

受控热核聚变研究五十年

莫 恭 敏

(中国国际广播电台 北京 100040)

受控热核聚变研究至今已有近半个世纪的历史。核物理的发展,使得科学家早在30年代末就已接近于理解恒星内部的热核反应过程。1953年前苏联爆炸成功世界上第一颗氢弹,首次实现了非受控热核聚变。经过各国科学家近50年的共同努力,在磁约束受控聚变途径中,实验装置上获得的等离子体温度已从数电子伏(eV)增加到40千电子伏(keV)以上,能量约束时间已从数十毫秒(ms)延长到1秒(s)以上。总的聚变能输出已从零增加到数兆焦耳(MJ),约相当于外部提供的等离子体加热能量的30%。尽管如此,可提供工业用能源的受控热核聚变的反应堆,却至今尚未面世。按照目前的计划,示范性聚变堆将于2025年建成,而商用聚变堆则将于2040年投产。

早期的研究成果

1950年以前,英国、美国、前苏联便秘密开始了受控聚变的研究。最初,各国物理学家都是从气体放电的箍缩效应去探索实现受控热核聚变反应途径的。

1950~1951年,上述三国的科学家都同时用氘气进行直线箍缩和环状箍缩的实验。当使强大的电流通过装有低压强的氘气的直线放电管时,气体接近于完全电离,收缩中的等离子体柱同放电管管壁之间便形成真空,于是被加热的等离子体便被箍缩在以管轴为中心线的柱形体积之中,从而实现了等离子体的磁绝热。

各国科学家对磁绝热(即磁约束)的研究主要从两个方向进行,也可以说,受控热核聚变实验的装置有两大类:1.开端式磁系统,如磁镜装置;2.闭端式磁系统,即环形装置,如仿星器和托卡马克。

1950年,前苏联著名科学家塔姆和萨哈罗夫提出利用磁场和电流的相互作用去约束等离子体的主张。在此思想基础上,1952年便诞生

了闭端式磁系统托卡马克装置。同年前苏联物理学家布德克尔提出磁镜装置原理。与此同时,美国科学家波斯特和约克也单独设计了磁镜装置,而美国天体物理学家斯必泽和惠勒则建成了把环形容器扭曲成8字形以仿照星体中发生聚变反应的仿星器。

前苏联科学家在最初的托卡马克装置之一T-2上研究了在强环向磁场中环状等离子体的性质。研究发现,在一定的放电条件下,磁场越强,等离子体柱越细,等离子体的稳定性也就越好。这对控制热核反应具有重要意义。

1956年,前苏联向世界公布了其科学家进行放电箍缩实验的部分结果,令世界科学家大为惊诧。1958年,在日内瓦举行的联合国第二届核物理大会上也公布了美、英、西德、法、日等西方国家科学家的热核聚变研究的成果。大会期间举办了一个展览,向与会者展示了使气体温度升高到数百万摄氏度(°C)的各种装置。前苏联代表则公开了前苏联原子能研究所在此前一年完成的巨型磁捕集器“奥格拉”的情况,并提交了名为“等离子体物理及受控热核聚变反应问题”的四卷论文集。轻核聚变成了大会热烈讨论的话题。与会者当时深信不疑,再过25年便得以建成热核反应堆。大会激起了人们对这项研究的巨大兴趣。大会之后,各国研究人员建立起接触,从根本上加速了许多关键问题的解决。

初步进展

60年代末,前苏联科学家的研究获得了首次飞跃。他们在托卡马克装置T-3内得以把约一千万摄氏度高温的等离子体约束数毫秒。70年代,在托卡马克装置上的实验取得一连串的成功之后,这种装置被认为是等离子体磁捕集器中最有前途的一种。它为西方各国的科学家所广泛接受。这时前苏联建造了大型托卡马克

T-10和 T-7(应用超导磁线圈). 美国、日本和欧洲国家则修改了本国的热核研究计划, 转向应用托卡马克系统. 他们开始用这种装置对环状箍缩进行广泛的理论和实验研究. 他们利用光谱、中子、电学、磁学、微波等实验技术手段去研究环状等离子体在各种条件下的基本参量, 着力研究环状等离子体的加热机制、能量损失机制和等离子体的不稳定性等问题.

经过各国科学家的努力, 各类受控热核聚变研究装置逐渐接近热核聚变所要求的临界条件: 1. 炽热等离子体的劳森参数 $n\tau$ 值(即等离子体的密度与约束等离子体能量的时间的乘积)为 10^{14} 厘米⁻³·秒($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$), 换句话说, 达到每立方厘米体积内等离子体的密度为 10^{14} 个离子数, 其冷却时间不慢于 1 秒的要求; 2. 等离子体的加热温度在氘氘聚合时约为 1 亿开尔文($T \approx 10^8 \text{K}$), 在氘氚聚合时约为 2 亿开尔文($T \approx 2 \times 10^8 \text{K}$).

图 1 和图 2 列出了各国受控热核聚变研究装置在 1976 年年中和 1981 年年初所达到的不同参量. 从中可看出, 受控热核聚变的各类实验装置在不同程度上接近临界值的情况.

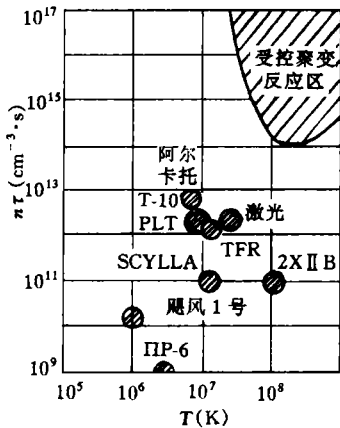


图 1 1976 年年中达到的参量示意
 阿尔卡托: 美国麻省理工学院托卡马克装置
 T-10: 前苏联库尔恰托夫原子能研究所托卡马克装置
 PLT: 美国普林斯顿大学实验室托卡马克装置
 TFR: 法国玫瑰泉托卡马克装置
 ПП-6: 前苏联库尔恰托夫原子能研究所磁镜装置
 激光: 前苏联和美国的激光加热脉冲系统

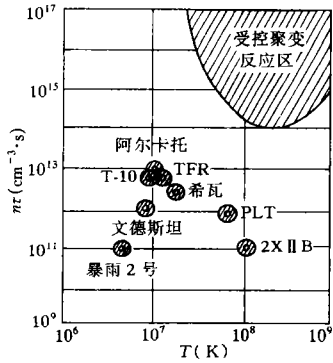


图 2 1981 年年初达到的参量示意
 希瓦: 美国利弗莫尔实验室激光装置
 2X II B: 美国利弗莫尔实验室磁镜装置
 文德斯坦: 联邦德国伽兴仿星器
 暴雨 2 号: 前苏联科学院物理研究所仿星器

更上一层楼

80 年代, 科学家对托卡马克装置上发生的种种现象实质的理解有了大踏步的进展. 在受控热核聚变研究领域走在前列的国家建成了一系列临界等离子体实验装置. 在托卡马克装置当中, 最大的当推欧洲经济共同体在英国卡拉姆建成的欧洲联合环室 JET, 其大半径为 2.96 米(m), 等离子体容积达 150 立方米(m^3). 依次是日本原子能研究所的 JT-60、美国普林斯顿的 TFTR 和前苏联的库尔恰托夫原子能研究所的 T-15. 它们被称为当前世界四大托卡马克装置. (见表 1)

表 1 四大托卡马克装置比较表

名称	国家	等离子体容积	环室半径	环室截面半径	投入运行日期
JET	欧共体	150 (m^3)	2.96(m)	1.25(m)	1983.6.
JT-60	日本	54	3.00	0.95	1985.4.
TFTR	美国	38	2.50	0.85	1982.12.
T-15	前苏联	23	2.43	0.70	1989.1.

此外, 还有法国的 TORE-SUPRA、美国的 DIII-D、意大利的 FT 等托卡马克装置. 被视为临界等离子体实验装置的还有美国的磁镜装置 MFTF、日本的磁镜装置“伽玛-10”等等. 科学家们用这些根据不同物理原理设计出来的装置进行受控核聚变反应堆参数的大规模实验. 他们在提高炽热等离子体的维持时间参数(例如,

美国的阿尔卡托和日本的 JT-60 当时的 $n\tau$ 值就分别达到和超过了 10^{14} 厘米⁻³·秒, 完善加热等离子体的方法(例如, 美国的 PLT、西欧的 JET 等装置使用中性粒子注入加热法和等离子体离子回旋共振加热法, 而前苏联的 T-10 装置则使用等离子体电子回旋共振加热法)、在提高等离子体密度情况下用非感应方法驱动和维持托卡马克等离子体电流等方面都取得了可喜的成果。

上述各种装置的参量均相对接近受控热核聚变的临界值。科学家希望对它们运转情况的分析将能得出结论, 哪一类装置会成为未来受控热核反应堆的基础。

新的突破

有资料说, 截止 1991 年底, 全世界从事核聚变研究的国家有 48 个, 其中从事托卡马克研究的国家达 32 个。经过科学家的共同努力, 受控热核聚变研究又取得新的突破。目前, 世界上几个高指标运行的托卡马克装置的聚变三重乘积见表 2。

表2 四个高指标运行的托卡马克装置

装置	聚变三重乘积 (10^{20} 米 ⁻³ ·秒·千电子伏)	持续时间 (秒)
JET(欧洲)	9	1.5
JT-60(日本)	11	0.8
TFTR(美国)	4.3	0.5
DIII-D(美国)	2	0.5

上述参数表明, JET 与 JT-60 的聚变三重乘积已达到未来聚变电厂点火条件所要求的四分之一。

《JET 年度报告》在谈到 1995 年科学的进展时, 开列了一个“各国托卡马克在离子温度 T_i 下的聚变三重乘积函数表”(见图 3), 从中可见近 30 年来世界各国托卡马克装置, 尤其是前述四大托卡马克在进行氘-氘实验和氘-氚实验时所取得的进展。例如, JT-60U 和 TFTR 的离子温度达到或超过了 40keV。在 JET 中温度也达到 20keV。而 TFTR 在 1993 至 1995 年进行氘-氚实验期间更取得了显著的成就。1995 年 9 月 26 日在该装置上进行的锂增强氘氚超放电实验获得 38 千电子伏的高温, 产生了 6.3 兆瓦特

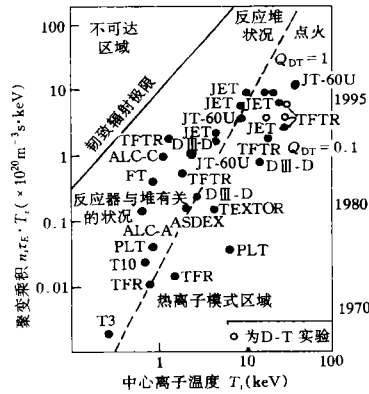


图3 各国托卡马克在离子温度 T_i 下的聚变三重乘积函数表

(MW) 聚变功率。1994 年, 该装置进行的一次氘-氚反应所产生的聚变能就达到了 6.4MJ。聚变能在 25 年内增加了一万亿倍。在托卡马克上所取得的新突破表明, 这种类型的装置极有可能成为未来受控热核电站反应堆的首选目标。

不过, 受控核聚变的另一途径——惯性约束聚变的研究也在紧锣密鼓地进行着。80 年代投入运转的惯性约束装置有前苏联的向心爆炸装置“安卡拉-5”和“海豚-1”激光器, 以及美国的激光装置“诺瓦”等等。始于 60 年代初的惯性约束研究, 已取得迅速进展。目前美国拥有世界最强的激光器——利弗莫尔实验室的“诺瓦”。其输出功率最大达 125 千焦(kJ), 1993 年的一次实验中 $n\tau$ 值接近 10^{15} 厘米⁻³·秒, 而在一次氘-氚反应中温度达到 10 千电子伏。可见这种小型受控核爆炸实验已达到了点火所需参数(其中除温度达 10 千电子伏外, 燃料密度压缩达 600 倍), 也可利用现代技术实现点火或达到能量得失相当。科学家认为, 通过惯性约束受控聚变去获取电能的前景也十分乐观。

仿星马克

尽管对托卡马克的研究取得了巨大的成功, 然而这种装置仍然有其不足之处。与此同时, 仿星器也暴露出自己的弱点。于是科学家为克服仿星器和托卡马克各自的弱点而提出了一种新型等离子体约束装置。这种装置拥有两

个线圈系统,一个是标准的托卡马克环向磁场线圈,一个是能产生类仿星器效应的平面倾斜线圈系统。由于有两组可供独立使用的线圈,这种装置既可以作为独立的仿星器运行,也可作为纯托卡马克运行。当两组线圈都通电时,它还可以作为仿星器-托卡马克混合器运行。因此科学家把它取名为“仿星马克”(STELLA MAK),以强调这类装置是仿星器和托卡马克特性的结合,具有明显的优越性。

托卡马克装置有良好的等离子体约束性能,相对简单的线圈系统以及驱动等离子体电流和加热等离子体的有效的感应方法,因而被认为是受控热核聚变研究的主流装置。然而,由于托卡马克本质上是脉冲装置,为了使它能稳态运行,需要配备诸如中性粒子束注入系统或射频电流驱动系统等大功率的辅助装置。

仿星器本质上是一种稳态装置,然而它在低碰撞区的等离子体约束性能通常比托卡马克差很多。尽管科学家提出了一些提高仿星器约束性能的新方法,但是这些新方法的优点尚未被实验证实。

因此,科学家设法改进这些装置。过去曾提出一些仿星器-托卡马克混合器的设想,例如:半仿星器、托卡马克加速器(TOKATRON)以及具有斜置线圈的托卡马克。但是这些装置不能作纯仿星器或纯托卡马克运行,或者不允许它们两者之间实现互相转换。

科学家目前提出的这种仿星器-托卡马克混合器,即所谓仿星马克则正具备这些优点。美国威斯康星-麦迪逊大学一种带有倾斜线圈的仿星器-托卡马克混合器 PHAEDRUS-T装置可作为这类新型装置的代表。它的线圈系统拥有18个环向场线圈和9个波纹管段。科学家建议把它改建为拥有矩形环向场线圈和圆形倾斜线圈系统,以分别适应于纯托卡马克运行和纯仿星器运行。

为实现仿星器方式和托卡马克方式之间的转换,科学家提出,可首先给倾斜线圈通电,以仿星器方式产生炽热等离子体,然后感应欧姆电流,以提高旋转变换值,使等离子体在转换过

程中获得好的约束。当旋转变换值足够高时,功率从倾斜线圈平滑地转接到环向场线圈,随着欧姆电流增加,而进入托卡马克方式。为进行从托卡马克到仿星器的平滑转换,按相反的顺序操作即可。

目前,PHAEDRUS-T装置备有强大的离子回旋共振频率加热系统(输出功率达2MW)。它能确保在没有欧姆加热的条件下利用射频功率去有效地加热等离子体。它着重于低频电流驱动,但也可在新的装置上继续运行。

鉴于仿星马克具有极大的灵活性,其构造相对地简单,科学家期望利用它去实现目前受控聚变研究中所使用的标准装置未能实现的课题。例如交流放电运行方式,它较脉冲运行方式有许多优越性,因其前半周放电后储存的磁能可为下面的放电所用,而不必用另外的功率为欧姆变压器充电。

过去曾研究过托卡马克的交流运行方式,但在这方面仿星马克极有希望获得成功,因为通过仿星器方式和托卡马克方式之间的转换,这种混合器可作为延长等离子体放电的一种方式而找到应用。

国际热核实验反应堆

各国科学家在受控热核聚变研究方面所取得的重大成果和所遇到的困难,使他们感到应该进行国际合作,以共同开发实用型热核反应堆。

1978年,前苏联倡议建造国际托卡马克反应堆并提出国际环室INTOR方案(其大半径5.2米,小半径1.4米,等离子体中电流6.4MA)。为此在维也纳成立了由欧共体、前苏联、美国和日本专家组成的工作小组并于次年开始设计方案。1988年,四方开始设计国际热核实验反应堆ITER。1990年12月完成了ITER的概念设计。1992年,各方同意转入下一阶段的工作——技术设计。ITER设计旨在证明建造具有大增强功率系数($Q > 5$)的受控氘氦等离子体燃烧的可能性。ITER装置的设计参数为:等离子区大半径8米,小半径3米,等离子体中最大电流24MA,输入功率30—200MW,脉冲持续

时间 $> 200s$ 。国际热核实验反应堆 ITER 将是一个庞然大物。其环向场线圈高达 17 米, 等离子体体积比当今那些最大的托卡马克的体积要大 20—40 倍, 环向场线圈和极向场线圈均是超导的, 计划于 2005 年建成。

不过, 也有人对建造这样一个超大型的实验堆提出质疑, 认为目前尚不适宜建造 ITER, 因为未解决的问题太多, 其中包括如何建造高热负载偏滤器, 如何限制对偏滤器、真空室壁的损伤, 如何限制在所要求的运行状态中的微观和宏观等离子体的不稳定性以及如何达到所需的等离子体密度范围等等。然而, 由于有了包括 JET, JT-60U, TFTR 以及德国和日本的仿星器等在内的聚变装置的经验, 设计者们对 ITER 仍然充满信心。

中国科学家的贡献

我国是从 50 年代后期开始涉足受控核聚变研究领域的。自从中国科学院物理研究所最先建造直线放电装置和角向箍缩装置以来, 在近 40 年的时间里, 中国科学家为受控核聚变研究做出了自己的贡献。

在直线箍缩研究方面, 位于四川省乐山的核工业西南物理研究院早在 50 年代末就已进行磁镜装置的建设。目前, 该院和中科院合肥等离子体物理所从事热电子简单磁镜和串级磁镜的研究。1969 年在北京的中国科学院物理研究所等离子体研究室建成了更大的功率达 10 万焦耳的直线型角向箍缩装置, 在国内首先观测到了核聚变反应中子。

在托卡马克研究方面, 中国取得较大进展。1974 年中科院物理所建成中国第一座托卡马克装置 CT-6, 后来改建为 CT-6B, 并于 1978 年开始运行。我国科学家在这座大半径为 45 厘米的装置上进行了等离子体不稳定性以及辐射加热等多方面的研究, 并同外国学者合作做了不少高水平的工作, 例如, 与美国陈骝教授合作研究了高能俘获粒子对托卡马克内扭曲模的稳定效应允许托卡马克在更高 β 时运行, 与美国罗森伯勒 (M. Rosenbluth) 和范·丹穆 (Van Dam) 两教授合作就有关高能俘获粒子稳定气

球模的工作提出了通向第二稳定区的一个可行途径, 为提高反应堆 β 值提供了另一可能途径。此外, 中科院合肥等离子体物理研究所、中国科技大学和西南物理研究院尚有多座小型托卡马克装置。它们的运行表明, 在很小的装置上也能做出成绩。

不过, 西南物理研究院的中国环流器新一号 HL-1M 则是中国目前最大的无导体壳的托卡马克装置。它是中国自行研制的环室大半径为 1.02 米的中国环流器 HL-1 的改进装置。中国的托卡马克装置同发达国家环室大半径达 3 米的大型装置相比当然是不能同日而语的。不过中国环流器新一号多次取得了多项高水平研究成果, 如等离子体重复放电持续时间长达 4 秒、等离子体电流 320 千安、纵向磁场 2.8 特斯拉。这些参数达到了国际上同类型、同规模装置的先进水平, 使它成为受世界关注的中国受控核聚变实验的代表性装置。该院的研究成果为今后建造下一代核聚变装置打下了坚实的物理和技术基础。目前, 我国第一个受控核聚变研究重点实验室—核工业环流器实验技术实验室已在西南物理研究院建成。它拥有较强的等离子体诊断技术和设备、较先进的数据获得与处理手段和等离子体加热能力。而该院以引进德国 ASDEX 装置为主的 HL-2A 建设项目——核聚变试验研究实验室正在启动之中。

在惯性约束核聚变研究方面, 中国也取得可喜成绩。中国核物理学家王淦昌院士是世界上最早提出惯性约束这一科学思想的科学家之一。1964 年, 他与因发现激光而获诺贝尔物理奖的三位物理学家之一——前苏联科学院院士巴索夫分别独立提出用激光照射氟化铀靶产生中子的设想。这种“激光打靶实现惯性约束核聚变”的原始思想, 随后便获得了实验证明。30 多年来, 王淦昌倡导并亲自组织和直接参与了我国惯性约束核聚变的研究工作, 为此做出了重要的贡献。

我国利用激光产生等离子体进行聚变研究的单位主要是上海光机所。1973 年该所研制成功 10^{10} 瓦单路固体铷玻璃激光器并用其进行

激光照射氘冰靶产生中子。1976年该所又用功率 10^{11} 瓦铷玻璃激光器进行六路打靶实验,研究强光与等离子体的相互作用以及激光聚变的基础问题,并测得氘氦碰撞中子。1987年,该所与二机部九院共同研制成功在国际上属中等量级的铷玻璃激光器“神光一号”,其激光功率达 10^{12} 瓦。“神光”激光器是我国激光技术发展的重大成就,达到了国际同类装置的先进水平。

为加速我国惯性约束核聚变研究的步伐,1993年初“惯性约束核聚变”作为一个独立的课题列入了国家高技术“863”计划,把我国惯性约束核聚变研究向更深入的方向推进。在中国科学院和中国物理工程研究院的共同努力下,1997年我国安装了总能量达6.4千焦耳的“神光二号”铷玻璃八路激光器。它将成为我国“九五”及“十五”前期惯性约束核聚变研究的主要驱动器。与此同时,技术更先进、规模更大的“神光三号”固体激光器正在设计之中。

氟化氦激光器比铷玻璃激光器效率更高。在王淦昌院士的领导下中国原子能科学研究院自1985年研制成功首台氟化氦激光器后,不断提高激光输出能量,在1990年底使其达到106焦耳,实现了“研制百焦耳级准分子激光器”的“七五”目标,使我国准分子激光研究步入国际先进行列,成为继美国、英国、日本、前苏联之后具有百焦耳级氟化氦激光器的国家。目前,为能源候选驱动器的准分子氟化氦激光器“天光一号”在该院研制成功,其激光能量已达到400焦耳。

困难与解决办法

受控热核聚变研究不仅在纯物理方面,而且在技术方面遇到巨大的困难。

对于磁约束聚变装置来说,在物理方面仍是磁阱中炽热等离子体的稳定性问题。尽管科学家通过磁约束装置特殊形状的强大磁场去抑制从反应区逃逸的粒子流,从而获得十分稳定的等离子体并在其约束时间方面获得飞跃的突破,然而,在目前所能实现的等离子体密度和温度数值以及反应堆的尺寸大小的情况下,如何

从微观和宏观方面去限制等离子体的不稳定性,并避免能量快速损失,则仍然是科学家所要致力解决的问题之一。

在这方面,他们开发了向装置注入加速氢原子或引入超高频辐射将等离子体加热到反应装置所要求温度的可靠方法,改进了约束等离子体的放电工况、抑制等离子体与腔壁发生有害的相互作用和监测等离子体杂质的各种方法,并使在托卡马克装置中进行非感应约束稳定放电成为可能。上述种种措施都是为了能获得高性能的稳定的等离子体。

所谓“高性能”指的是等离子体的密度、温度和能量约束时间的聚变三乘积的值大,因此,达到高密度、避免因过分的电磁辐射而导致的等离子体冷却、避免杂质引起的聚变燃料稀释以及提高能量约束就十分重要。这里杂质问题不容忽视。等离子体中的杂质能引起两个与其性能相关的主要效应:功率的辐射与对燃料粒子的稀释。进入强烈电离状态的异类原子对聚变燃料的微小添加量都会导致大的能量损失,甚至超过允许值。因此要求科学家做出巨大努力去不断完善真空装置,使用高熔点金属和难粉化金属作室壁和隔板材料,使用特殊装置(如偏滤器)以控制或排除异类原子等方法,使等离子体中的杂质含量低于允许值。

科学家经过探索发现,等离子体中的原子和离子与室壁物质有很强的相互作用。在容器中发生的各种过程会引起室壁材料的释放,而给等离子体引入杂质,或者对氢粒子平衡产生影响。他们通过用氢或其他反应气体混合物的放电清洗和沉积适当化学成份及物理结构的金属薄膜等各种壁锻炼方法,使表面污染物通过与原子氢的反应转变成挥发性物质,以改善容器的近表面区域,大大改变等离子体与器壁表面的相互作用,从而达到能主动控制等离子体及其性能的目的。

下一代热核聚变装置将采用长脉冲运行,因此目前的一些壁锻炼方法便不适用。例如,薄壁涂层金属会被沉积的材料迅速腐蚀或覆盖,因此必须发展诸如在放电中注入反应气体

反物质与反氢原子

杨晓段 陈鸿林

(总装备部指挥技术学院物理教研室 北京 101416)

1996年1月,欧洲核子研究中心庆祝在一次实验中合成了11个反氢原子,人类第一次真正看到了反物质原子.1996年底,美国报道位于美国伊利诺州巴达维亚的费米国家实验室也制成了7个反氢原子.反氢原子的制造成功打开了反物质研究的大门.

寻找反物质的艰难历程

1898年英国的亚瑟·舒斯特(Arthur·Schuster)预言反物质存在,他推测存在着恰好和一般原子物质相反的原子.

1928年狄拉克(Paul·Dirac)提出了相对论性电子运动方程(即狄拉克方程).他的方程有两个解,一个相应于已知电子,另一个是存在着无穷多负能量状态的解.起初,狄拉克试图把第二个解解释成质子,但质子的重量要比电子重约2000倍,因此这种观点不能成立.一些量子力学先驱如海森堡(Werner·Heisenberg)经常被狄拉克的推论深深打动,但又发现无法解释的新解难以忍受.为了克服这一困难,狄拉克假设真空是充满了负能电子的状态,为此,他在1930年提出了“空穴理论”,假设负能态为电子海所填满.根据泡里不相容原理,正能态的电子不可能跃到负能态,但负能态的电子吸收了电磁辐射后可跃到正能态成为普通电子,负能电子海中同时产生一个“空穴”.当普通电子返回“空穴”时,它们将同时湮没而放出 γ 光子,这个“空穴”相当于一个质量与电子相同而电荷相反的正电粒子,并且因缺少了负能而具有正能量,这就是狄拉克预言的正电子.他的方程预

言了“反物质”世界的存在.

1932年卡尔·安德森(Carl·Anderson)在宇宙线中发现了正电子.狄拉克的预言初步得到证实.人们的下一个目标就是寻找反质子,为此美国加州大学伯克利分校建造了高能量的Bevatron回旋加速器用以产生反质子,1954年开始运行.1955年欧文·张伯伦(Owen·Chamberlain)和艾米利奥·塞格雷(Emilio·Segre)等人发现了反质子.由于该项贡献,使他们获得了1959年诺贝尔物理奖.

根据CPT定理(电荷共轭、宇称反映、时间反演)宇宙中每一种粒子都应该有一种对应的反粒子,带有数值相等而符号相反的电荷.当一个粒子和它的反粒子相遇时,发生湮没形成 γ 射线.反粒子是否可以组成反原子,反原子能否组成反分子乃至反物质呢?例如物质世界中最简单的氢原子是由一个质子和核外电子组成的,那么是否存在由反质子和正电子组成的反氢原子呢?地球上肯定没有反物质,太阳系中也没有反物质,因为如果太阳系中有反物质,那么物质与反物质相遇而湮没所产生的 γ 射线早已把我们烘干.天体物理学家确认:我们的星系和星系团以至包括我们的超星系团在内的大约一亿光年范围内是由物质所组成而没有反物质.但是量子力学认为,各种基本量(例如电荷和动量)是守恒的,宇宙创生时产生了物质必然产生相等的反物质.因为反物质与物质所产生的光应该是一样的,所以从光谱上无法确定反物质的存在.分辨物质与反物质的唯一办法

或弹丸实现壁涂层的更新等新技术.不过,在这些新技术完善之前,薄壁涂层仍会是未来装置保持洁净等离子体的一个重要途径.

对于惯性约束聚变来说,其关键是驱动器技术.目前科学家用钨玻璃激光器进行能量得

失相当和高增益的研究.但是它能否满足将来作为能源聚变堆的需要尚难以确定.因此,科学家正在加紧研究轻离子束、重离子束和氟化氪激光等新驱动器.