

## 二 核聚变研究的发展历史

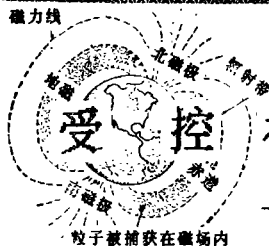
早在 1929 年,阿特金森 (Atkinson) 和奥特迈斯 (Houtermas) 从理论上计算了氢在几千万度高温下聚变成氦的可能性。1934 年,奥立芬特 (Oliphant) 发现了第一个 D-D 反应。1942 年施莱伯 (Schreiber) 和金 (King) 在美国普渡大学首次发现了 D-T 核反应。二次世界大战期间,美国集中了一批来自各国的优秀科学家在洛斯阿拉莫斯 (Los Alamos) 实验室研制原子弹,开始

注意到了核聚变反应的可能性,开展了一些有关核聚变研究的早期学术活动。战争结束后,英国和苏联也秘密开展有关受控核聚变的研究工作。回顾核聚变研究的 40 多年历史,它经历了高潮—低潮—新的高潮的曲折道路。这个过程大体可以划分为四个阶段:第一阶段,发明各种类型的聚变装置;第二阶段,美国、苏联、英国等国在极其保密情况下激烈竞争;第三阶段,开始解密并将重点转移到对高温等离子体基本性质的研究;第四阶段,世界范围内出现托卡马克研究热潮并不断取得重要进展。

### 1. 几种主要聚变实验装置的发明

**斯必泽与仿星器** 1951 年 3 月 25 日,美国许多报纸头版刊登一条惊人的消息:一位德国血统的物理学家吕克特 (Richter) 于 2 月 16 日在阿根廷的休爱密勒岛上的实验室内成功地实现了热核聚变反应,获得了由此释放的可控制的原子能。这一不寻常的消息在当时引起不少人的思考。普林斯顿大学天体物理学教授斯必泽 (L. Spitzer) 正准备去克罗地亚的 Aspen 滑雪场度假。动身之前,他父亲打电话让他看《纽约时报》上关于核聚变的那篇文章。在滑雪场的日子里,斯必泽认真思考了实现受控核聚变必须解决的等离子体约束方式和能量平衡这两个主要问题。最初他设想用磁场将等离子体约束在圆柱形容器内。为了解决等离子体从两端泄漏的问题,最简单的方法是将直圆柱变成环状。然而,这样又会出现新的严重问题:在环形装置中由于外部线圈产生的环形磁场内侧强,外侧弱,等离子体中的离子将朝下漂移,电子朝上漂移,正负电荷分离产生的电场与磁场相互作用便将等离子体朝外推向器壁。从滑雪场回来后他提出解决漂移问题的办法:将环形容器巧妙地扭成 8 字形。等离子体沿 8 字形装置内部运动一圈时总的漂移便被抵消了。他给这种装置取名为仿星器 (Stellarator),意思是说在这种装置内将会以类似于星球上的方式发生聚变核反应,释放能量。

**汤姆逊、塔克与箍缩装置 (Pinch)** 1946 年,英国伦敦大学帝国学院的物理学教授汤姆逊 (G.P. Thom-



## 核聚变

——现代物理学的一个重要前沿领域(之二)

· 朱士尧 ·

son) 和他的同事布莱克曼 (M. Blackman) 提出了环形箍缩的原理,利用环形等离子体自身产生的磁场约束等离子体。1947 年初他们便建立了第一个箍缩装置。另一位英国科学家塔克 (J. Tuck) 在二次大战期间曾去美国参加研制原子弹的“曼哈顿计划”,1946 年回到英国进行箍缩装置的实验研究,后来又被召回到美国参加氢弹研究。在这期间,他一直对受控核聚变有着极大的热情。1951 年底,他建立了一个环形箍缩装置,取名为“或然器” (Perhapsatron)。他将研究氢弹用的那些适合于快速爆炸过程的测量仪器和设备用来研究快脉冲聚变装置。

**波斯特和磁镜装置** 1952 年初,旧金山东南小镇利弗莫尔郊外的辐射实验室经过热烈讨论后决定建立一个研究热核武器的机构,年轻的约克 (H. York) 被指定为负责人。他走访了普林斯顿,也到过洛斯阿拉莫斯,跟斯必泽和塔克分别讨论了仿星器和箍缩装置的有关问题。经过详细比较分析之后他决定采用与众不同的方法——自己闯出一条新路。当时有一位名叫波斯特 (R. Post) 的年轻博士刚从斯坦福大学毕业,到利弗莫尔从事同步辐射研究,他具有微波和等离子体两方面的背景知识。约克邀请他参加核聚变研究,波斯特从当时观察到的宇宙射线现象得到启发。当宇宙射线中带电粒子进入地球磁场后,由于地球两极附近区域内磁场强,其它区域内磁场弱,因此宇宙射线在沿磁力线作螺旋运动过程中遇到强磁场区便被反射回来(题图),并被捕获在两极强磁场区域之间来回反射。这种现象被称作磁镜效应。波斯特提出利用磁镜效应解决直线型聚变装置中等离子体从终端泄漏的问题。1952 年,他们建造了第一个磁镜装置。后来为了克服等离子体不稳定性又引入极小 B 概念,出现了约飞棒和垒球缝的磁场位形。为进一步解决终端损失,又出现了将多个磁镜装置串联起来组成的折皱环和新颖的串列磁镜概念。

**阿齐莫维奇和托卡马克** 50 年代初,苏联物理学家塔姆 (Tamm) 和萨哈罗夫 (Sakharov) 提出,在环形等离子体中通过大电流感应产生的极向磁场跟强的环

向(纵向)磁场结合起来,便可能实现等离子体平衡位形。莫斯科库尔恰托夫研究所阿齐莫维奇(L. A. Artsimovich)领导下开展了此项实验研究。他们在环形陶瓷真空室外套很多匝线圈,充电后的电容器组向这些串联的线圈放电,在真空室内形成了环形磁场。由变压器回路放电产生的等离子体电流自身感应出极向磁场。这两种磁场合成具有螺旋特性的磁场对等离子体具有良好的约束作用。他们将这种装置叫做托卡马克(Tokamak),这个词是toroidal(环形的),Kamera(真空室),magnit(磁)的头两个字母以及katushka(线圈)的第一个字母组成的缩写词。经过10多年的不断改进,阿齐莫维奇发明的托卡马克装置在1968年取得了令人震惊的重要进展,为核聚变研究指出了光辉的前景,使困惑多年的等离子体物理学家受到了极大鼓舞。从此以后核聚变研究在世界范围内受到更广泛的支持,并不断取得重大进展。由于阿齐莫维奇及其首创的托卡马克装置为国际核聚变研究的发展作出了杰出贡献,国际原子能委员会在他去世后主持召开的每次等离子体物理和受控核聚变研究国际学术会议上都有一篇专题报告纪念他的功绩。

## 2. 初期的过高期望和激烈的国际竞争

50年代初,尽管受控核聚变研究处于早期探索阶段,但受到广泛的重视。在美国,普林斯顿大学、洛斯阿拉莫斯科学实验室、加里福里亚的利弗莫辐射实验室和橡树岭国家实验室都开展核聚变研究。1953年,美国原子能委员会成立了“薛伍德方案”(Project Sherwood)实施小组,专门负责核聚变研究,并拨出大量研究经费。受控核聚变受到如此重视,有其科学上、社会上、军事上和政治上的原因。如在军事方面,除了氢弹的直接军事用途外,受控核聚变产生的大量14 Mev的中子在制造核燃料方面有着重要应用。在政治上,二次大战后形成的社会主义和资本主义两大阵营之间展开了一场竞赛。当时的美国原子能委员会主席施特劳斯(Strauss)曾认为,实现受控核聚变只是5年到10年之内的事情。他要在任期内实现这件科学上的大事。他还声称要以此证明“资本主义比社会主义好”。为此他要求受控核聚变研究必须在极其保密的情况下进行。严格的保密状态,激烈的竞争意识和急于取胜的心理,不仅不可能进行必要的学术交流和国际合作,还会导致错误的分析和估计。1956年前后,美国曾错误认为苏联已能批量生产微型聚变反应堆,马上增加财政投资。曾想于1958年9月在日内瓦召开的第二届和平利用原子能会议上展示能产生热核中子的聚变装置。但最终展出的只是仿星器-C的模型及其它几个小型实验装置。其实苏联并未研制出所谓“微型聚变反应堆”。

## 3. 解密和研究重点的转移

1958年是核聚变研究发生重大转折的一年。研

究初期的过高期望没有实现,各类装置的高温等离子体普遍出现不稳定性现象,约束性能很差,等离子体温度也与受控核聚变的要求相差甚远。严格保密,各国之间互相封锁情报成为阻碍核聚变研究发展的重要原因。当时的重点是寻找实现核聚变的具体途径,对高温等离子体基本性质缺乏系统的研究。尽管有一批与核聚变有关的各个分支领域内造诣很深的物理学家,像斯必泽这样的天体物理学家对星际空间的冷等离子体和恒星内部的热等离子体很有研究;像汤姆逊这样的气体动力学专家在实验室内气体放电中的弱电离等离子体的研究方面很有造诣;像塔克、威尔逊这样的加速器专家在特殊磁场及各种电源的设计方面十分熟练;像约翰逊这样的宇宙射线科学家对于带电粒子在复杂磁场位形中的运动规律已有很多经验;还有在洛斯阿拉莫斯的一批研究核武器的专家,在快速爆炸物理现象的测量方面所用的特殊方法和仪器设备对该聚变都是有用的。但没有一位科学家对受控核聚变和高温等离子体物理有比较全面深刻的了解。遭到挫折后,人们希望尽快采取如下措施:解密,加强各国之间的学术交流和相互合作;将研究重点从急于建成聚变反应堆转向对高温等离子体系统的基础性研究。1956年,美、英、苏三国试探在国际范围内交流核聚变方面研究情报的可能性,互派科学家代表团进行学术访问。1957年开始部分地发表核聚变研究论文。1958年9月在日内瓦举行的第二届和平利用原子能国际会议上,他们展出了各种各样的核聚变实验装置,有的是实物,有的是模型,还公布了所有研究资料。1958年以后,国际学术交流日趋频繁。

## 4. 研究托卡马克的热潮

1968年,受控核聚变研究发生了又一次重大转折。这年8月,国际原子能委员会在苏联的新西伯利亚召开了第三届等离子体物理和受控核聚变研究国际会议,阿齐莫维奇公布了T-3托卡马克上取得的令人瞩目的最新实验结果:电子温度1 keV,离子温度0.5 keV,  $n_T$  值达到了  $10^{18} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ 。但是,会议上不少人怀疑电子温度的测量是否正确。当时激光技术刚问世不久,苏联还没有直接测量电子温度的激光散射诊断技术。他们公布的电子温度是以假设等离子体中的电子服从麦克斯韦分布为前提推导出来的,有人认为等离子体中的电子可能并不服从麦克斯韦分布,他们测量到的很可能是其中一部分高能逃逸电子的能量。

为了证实这件事,在阿齐莫维奇邀请下,英国卡拉姆实验室主任皮斯(R. S. Pease)带领了等离子体诊断专家小组,于1969年春天携带红宝石激光散射系统到苏联库尔恰托夫研究所,重新测量T-3托卡马克等离子体电子温度。1969年8月,英国科学家获得了可重复的可靠实验数据,证明T-3托卡马克的实验结果是正确的,整体电子温度达到了1 keV。电子服从从麦克

## 1 中国物理学会五届学术年会在京举行

中国物理学会第五届全国会员代表大会暨学术报告年会于1991年3月4日至10日在北京举行。学部委员谢希德教授主持开幕式，

上届学会理事长、学部委员黄昆教授作了第四届理事会工作报告；学部委员王淦昌教授就第二届胡刚复、饶毓泰、叶企孙、吴有训物理奖评选工作发表讲话，并向获奖者颁奖；中科院物理所所长杨国楨教授作了四届理事会财务报告。王华馥、戴道生、经福谦、蒲富恪、杨福家、王忠烈、邱学文、赵静安、姜承烈、吕敏、杜祥琬、赵忠贤、高伯龙、方守贤、郑志鹏、丁林垵、范希武、周清、李从周、侯伯宇、曹昌祺、林尊琪、傅盘铭、李方华、张焕乔、陈永寿、刘颂豪教授分别作了学术报告。学部委员、南京大学教授冯端先生当选五届理事会理事长。大会表彰武继淳、陈志中等127名学会工作积极分子和120名从事物理学工作50周年的物理学界前辈，各地方学会、分科学会、专业委员会还相互交流经验。会议期间，部分代表参观了北京正负电子对撞机与亚运村。黄昆教授主持闭幕式。

## 2 王淦昌先生宣布二届物理奖获奖名单

我国著名物理学家王淦昌先生在中国物理学会五届全国会员代表大会上宣布第二届物理奖获奖项目及获奖者。他们是：中科院上海光机所林尊琪同志的“高功率激光物理实验技术的发展”，获胡刚复物理奖；中科院物理所叶佩弦、傅盘铭同志的“四波混频光谱术”，获饶毓泰物理奖；中科院物理所李方华、范海福同志的“高分辨电子显微学中图象处理方法的研究”，获叶企孙物理奖；中国原子能科学研究院张焕乔、许谨诚、刘祖华同志的“自发裂变和中子诱发裂变的瞬发中子多重性的研究”，陈永寿同志的“连续 $\gamma$ 谱学中的高

斯韦分布的。这一消息十分令人鼓舞。据说当时华盛顿负责核聚变的办公室内气氛十分活跃，有一位工作人员听到这消息后竟然跳到办公桌上跳起舞来了。于是，世界范围内便很快掀起了研究托卡马克的热潮。普林斯顿实验室为了尽快重复T-3的实验结果，把仿星器-C改装成ST托卡马克。橡树岭国家实验室建造了奥尔马克(Ormark)，法国冯克奈-奥-罗兹(Fontaney-aux-Roses)研究所建造了TFR托卡马克，英国卡拉姆实验室建造了克利奥(Cleo)，日本原子能研究所建造了JFT-II托卡马克，西德的马克思-普朗克(Max Planck)研究所建造了普尔萨特(Pulsator)托卡马克。几年之后，我国也开始了有关托卡马克的研究。小型托卡马克CT-6装置于1975年投入运行。

70年代后期以来，核聚变研究无论在理论方面还

能磁偶极跃迁”，分别获得吴有训物理奖。

## 3 学部委员冯端教授当选中国物理学会理事长

中国物理学会第五届全国会员代表大会选出新的理事会和常务理事。学部委员

## (七)

冯端教授当选为理事长，周光召、李寿楠、杨国楨、赵凯华、杜祥琬教授当选为副理事长；杨国楨教授为秘书长，程义慧、汪雪瑛同志为副秘书长。李寿楠教授为学术交流委员会主任；赵凯华教授为物理教学研究委员会主任及名词工作委员会主任；王殖东教授为科普工作委员会主任；梁敬魁教授为出版工作委员会主任；杜祥琬教授为咨询工作委员会主任。王殖东、冯端、皮名嘉、孙祖训、李寿楠、杨国楨、杨福家、杜祥琬、陈佳洱、周光召、周仲壁、郑林生、经福谦、赵忠贤、赵凯华、徐叙瑗、梁敬魁、章综、黄祖洽、霍裕平教授当选为常务理事。方守贤、郑志鹏教授等99人当选为理事会理事。

## 4 复旦大学提出超晶格结构测试新方法

据《研究进展简报》报载，复旦大学应用表面物理国家重点实验室，采用 $x$ 射线小角衍射新方法，对该室生长的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 超晶格周期、锗硅合金层与硅层厚度、合金层组分 $x$ ，以及超晶格中两组界面不平整度等结构参数进行测定，首次观察到衍射谱强度的调制现象，其 $x$ 射线小角衍射级数多达17级。此项工作已在今年4月国际硅分子束外延会议进行报告。

## 5 中国科大首次实现微生物光学捕获与操纵

【本刊讯】中国科技大学物理系研究人员，根据光对透明宏观微粒子力学效应，用强聚焦激光束造成捕获生物粒子光学陷阱，于1990年6月在国内首次实现对细菌、鞭毛虫等微生物的光学捕获和操纵，所获珍贵照片将在本刊下期刊出。

是实验方面都取得了许多重要进展，托卡马克等离子体参数大大提高了。1978年，在PLT托卡马克上采用中性注入加热法，使离子温度提高到了7.6keV。1983年，Alcator托卡马克利用靶丸注入方式实现了高密度运行，使 $n\tau$ 值达到 $8 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ 。70年代后期开始建造四个大型托卡马克：美国的TFTR，日本的JT-60，欧洲的JET和苏联的T-15。前三个装置在前几年已分别建成并投入运行，取得了重大进展。1986年，TFTR的Supershot放电创造了离子温度的世界纪录，高达20keV，超过了聚变点火的要求。目前，等离子体离子温度已达到32keV，即超过了3亿度！而且约束性能也有很大改善，实现了“H模约束特性”的稳定放电。这说明在不久的将来掌握核聚变这个理想的新能源，实现“创造人间小太阳”的美好愿望是完全可能的！