

受控核聚变研究的进展和“冷聚变”实验

李赞良

(中国科学院物理研究所)

本文简要介绍了核聚变的基本原理和实现核聚变的必要条件,概述了受控核聚变研究的两个主要途径——磁约束和惯性约束取得的重大进展。此外,还介绍了所谓 μ 介子催化聚变的物理概念,对当前“冷聚变”实验作了评述。

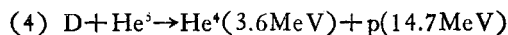
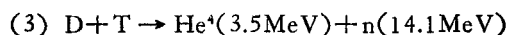
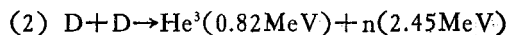
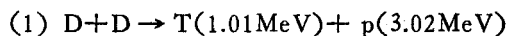
随着社会生产力的发展和人类生活水平的提高,人类对能源的需求有增无减,能源问题越来越为人们所关注。据估计,全球的化石燃料(煤和石油等)和核裂变燃料——铀的储量只可供今后两个多世纪之用。因此,当美国和苏联在50年代初相继试验氢弹爆炸——非可控热核聚变成功之后,人们很快就将注意力转向在地球上实现受控核聚变的研究,以最终解决人类的长期能源问题。这是当代最重要也是最困难的国际高科技研究课题之一。

三十多年来,许多国家投入大量人力和资金,竞相开展这项研究。科学家们通过多种途径进行探索,开展了广泛的国际合作,在高温核聚变方面已经取得了重大进展。1989年3月23日英国南安普敦大学 Martin Fleischmann 教授和美国犹他大学 Stanley Pons 教授在新闻发布会上宣布,他们在一个隔热的试管内盛以重水(D_2O),插入 $\phi 4mm$ 的钨棒作阴极,用铂棒作阳极,当通以电流时,发现反应后释放的热量大于输入的热量。他们认为这是室温条件下核聚变反应的结果。这一消息受到人们的广泛关注。一些人怀疑,一些人则宣称这一发现“为实现受控核聚变找到了新途径”,是“重大突破”。本文将简述核聚变原理,并就受控核聚变研究的进展和当前的“冷聚变”实验作简要介绍和评述。

一、核聚变原理

人们知道,不同的原子核,其所含的核子数

(质子、中子)不同,核子的平均结合能也不同;核子数少的轻核和核子数多的重核,平均结合能都较小,核子数60左右的核,其结合能最大。当两个轻核聚合成另一个较重的核时,就会释放大量的能量。这种核反应过程,称为核聚变反应。核聚变燃料主要是氢的同位素氘(D)和氚(T)。主要反应过程有:



氘核和氚核中的质子(p)数均为1,中子(n)数分别为1和2。氦核的质子数和中子数均为2,其同位素 He^3 则少一个中子。反应后释放的能量分别在括号内标出。由于D-T反应比其它反应有更大的截面,实现这种反应所需的燃烧温度比较低,产生的能量也比较大,所以尽管人们的最终目标是利用纯氘的D-D反应,但初期还是得先实现D-T反应。这种反应所需的燃料氘在自然界中很丰富。氘与氢的丰度比为 1.5×10^{-4} ,即6000个氢原子就有一个氘原子。每升海水中含氘0.03g,且容易提取,是用之不尽的燃料。氘是放射性物质,在自然界中几乎不存在,但可以人工产生。方法是在聚变堆反应区周围的再生区内,用锂(Li^6 或 Li^7)同逃逸出来的中子进行增殖反应而得



Li^7 是一种丰富的同位素(占天然锂的7.5%),广泛存在于陆地和海洋的岩石中。由于反应中

消耗量少,相对地说,其储量也是用之不尽的。

D-T 反应释放的总能量为 17.6MeV,即每 1g 反应核子所产生的等价电能为 94000kW·h,或 3.384×10^{11} J。据估计,发达工业国家中一个 100 万人口的社会所需要的电功率约 1000 MW。若用聚变能来供应,每天只需消耗氘 125g 和锂 400g,这相当于大约 5 千吨石油或 9 千吨煤。有人作过计算,利用在正常压力下流过一根 5cm 直径的管子的水中所含的氘,就足以维持全美国的电力供应。地球上氘储量约为 3×10^{16} kg,按每年全球能源消耗为 2×10^{20} J,需烧掉 10^6 kg 氘计算,足可供人类用上数百亿年,而且基本上可消除使用化石燃料和核裂变燃料所带来的烟尘、酸雨、温室效应、放射性废料污染以及运行安全性问题等给人们带来的困扰。

二、实现核聚变的必要条件

首先要有极高的温度。原子核是靠核力把核子束缚在一起的,只有当两个核彼此足够靠近而进入核力作用范围 ($\sim 10^{-13}$ cm) 时,聚变才会发生。困难在于所有核都带正电荷,彼此相互排斥。为此,必须把气态燃料加热到极高温度,使核获得足够的动能以克服库仑斥力(静电势垒)而结合在一起。对于 D-T 反应,所需动能约 290keV。考虑到量子力学隧道效应和在热运动中有些核的速度要比平均速度高得多,实际需要的平均能量 ≥ 10 keV,即相当于 10^8 K 的高温¹⁾(比太阳中心温度高好几倍)。在这样高的温度下,原子被完全电离,形成由原子核和自由电子组成的高温等离子体。这种在极高温度下发生的核聚变,称为热核聚变或热核反应。

二是要有足够好的约束,即采用某些方法使被加热到高温的等离子体同周围器壁脱离接触,使能量损失减少到可允许的最小程度,并使等离子体维持足够高的密度(聚变反应的输出功率是与核的数密度 n_i 的平方和等离子体体积成比例)和足够长的时间,以便进行充分

的聚变反应,达到有净功率增益。等离子体的这种约束特性可以用能量约束时间 τ_E 来表征。 τ_E 可以理解为,所有外部的加热一旦停止时系统冷却下来所需的时间。显然, τ_E 值越大,表示系统的约束性能越好。

对聚变反应堆来说,为了达到功率“得失相当”,即聚变反应产生的功率等于为维持等离子体必要的温度和密度所需的功率, $n_i \tau_E$ 和 T_i (离子温度)应满足的条件,称为劳逊判据。对于 D-T 反应,这个条件为: $T_i > 10$ keV, $n_i \tau_E > 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$, 或者用 n_i, τ_E, T_i 的乘积,即所谓聚变乘积 (fusion product) 来表示: $n_i \tau_E T_i > 1 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ 。对于 D-D 反应,条件更为苛刻: $T_i > 50$ keV, $n_i \tau_E > 10^{22} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$, 即聚变乘积 $n_i \tau_E T_i > 5 \times 10^{23} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ 。

如果 D-T 反应中释放的 α 粒子 (He^{4++}) 所产生的功率(占总聚变功率的 20%)足以维持等离子体需要的温度和密度,那么聚变反应堆就达到“点火”,即进入所谓“反应堆条件”。这时,聚变堆参数应同时达到的典型数值为 $T_i = 10-20$ keV, $n_i = 2.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, $\tau_E = 1-2$ s, 聚变乘积 $n_i \tau_E T_i > 5 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ 。在这条件下,聚变堆不仅能持续运行,还能有净功率输出。

三、受控聚变研究取得的重大进展

约束和加热是受控聚变研究中最重要两个课题。目前,磁约束和惯性约束是聚变研究的两条主要途径。

磁约束聚变研究始于 50 年代初,它采用强磁场约束等离子体中的带电粒子,使它们脱离与器壁的接触。当时人们期望能很快成功。然而实验发现,各种等离子体不稳定性的出现严重破坏了约束,而人们对等离子体物理还了解得很少。1958 年,美国和苏联解密,从此开始了广泛的国际合作。60 年代,由于等离子体理论

1) 在等离子体物理学中,温度常用能量单位来表示: $1\text{eV} = 11600\text{K}$ 。

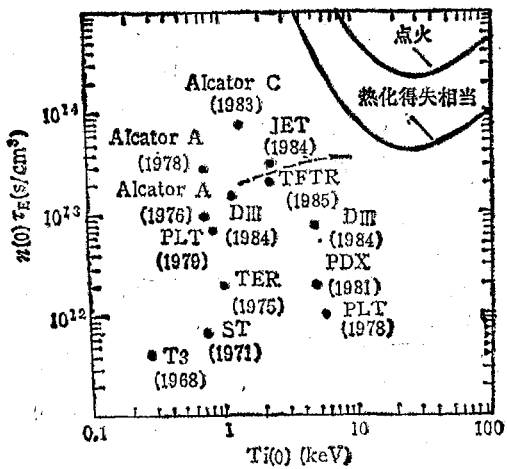


图1 劳逊约束参数 $n(0)\tau_E - T_i(0)$ 图

[$n(0)$, $T_i(0)$ 分别为中心等离子体的密度和离子温度。热化得失相当和点火这两条曲线是在等密度 D-T 混合燃料的等离子体中离子具有麦克斯韦分布的条件下得到的。JET, TFTR, Alcator C, DIII 等都是托卡马克装置的名称; 括号内标出了装置达到所示参数的年份]

取得了很大进展, 人们找到了对付各种不稳定性的一些途径。60年代末, 苏联科学家首先提出并建成了一种环形磁约束装置——托卡马克。它利用电磁感应产生的等离子体电流所造成的角向磁场和外加的纵向磁场来约束等离子体, 同时以欧姆加热为主要加热手段。从此, 尽管多种类型的磁约束装置也在探索和发展, 但许多国家把研究重点移向托卡马克。

磁约束研究的第一个目标是验证科学可行性, 实现功率得失相当; 第二个目标是建立聚变工程试验堆, 验证工程技术可行性, 达到有净聚变能输出; 第三个目标则是建立商用聚变发电站。图1给出自70年代以来至1985年3月止, 世界上的托卡马克装置尺寸不断增大, 等离子体参数不断提高, 向着聚变堆条件推进的情况。

近几年来, 几个大托卡马克相继运行或即将运行, 如 JET (西欧联营), TFTR (美), JT-60 (日本), T-15 (苏联), DIII-D (美国) 和 Tore Supra (法国) 等。它们的主要目的是获得和研究接近于聚变堆条件和聚变堆尺寸下的等离子体, 例如研究等离子体行为的定标律,

等离子体与壁相互作用, 等离子体加热, 以及 α 粒子的产生、约束和由此引起的等离子体加热等。目前, 由于各种辅助加热(射频波加热和中性束加热)的加热功率显著提高, 约束得到明显改善, 等离子体参数比图1中情况又有很大提高。以 JET 为例, 用氢或氦等离子体运行时, 1987年只用了功率为6MW的中性束加热, 就获得聚变乘积 $n_i\tau_E T_i = 2 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ 。1988年底, 据称聚变乘积已接近 $5 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$, 只要增加近两倍就可达到得失相当的条件 ($1 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$), 增加近10倍则可达聚变堆条件 ($5 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$)。今年, 辅助加热的总输入功率可达 $\leq 22.0 \text{MW}$, 分别测得的最高参数为: $T_e(0) \leq 12 \text{keV}$, $T_i(0) \leq 23 \text{keV}$, $n_e(0) \leq 2.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, $\tau_E \approx 1 - 2 \text{s}$ 。可以预期, 除非出现完全不同于理论预测的情况, 受控聚变的科学可行性, 即达到得失相当的条件, 将在近期内得到验证; 而逼近聚变堆需要的条件也不是遥遥无期的了。

为了把磁约束聚变研究迈向第二个目标, 国际原子能协会已着手进行聚变工程试验堆 INTOR (国际托卡马克堆) 的设计和建造。一些国家也开展了这类堆的设计。

惯性约束聚变研究始于60年代后期。它采用强激光束或高能粒子束聚焦到氘氚靶球上(球直径为几十到几百 μm)。靶球表面层因吸收束能而被加热并向外喷射。高速喷射产生的反冲力压缩并进一步加热氘氚燃料。压缩力可达几千万到上亿个大气压, 使燃料密度达到液体密度的1000倍 ($10^{25} - 10^{26} \text{cm}^{-3}$), 中心温度 $\sim 10 \text{keV}$, 开始自持燃烧并向四周扩展。产生的聚变能可比驱动能大很多倍, 惯性约束时间可长达几十ps。目前, 靶球的压缩已达液体密度的100倍, 温度已达聚变温度, 正朝着科学上的得失相当水平稳步前进。

受控聚变研究不仅促进了相关技术的发展, 如强高能粒子束、高功率宽频射频波源、强激光束、强磁场、大体积超导体以及高真空与表面技术等; 同时也使等离子体物理学迅速成长为物理学一个新兴分支, 产生许多新的应用, 如

自由电子激光,短波长激光,同位素分离以及基于等离子体集体效应可能创造出新一代的加速器等。

受控核聚变研究取得的上述进展是令人鼓舞的。尽管还有很多困难问题尚待解决,但已向聚变反应堆的最后成功迈进了重大的、坚实的一步。当然,人们还不断提出和探索其它可能的途径,如冷聚变、撞击聚变、激光与磁场结合用于聚变等。

四、冷聚变

如前所述,参加反应的两个核都带正电荷,为克服静电斥力,反应必须在高温条件下进行。然而,不妨设想,如果其中一个核是不带电的中性粒子,它们相互靠近时是否可以不需要高温便发生聚变反应呢?这种设想已为所谓 μ 介子催化聚变实验所演示。

1946年,英国的 F. C. Franck 和苏联的 A. Sakharov 预言,一种新发现的基本粒子—— μ 介子有可能被用于催化氢聚变反应而无需用高温等离子体。 μ 介子带负电,其电量与电子相同,但其质量约为电子质量的 212 倍。若设法将 μ 介子注入氘气中,它可能取代氘原子中的电子而绕核运动,组成一个电中性粒子——“介子氘原子”。当这粒子向另一个氘核趋近时,不受后者的静电力的作用,因而可能共同组成一个“介子分子态离子”。在通常的氘分子中,两个氘核之间的平均间隔约 0.74 \AA ,发生 D-D 聚变的反应速率极小,大约每秒每个 D_2 分子有 10^{-70} 次。但在“介子分子态离子”中,由于 μ 介子质量较大,两氘核的结合要紧密得多,平衡间隔将减少到原来的二百分之一(μ 介子与电子的质量比)。这样,聚变反应速率将相应地增加约 80 个数量级,室温条件下的 D-D 聚变反应便可能发生。1956 年美国加州大学 Berkeley 分校在液氢气泡室实验中首次观察到 μ 介子诱发质子-氘聚变反应。可惜,实验中很少观察到一个 μ 介子诱发超过一个聚变反应的情况。用这种方法来产生能量看来是无希望。

然而,70 年代末,一种新的理论预言,D-T 混合体中有可能快速地进行 μ 介子催化聚变反应。在这个理论的推动下,1982 年美国 LOS Alamos 介子物理实验室开始了这项新实验,在冷 D-T 混合体中观察到每个 μ 介子催化的聚变反应平均达 150 个,其聚变产额甚至超过新理论预期的值。尽管产生这一结果的原因还不十分清楚,但它重新激起一些科学家把 μ 介子催化聚变反应作为能源来研究的兴趣。目前,这项实验研究正在 Los Alamos 实验室, Rutherford-Appleton 实验室(英国),三所大学的介子实验室(加拿大)和高能物理实验室(KEK)(日本)等处继续进行。

然而, μ 介子在自由空间的半衰期为 $2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$,它的寿命毕竟太短,可能催化的聚变反应毕竟有限,看来没有实用意义。但是,它却给人们有益的启示:如果能找到一种寿命较长、带负电荷且质量较大的准粒子,用它来催化大规模的聚变反应将是可能的。

Fleischmann 和 Pons 关于室温核聚变的实验(以下简称 F-P 实验)发表后,在国际科学界引起了很大震动。许多科学家对此表示怀疑。有的认为 F-P 实验并不具备产生核聚变的必要条件,释放的热量可能是某种异常化学反应的结果;有的怀疑测量结果的可靠性,特别是他们没有测量聚变产物——中子,测得的热量不一定是聚变能,因为每个 D-D 反应释放的能量是确定的。然而, Fleischmann 和 Pons 毕竟是国际上颇有名望的电化学家,人们对他们的实验和结果持审慎态度,最好的办法是复验他们的实验。于是,全球掀起了复验的热潮。

就在 F-P 实验宣布后不久,美国犹他州杨百翰大学的 S. E. Jones 等人在一篇论文摘要中也宣布了他们在 1989 年初就观察到凝聚态中冷核聚变的结果。他们用钛作阴电极,在 D_2O 中还加入微量多种金属盐类,测得 2.45 MeV 能量范围的中子超过本底的三至四倍,宣布他们发现了一种无需高温,无需 μ 介子催化的引发核聚变的方法,提供了地球内部存在核聚变的间接证据。

在此后一个多月的时间里,匈牙利、波兰、苏联、日本、美国、意大利、巴西、中国、北朝鲜以及沙特阿拉伯等国的一些实验室都宣布完全或部分复验了 F-P 实验结果。美国、中国、苏联等国的一些科学家还做了理论探讨。一些实验室甚至宣布发现了 D-D 反应产物——氘。特别是在 1989 年 4 月 17 日,犹他大学化学教授 C. Walling 等宣布用质谱仪测得 F-P 实验装置的钨电极柱上有 He⁴。加州大学栢克莱分校一位核物理学家评论这一发现是“盖棺定论,它的惊人程度不亚于 F-P 的第一次宣布”。意大利 Frascati 电离气体研究中心 4 月 18 日宣布用完全不同的方法,在低温、高压条件下产生了氘核聚变,测得每秒数百个中子。

然而,另一方面仍然疑云密布。在美国,拥有第一流科学家和先进实验仪器的许多著名大学和国家实验室都没能复验 F-P 实验。在先后召开的几次冷聚变讨论会上,许多科学家并没有放弃对 F-P 实验结果的各种怀疑。美国麻省理工学院一个聚变研究小组否定了 F-P 实验测量 γ 射线的结果, Fleischmann 和 Pons 也承认他们的测量欠仔细。该小组还检查了 Jones 实验的中子测量,发现他们的测量缺乏严格的背景校准,其误差超过信号本身。加州理工学院的专家认为, F-P 实验对热能的计算有误,释放的热能只能是化学能。据报道, Fle-

ischmann 和 Pons 已撤回他们给英国 Nature 杂志的投稿。

如前所述,在正常条件下, D₂O 中的 D-D 聚变反应速率极小, $\sim 10^{-70}\text{s}^{-1}$ 。目前 F-P 实验释热的功率约为 1W 量级,假定它完全由聚变反应所产生,计算表明,应相应产生中子 $\sim 10^{12}\text{s}^{-1}$ 。F-P 实验未测量中子,若按目前某些实验测得的最高中子数 $\sim 10^3\text{s}^{-1}$ 来计算,尚差九个量级。可见,若 F-P 实验存在聚变反应,则在其释放的能量中,只有极小部分属于聚变能,很难指望它在解决人类长期能源问题上有多大前景。但是,对产生这种异常反应的机制作深入研究无疑是很有意义的物理问题,而且可能获得一些应用,如单能中子源,储能、储氘系统等。目前,人们正从在实验和理论上继续进行探索,可望经过一段时间后能对这个举世关注的问题得出初步的答案。

- [1] 宫本健郎著,金尚宪译,热核聚变等离子体物理学,科学出版社,(1981)。
- [2] Panel on the Physics of Plasmas and Fluids et al., Physics Through the 1990s: Plasmas and Fluids, National Academy Press, (1986)。
- [3] D. V. Orlinskij, G. Magyar, Nucl. Fusion, 28-4(1988), 611。
- [4] S. E. Jones, Twelfth International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Nice, France, 12-19 Oct., 1988, IAEA-CN-50, E-1-2。

(上接第 633 页)

撞电阻性撕裂模和 MHD 模中的 η_L 效应以及阿尔芬 Gap 模等。

4. 中国科学院力学研究所和北京大学的理论工作

中国科学院力学研究所和北京大学的理论工作主要包括低温等离子体、电弧等离子体、激波管、等离子体平衡、MHD 理论、电流驱动及动力论理论。

事实上,除以上所列举的研究所和大学以外,还有其它单位都做出了出色的研究工作,但由于篇幅所限,以及反映研究现状的资料一时较难收齐,故不能在此一一列举,即使对以上的研究单位所列举的研究工作也难免有挂一漏万之误,敬希谅解。

孙湘教授仔细地审阅并修改了本文,作者在此深表谢意。