 \text{ K}$ ).为了燃烧这种燃料,热核功率密度  $P_{th}$  必须大于辐射损失的功率密度  $P_{br}$ ;因为  $P_{th}$  随着温度的增加比

$P_{br}$  要迅速得多。

我们假定等离子体是一个稳定的状态, 并且保持理想的约束. 事实上, 在一定的时间间隔  $\tau$  内, 约束等离子体不仅是可能的, 而且还要产生足够的能量来: (1) 加热等离子体; (2) 克服能损; (3) 给发电站提供一个热源. 这些要求把一个状态强加于约束时间  $\tau$  和离子密度  $n$  两者上, 假定产生的热核能以 30% 的效率被利用, 那么这种状态是

$$n\tau > 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s} \quad (6)$$

在动能温度  $T \simeq 10 \text{ keV}$  时, 这个关系式被叫作劳孙判据 (Lawson criterion).

### 3 磁约束和惯性约束

要满足劳孙判据, 产生 D-T 等离子体, 正在研究两个主要的途径. 其一是磁约束, 用磁场来封闭一个体积  $V = 10 \text{ m}^3$ ,  $n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$  低密度等离子体, 要满足劳孙判据, 约束时间至少应该是  $\tau = 1 \text{ s}$ , 利用托卡马克机器已经获得了初步的结果. 在这个机器内用极向和环形磁场相结合封闭等离子体, 实验是由引入 D 和 T 气体开始的, 然后被高频放电电离形成等离子体, 等离子体是好的导体, 并能被产生极向磁场的电流加热. 其二是惯性约束, 利用  $n = 10^{30} \text{ m}^{-3}$  高密度 D-T 燃料芯块, 密封在几个毫米直径的金属套内, 而这个燃料芯块必须在等离子体明显扩张之前, 在这样一个短时间内, 将其加热到核聚变温度. 在这种方法中, 等离子体被核惯性约束, 根据劳孙判据 [(6) 式], 约束时间大约  $\tau \simeq 10^{-10} \text{ s}$ , 燃烧芯块被一个一个地放进反应容器中, 在那里它们将被强电磁辐射脉冲或高能粒子加热.

### 4 原子过程

虽然原子和分子过程在磁约束和惯性约束方法中起着重要的作用, 但是这里我们仅仅讨论在托卡马克实验中某些重要的过程, 例如, 等离子体中能量的平衡, 等离子体和反应区的壁之间的相互作用, 等离子体的加热

以及等离子体诊断学等.

#### 4.1 能量平衡和杂质

在核聚变反应堆中, 能量的平衡是由集体等离子体相互作用和原子碰撞过程来维持的, 而且原子过程中涉及的能量比核反应中涉及的能量要小得多. 在早期的实验中发现设计加热等离子体的大部分输入能量由于电离和激发杂质原子 (例如氧) 随之而来的光辐射而损失了.

在托卡马克机器中保持杂质离子的比例, 特别是高核电荷  $Z$  的离子尽可能的小是很重要的, 这是因为在电子-离子散射中通过韧致辐射功率消耗是正比于  $Z^2$ , 若  $n_z$  是电荷  $Z$  的杂质离子的密度, 由于杂质的韧致辐射, 从 D-T 等离子体中辐射的功率密度是 [和 (5) 式比较]

$$P_{br}^z = 1.7 \times 10^{-38} n_e n_z Z^2 T_e^{1/2} \text{ W/m}^3 \quad (7)$$

这里  $n_e$  是电子密度,  $T$  是电子动能温度 (eV). 对等离子体来说, 这个功率全是被损失的, 因为吸收了较长的波长辐射. 辐射功率密度  $P_{br}^z$  的主要部分是在  $\lambda < 10 \text{ \AA}$  这个波长范围内<sup>[3]</sup>.

在托卡马克机器的能量平衡中, 必须考虑由于电子-氢离子的散射而造成的功率密度的损失  $P_{br}$  和由于杂质韧致辐射而造成的功率密度的损失  $P_{br}^z$ . 如果  $P_{th} > P_{br} + P_{br}^z$ , 一个理想的约束等离子体将被点火. 图 3 表示在氢等离子体中增加 1% 或 0.1% 完全电离的铁原子时, 点火温度的变化.  $(P_L)_1 = P_{br} + P_{br}^z(1\%) =$  当等离子体中存在 1% 铁的杂质离子时总的功率密度损失,  $(P_L)_2 = P_{br} + P_{br}^z(0.1\%) =$  当等离子体中存在 0.1% 铁的杂质离子时总的功率密度损失, 为了点火, 等离子体必须在  $P_{th} > P_L$  的范围内. 在第二种情况下, 点火温度仅仅稍微提高了一点, 而在第一种情况下, 点火温度几乎提高了一倍.

显而易见, 杂质的存在改变了点火的条件, 劳孙判据的成立是假定 D-T 等离子体是“清洁的”, 对能量有重要影响的杂质的存在将会改变劳孙判据的温度和  $n\tau$  值. 那么杂质

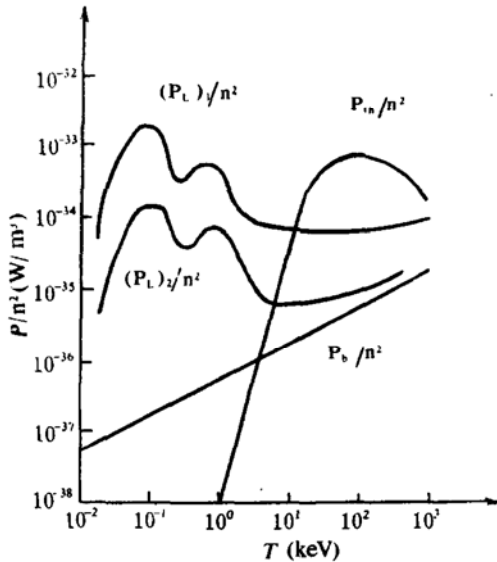
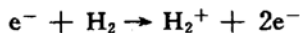
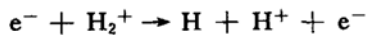


图3 在核聚变反应堆中点火条件

是怎样进入等离子体的呢? 下面我们来做一些分析. 因为磁场约束等离子体不接触环形线圈的壁, 因此与周围环境是热绝缘的, 但是在环形线圈壁的附近无疑将有某些未被电离的氢分子. 在等离子体边缘, 由于电子碰撞这些分子, 所以电化了这些分子



而  $H_2^+$  离子和电子之间的进一步碰撞导致分离



产生带有动能的中性氢原子, 其动能一般大于 5eV, 这些中性原子逃离等离子体, 并且在和环形线圈壁碰撞时形成材料溅射(如建造中用的 Fe 和 Mo 等). 另外, 壁表面也可能含有被堵塞的杂质气体, 如  $O_2$  或  $CO$ , 也将被释放到等离子区.

由于杂质在等离子体区边缘产生, 人们设计了许多方法来刮掉边缘, 移开不想要的离子. 方法之一是建造一个偏滤器, 即通过一个特殊的室, 用扰动磁场来扰动等离子体的外边缘, 用和一个固体靶碰撞来中和进入偏滤器的离子, 中和的原子被抽出机器, 这种方

法是昂贵的, 并且要建造偏滤器也是困难的. 方法之二是在等离子体和壁之间插入一层冷的( $\sim 20eV$ )等离子体, 因为在冷的等离子体中粒子的能量是小的, 将会减少在壁上的溅射, 那些被溅射进入冷却等离子体的重原子, 由于失去了辐射能, 有利于在较低的温度下保持它. 这个概念的成功完全依赖于不同原子碰撞的截面, 其中有些截面还没有测量. 特别重要的是氢离子和部分 Fe 离子以及建造堆芯中用的其它材料的离子之间的电荷交换截面.

#### 4.2 等离子体加热

要实现核聚变点火必不可少的基本条件之一是要设法把等离子体的温度提高到 10keV 以上, 主要的手段有欧姆加热, 高能中性粒子束注入加热, 大功率射频波加热, 绝热压缩加热和  $\alpha$  粒子加热等. 这里主要介绍欧姆加热和高能中性粒子束注入加热.

用高频放电电离中性氢形成冷的等离子体被沿着环形线圈产生的一个大的极向磁场的电流加热, 虽然等离子体是良导体, 但具有一定的电阻, 一旦有电流通过, 因电阻效应而得到加热<sup>[4]</sup>. 按照欧姆定律, 其加热的功率密度表示为  $P = \eta j^2$ , 式中  $\eta$  是等离子体电阻率, 可表示为  $\eta = 2.8 \times 10^{-8} / T_e^{3/2}$  ( $\Omega \cdot m$ ), 其中电子温度  $T_e$  以 keV 为单位. 但遗憾的是, 等离子体的电阻率是随着电子温度的升高而急剧下降的, 由此引起欧姆加热的功率密度也急剧下降, 这就限制了欧姆加热的利用. 经过计算表明, 仅依靠欧姆加热, 其电子温度至多加热到约 1.5keV. 电子运动产生电流, 缓慢运动的离子与迅速运动的电子弹性碰撞而被加热, 杂质离子的存在, 增加了等离子体的电阻率, 从而提高了欧姆加热功率. 但是, 电阻率的增加使电流减少胜于加热功率的增加, 所以, 甚至轻的杂质离子(如  $C^{n+}$ ,  $O^{n+}$ )的存在也是有害的<sup>[5]</sup>.

为使等离子体达到 10keV 以上的聚变点火温度, 必须在欧姆加热的基础上采用等离子体辅助加热, 目前获得成功并受到广泛重

视的辅助加热方式可能就算高能中性粒子束注入加热法了. 等离子体加热所用的中性粒子束一般是用高能中性氘原子束, 高能中性粒子不受聚变装置中磁场的影响, 可直接注入到等离子体中心区. 一旦中性原子进入等离子体, 立即通过电荷交换和碰撞过程, 电离成离子. 这些高能离子被磁场捕获, 再经过与原有等离子体的库仑碰撞, 把能量交给等离子体, 从而达到加热的目的, 这种方法在托卡马克装置中得到了广泛的应用.

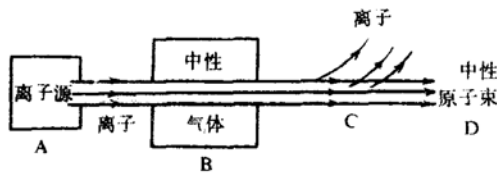
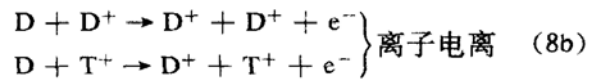
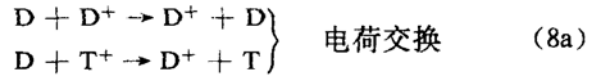


图 4 中性束注入加速系统示意图

图 4 是中性束注入加热系统的示意图. 它是这样运行的: 首先要建造一个脉冲离子源, 在离子源中采用大电流气体放电的方法产生初始等离子体, 温度大约是几个电子伏特, 密度为  $10^{18} \text{ m}^{-3}$ , 拉出的离子通过加速机构而得到加速 ( $20 \sim 200$ )keV, 加速后的高能离子经过中性化气体室, 捕获气体中的电子而成为高能中性粒子, 从中性化气体室出来的粒子流中, 除了高能中性粒子之外, 还有部分尚未捕获到电子的高能离子, 这部分离子经过偏转磁铁时被偏转掉了. 用这种方法产生的高能中性粒子束经过传输管道注入到等离子体中心区.

核聚变研究要求离子源引出尽可能高的  $D^+$  离子, 而不是分子离子  $D_2^+$ 、 $D_3^+$ . 因为离子质量越大速度越小, 这部分中性化的分子难以注入到等离子体的中心区, 只能加热边界等离子体, 这是我们不希望的. 中性粒子束在等离子体中的吸收主要通过三种原子过程来实现, 即电荷交换、离子引起的电离和电子引起的电离<sup>[2,3]</sup>.



对 D 和 T 的截面, 在同样的相对速度下是相同的. 如能量小于 40keV, 电荷交换过程 (8a) 占优势, 例如, 束流能量为 10keV 时, 电荷交换截面大约是  $10^{-19} \text{ m}^2$ . 如果能量大于 40keV, 电荷交换过程就大大降低了, 而由离子引起的电离过程 (8b) 便占优势, 例如, 束流能量为 100keV 时, 电荷交换截面下降到  $10^{-21} \text{ m}^2$ , 而电离过程截面增加 10 倍. 电子电离反应 (8c), 在这些能量下是不太重要的. 由于这些原子过程的存在, 注入的中性束强度随着向中心区域的传播而按指数规律衰减, 这些高能中性原子进入等离子体以后, 通过上述原子过程变成了高能离子, 从而被磁场捕获, 这些高能离子再通过碰撞过程将能量交给等离子体, 以达到加热等离子体的目的.

1978 年, 美国普林斯顿的 PLT 托卡马克装置, 注入了能量为 39keV 的中性粒子束, 第一次将离子温度提高到 7.1keV. 1986 年, 美国 TFTR 大型托卡马克装置上, 注入能量为 120keV 强流中性粒子束作辅助加热, 等离子体中心区域的离子温度达到了 20keV. 1989 年, 将中性束注入功率进一步提高, 其离子温度提高到 32keV, 远远超过了聚变点火对温度的要求<sup>[4]</sup>.

实验已经表明, 中性束注入辅助加热存在着两个明显的问题: 其一, 离子源中出来的高能离子束在中性化气体室中捕获电子变成中性粒子束的效率随着粒子能量的增加而急剧下降, 如果从离子源中引出负离子束, 那么由负离子转换成中性粒子的效率随能量的增加并没有明显的下降, 这是因为从负离子中分离出多余的电子要容易得多, 但是, 要研制大功率的负离子源, 目前还有相当的困难. 其二, 对中性束加热效率的一个重要限制是碳和氧杂质的存在. 由于线圈壁吸留气体而产

生的碳和氧<sup>[5]</sup>,其浓度可到1%,中性束和这些杂质之间的电荷交换产生高激发的碳离子和氧离子,由于它们的线辐射而损失能量.

#### 4.3 诊断学

原子物理应用的最重要方面是提供等离子体参数的诊断资料,例如,等离子体的密度和温度,杂质离子的浓度以及为了加热而注入的中性束穿透深度等.

关于离子密度和温度可以用测量穿过等离子体的快中性原子束的衰减来推断,在等离子体内,与慢的H电荷交换,由H原子的通量得到关于等离子体离子能量的资料,从而得到离子温度.由于电荷交换,杂质离子形成高激发态,所以对其线辐射的观察,可以推导等离子体中杂质的含量.

关于中性原子和低离化态原子,人们利用传统的变革原子的手段,对原子能级状态已经研究的多了.但对于高离化态、高激发态和多激发态的研究,至今仍然不是很多,而这些资料正是等离子体物理和天体物理所需要的.六十年代发展起来的基于加速器的束箔光谱学的研究,大大增强了人们对等离子体物理和天体物理中遇到的光谱的认识<sup>[6]</sup>.在这种方法中,加速的离子束与固体(如碳箔)或气体(如He)靶相互作用,出射束中有许多不同的激发态和电离态的原子的混合,沿着出射束线辐射的观察,可以提供一个丰富的光谱源和高电离离子能级寿命的资料.这为

受控核聚变的研究提供了一个非常有用的资料,这是别的方法无法实现的.

#### 5 结束语

尽管现在世界上不少国家为了控制热核能付出了巨大的努力,并已取得了很大的进展,但距真正成功的应用,仍有一定的距离.欧洲联合环形聚变反应堆点火成功,使人们已经看到了曙光.随着科学技术的迅猛发展,人类真正控制热核反应的时代已经为期不远了.原子物理在这个领域的重要性是完全体现出来了,几乎涉及到原子物理的所有方面,包括光谱学,碰撞物理和激光物理等.

#### 参 考 文 献

- 1 Bransden B A, Joachain C J. *Physics of Atom and Molecule*. London and New York, 1983, 570
- 2 *Atomic and Molecular Processes in Controlled Thermonuclear Fusion*, Held at Palermo, NATO Advanced Study Institute, Series B: Physics, 1984, 53
- 3 Harrison M F A. *The Role of Atomic and Molecular Processes in Fusion Research*. *Physics Reports*, 1978, 37: 59~81
- 4 朱士尧. 受控核聚变. *现代物理知识*, 1992, 1: 27
- 5 Phaneuf R A, et al. *Collision of Carbon and Oxygen Ions with Electron, H, H<sub>2</sub> and He*, ORNL-6090, 1987
- 6 Pegg D J. *Methods of Experiment Physics*, 1980, 17: 529

## Application of Atomic Physics in Controlled Thermonuclear Fusion

Wang Youde

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

**Abstract** Many atomic physics processes in controlled thermonuclear fusion reactor are introduced. The knowledge and detail study of these processes are very useful for mankind to control thermonuclear fusion earlier and more efficiently.

**Key Words** atomic physics, plasma, controlled thermonuclear fusion.