

自然杂志 增刊

1978年诺贝尔演讲集

上海科学技术出版社

自然科学杂志增刊

1978年诺贝尔演讲集

自然科学杂志编辑部编

上海科学技术出版社

角虫杂志增刊

1978年诺贝尔演讲集

角虫杂志编辑部 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷三厂印刷

开本787×1092 1/16 印张6.25 字数146,000

1981年5月第1版 1981年5月第1次印刷

印数: 1—5,500

统一书号: 13119.929 定价: (科五)0.69元

内 容 提 要

本增刊系《科学》杂志继首次增出《1977年诺贝尔演讲集》之后的1978年同类刊物，嗣后将继续按年出版。

本期内容包括1978年诺贝尔物理奖，化学奖及生理学、医学奖获得者在颁奖典礼上的学术演讲七篇，每篇冠有作者画像及小传；另收载瑞典皇家科学院及卡罗琳研究所致各该学科获奖者的祝词三篇，这三篇的内容主要系介绍他们的杰出成就及其在学科进展上所起的重要作用。各篇讲演评均译自美国 *Science* 杂志，作者小传及祝词是根据诺贝尔基金会的英文资料编译的。

第一篇演讲的作者卡皮察是由于他在低温物理和低温工程方面的发现而得奖的，但他这次演讲的主题却是“等离子体及受控热核反应”，这是因为他最近又在高温等离子体研究上有了新的发展。第二篇的作者彭齐阿斯是由于他和威尔逊共同发现了宇宙微波背景辐射而得奖的，彭齐阿斯联系这次的发现，对元素的起源有了新的认识，所以他的演讲就着重在这一方面，而第三篇的作者威尔逊则专门介绍宇宙微波背景辐射的发现过程及其特性。第四篇的作者米切尔论述了他所以得奖的化学渗透学说。最后三篇演讲的作者阿尔伯、史密斯和内森斯相继发现了遗传交换的促进和限制作用、限制酶及其在遗传学上的应用。这三人的成就标志着遗传学新时期的开端。

本增刊主要供科研人员及大专院校师生参考，也可供具有高中以上文化程度的自然科学爱好者阅读。

自然科学杂志 增刊

1978年诺贝尔演讲集

目 录

诺贝尔物理学奖

瑞典皇家科学院休尔辛 (Lamek Hulthen) 教授的祝词..... 1

P·L·卡皮察 等离子体和受控热核反应..... 3

A·A·彭齐阿斯 元素的起源.....12

R·W·威尔逊 宇宙微波背景辐射.....23

诺贝尔化学奖

瑞典皇家科学院恩斯特 (Lars Ernster) 教授的祝词.....37

P·米切尔 开林的呼吸链概念及其化学渗透结果39

诺贝尔生理学、医学奖

卡罗琳研究所理查德 (Peter Reichard) 教授的祝词.....59

W·阿尔伯 遗传交换的促进和限制.....61

H·O·史密斯 限制性内切酶的核苷酸顺序专一性.....70

D·内森斯 限制性内切酶、猴病毒40和新遗传学.....84

诺贝尔物理学奖

瑞典皇家科学院休尔辛(Lamek Hulthen)教授的祝词

今年的奖金由莫斯科的卡皮察(Peter Leonidovich Kapitza)和美国新泽西州霍尔姆德尔(Holmdel)的彭齐阿斯(Arno A. Penzias)与威尔逊(Robert W. Wilson)分享。卡皮察获奖是“因为他在低温物理学领域的基本发明和发现”，彭齐阿斯与威尔逊获奖是“因为他们发现了宇宙微波背景辐射”。

低温的意思是指刚刚高于绝对零度(-273°C)的温度，在绝对零度一切热运动都停止，也不再有任何气体存在。从这个零点计算度数是方便的，这度数叫“开尔文”(以英国物理学家开尔文命名)，例如 3 K 的意思与 -270°C 相同。

七十年前，荷兰物理学家卡墨林·翁纳斯成功地使氦液化，引起了一个揭示出许多新的意想不到的现象的发展。1911年，他发现水银的超导电性；温度在约 4 K 时，电阻完全消失。1913年卡墨林·翁纳斯因这一发现获得了诺贝尔物理学奖金，而他在莱顿的实验室许多年来都被奉为低温物理学家的圣地，也有许多瑞典学者到那里去朝圣。

二十年代后期，莱顿的工作者有了一个值得尊敬对手，即年轻的俄罗斯人卡皮察，他当时与卢瑟福一起在英国剑桥工作，他的成就给人以深刻的印象，以至于为他建立了一个专门的研究所：皇家学会蒙德(Mond)实验室(以资助者蒙德命名)，他在那里呆到 1934 年。在这期间，他的最重要的工作是发明一个大量液化氦的灵巧装置，这是本世纪最后 25 年来在低温物理中作出重大进展的先决条件。

返回本国后，卡皮察不得不重新建立一个新研究所。尽管如此，1938年他发现氦的超流，而使物理学界惊讶，超流的意思指流体的内摩擦(粘性)在低于 2.2 K (所谓氦的 λ 点)时消失。同样的发现也由蒙德实验室的阿伦(Allen)和迈斯纳(Missner)独立地作出。其后卡皮察才华洋溢地继续进行这些研究，同时指导与教育着一些年青的合作者，这些人当中我们记得有已故的朗道，他是 1962 年物理奖的获得者，得奖是“因为他在凝聚物质(特别是液氮)方面的开创性理论工作”，在卡皮察的成就中我们也应提及他为产生强磁场所发展的方法。

卡皮察作为当代最伟大的实验家之一是很突出的，在他的学术领域内他是无可争辩的先驱者、领导者和名人。

现在我们从莫斯科物理问题研究所转到美国新泽西州霍尔姆德尔贝尔电话实验室来。在三十年代初詹斯基(Karl Jansky)在这里建造了一个大的活动天线用来调查射电噪声源，发现了某些噪声是起因于来自银河的射电波。这是射电天文学在第二次世界大战后获得如此惊人发展的开端——作为一个例证，让我回想一下荣获 1974 年物理奖的脉冲星的发现。

在六十年代早期，在霍尔姆德尔建立了一个与“回声号”卫星及“通讯号”卫星进行通讯联系的台站。包括一个易改变位置的喇叭形天线在内的设备使它成为一个非常灵敏的微波(即几个厘米波长的射电波)接收机。以后射电天文学家彭齐阿斯和威尔逊有幸采用这个仪

器来观测射电噪声(例如来自银河的噪声)。他们选择 37cm 的波长, 因为这里被猜想为宇宙贡献是微不足道的。消去各种错误的源和噪声的工作原来是非常困难而又浪费时间的, 但不久就弄清楚他们已发现了一种背景辐射, 它在所有方向上强度均匀, 与某年某日的时间无关, 所以它不可能来自太阳或我们银河系。该辐射的强度相当于技术人员所称的一个 3 K 的天线温度。

经过不断调查, 已证实此背景辐射以众所周知的法则对一个温度维持在 3 K 的空间所规定的方式随波长变化。我们意大利的同行称它为“la luce fredda”——冷光。

但冷光来自何处呢? 一个可能的解释已由普林斯顿大学的物理学家迪克(Dicke)、皮布尔斯(Peebles)、罗尔(Roll)和威尔金森(Wilkinson)作出, 这个解释已与彭齐阿斯、威尔逊的报告一起发表。它依赖于俄国出生的物理学家加莫夫(G. Gamow)和他的合作者阿尔弗(Alpher)和赫曼(Herman)约 30 年前所发展的宇宙论。从宇宙现在一直在膨胀这一事实出发, 他们断定大约在 150 亿年前宇宙必定是非常稠密的, 并大胆设想宇宙是在一次巨大的爆发——“大爆炸”中诞生的。那时的温度必定是难以置信的: 100 亿度或许更高。在这样的温度时原有的基本粒子能够形成较轻的化学元素, 因而一切波长的大量辐射被释放出来。在随后的宇宙膨胀中, 辐射的温度急剧下降。阿尔弗和赫曼估计这个辐射还会剩下约 5 K 的温度。然而在那时这一估计还被认为是有问题的, 因为这样的辐射毕竟是可以观测到的。由于这一点和其他一些原因, 这个预言被人们遗忘了。

彭齐阿斯和威尔逊发现了“来自宇宙诞生时的冷光吗”? 可能是的, ——这一说法多半是确实的, 他们异乎寻常的坚韧意志和实验技巧终于导致他们的发现, 在此以后宇宙学是一门用实验和观测通向验证的科学了。

彼得·卡皮察先生, 阿诺·彭齐阿斯先生, 罗伯特·威尔逊先生, 按照我们的惯例, 我已用瑞典语对上述成就作了简要的说明, 由于这些成就, 你们分享今年的诺贝尔物理奖。我荣幸而愉快地代表瑞典皇家科学院祝贺你们, 并请你们从国王陛下手里接受你们的奖金。

(吴智仁、潘友星译)



P. L. 卡皮察

等离子体和受控热核反应

卡皮察 (Peter Leonidovich Kapitza) 1894 年 7 月 9 日生于列宁格勒附近的喀琅施塔得，他的父亲是一个军事工程师，母亲从事高等教育和民俗学研究工作。

他的科学生涯开始于彼得堡工业学院机电系，学习期间深受约飞院士的器重，1918 年毕业后被留校从事科研工作。在此期间，他和 N. N. 西蒙诺夫共同提出了测定一个与不均匀磁场相互作用的原子的磁矩的方法。这方法后来被著名的斯特恩-盖拉赫实验所采用。

在约飞的推荐下，卡皮察于 1921 年去剑桥大学卡文迪许实验室随著名物理学家卢瑟福工作。1923 年，他第一次把云室放在强磁场中作实验，从而观察到 α 粒子径迹的弯转。1924 年，他发明了产生 320 千高斯的强磁场的新方法。1928 年，他发现各种金属的电阻随磁场强度线性上升，一般称此现象为“卡皮察线性定律”。在剑桥的最后几年中，卡皮察转而致力于低温研究。他发明的氦液化器为普及液氦温区的低温实验作出了巨大贡献。

1924~1932 年卡皮察任卡文迪许实验室副主任，1929 年他被选为英国皇家学会会员，1930~1934 年任皇家学会蒙德实验室主任。他和福勒 (R. H. Fowler) 一起是牛津拉伦登出版社的《国际物理专题丛书》的主编。

1934 年，卡皮察回到苏联，在莫斯科创办了物理问题研究所，继续研究强磁场、低温物理和低温工程。

1939 年，他发展了利用一个特别高效的膨胀透平以低压循环进行空气液化的新方法。在低温物理方面，他作出系列实验进行液氮特性的研究，这些工作导致他在 1937 年发现氦的超流性并写出一系列关于研究这一新物态的论文。

在第二次世界大战期间，卡皮察被政府邀请利用他发明的低压膨胀透平进行氧气生产和应用的研究，并委托他组织一个直属于苏联部长会议的氧气工业部，由他担任部长。

二十世纪四十年代后期，卡皮察又把注意力转向物理问题的一个崭新的领域。他发明了高功率微波发生器(1950~1955)并发现了一种新的电子温度在1,000,000 K 以上的连续高压等离子体放电现象。

卡皮察现在是物理问题研究所所长。从1957年起，他是苏联科学院主席团成员。他也是莫斯科学技术物理学院(MPTI)的创办人之一，现在他是该学院的低温物理和低温工程系主任以及学院的协调委员会主席。他又是《实验和理论物理》杂志的总编辑。——编者

选择这次诺贝尔演讲的题目我有些为难。演讲通常是与授奖的工作结合在一起的。就我的情况来说，奖金是授予我在比绝对零度高几度的液氮温度的低温物理方面的工作的。恰巧我在约30年前已离开了这个领域，但是在我所领导下的研究所里的低温研究依旧在进行。我个人现在正在研究发生热核反应所必需的很高温度下的等离子体现象。这项研究产生了有趣的结果，展现了新的可能性，我想以此作为演讲的题目，比起我过去的低温工作来，会更加有意思。因为常言说得好，“两极相通”嘛。

目前，受控热核反应是一种产生能量的方法，它可以有效地解决紧迫的全球性能源危机，这个危机的出现是由于现在作为我们主要能源的矿物燃料已消耗殆尽的缘故。

许多国家对聚变进行了深入细致的研究，而且都是结合高温等离子体的基础研究而进行的。聚变的可能性已毫无疑问，因为事实上它已在氢弹的爆炸中实现了。有关聚变核反应的详细理论是与实验相符的。然而尽管作了很大努力，耗费了大量钱财，到目前为止仍不能实施或控制聚变过程使之成为有用的能源。这无疑是一个颇为使人困惑的问题。

人们可以指望，通过几十年来研究聚变条件的等离子体理论和实验工作，我们对于妨碍我们建立受控热核反应的各种实际情况会有足够的认识。可以期望，我们将会揭示阻碍我们进展的主要困难。在这个讲演中，我想阐明这些困难是什么，以及解决这些困难的可能性。我也试图说明各个科学家在获得有用热核能量的实际可能性问题上观点的分歧。在着手论述这个课题以前，我想谈一下从核能源取得能量的实际重要性。

全球临近能源危机的事实与天然气、石油、煤炭的不可避免的原料缺乏有关。此外，通常认为决定人民福利的国民生产总值是与能量的消耗成正比的。能量资源的枯竭必然导致普遍的贫困。

避免紧迫的能源危机有两种主要的可能途径。第一种是广泛地使用取之不竭的能源，即水力发电，风力，太阳能和地热能，这种途径或许更有吸引力。第二种是使用核能，这一项发现还不到一百年。目前，重元素裂变发电已经比一些用不尽的能源更便宜。

在这些反应堆中的主要燃料是铀。象目前这种使用水平，铀仅够用一百年。如果将来在增殖反应堆中铀被更充分地使用，那么铀的使用时间将延长约50倍，即可用几千年。有些人认为溶于海水中的铀也能有效地用于产生廉价的能源。这样，似乎在现代核反应堆中使用的方法已可解决紧迫的能源危机。但是存在着不少不把铀用作能源的重要理由。这些争论主要与安全问题有关。

首先，铀的使用导致长寿命放射性废物的积累，以及导致如何安全地贮藏这些与日俱增的废物的问题。这是一个目前尚未确切解决的问题。其次，在规模巨大的核能发电站中，积累着大量的放射性物质，因此在一次假想的事故中，这些物质的逸散可以导致规模能与广岛

灾难相比拟的大灾难。

我想现代技术终于会消除这两种危险,但是还有第三种危险,它甚至更为严重。这种危险在于,核电站的大量建造将不可避免地导致大量的放射性物质在全世界到处传播,以致对这些物质的适当利用加以有效的控制实际上是不可能的。从长远来看,不仅一个小国,甚至一个大财阀或一个大型工业机构,都将有能力制造自己的原子弹。现在原子弹已经不秘密了。特别是如果广泛地建造起增殖反应堆,那么适量的钚将是容易得到的。例如,最近在印度就制造并爆炸了一颗小型原子弹。就国际组织目前的体制来看,没有一人具有足够的权威能对钚作为一种能源的和平使用实行必要的控制。而且,还不清楚这样一个组织怎样才能建立起来。这就是通过热核聚变来获得能量这第三种途径占居十分重要地位的主要理由。

众所周知,这种途径不会导致大量放射性废物的产生,因而不会导致放射性物质的危险积累,也没有显现会发生一次核爆炸的任何可能性。许多物理学家认为解决受控热核聚变涉及的科学技术问题是头等重要的,其主要理由也就在这里。

用来产生能量的热核反应的条件已确凿不移。重要的反应有两种: $D+D$ 法和 $D+T$ 法。第一种是在两个氘核之间的反应。第二种发生于氘和氚的相互作用中。两种情况中都有快中子发射出来,其能量可被利用。因为水中存在少量的氘而且很容易提取,所以氘是一种容易到手的来源丰富的燃料。自由氘在自然界中实际上是不存在的,象通常所做的那样,氘是用中子与锂相互作用来产生的。

热核反应是在高温等离子体中发生的。为了实际应用中子的能量,能量的总产量一定要大于用来维持等离子体高温的功率。这样,从中子处获得的能量必须比电子气在等离子体中韧致辐射的能量大得多。计算表明, $D+D$ 反应为了产生有用的能量所需要的离子温度比在 $D+T$ 反应中要大十倍。虽然 $D+T$ 反应在较低的温度进行,但它仍受到需要燃烧锂的妨碍,自然界中锂的蕴藏量是很少的。此外,看来锂的使用会使反应堆的设计复杂化。计算表明,为了获得有用的能量,在 $D+D$ 反应的等离子体中,离子温度应约为 10^8 K,而在 $D+T$ 的反应中则约为 10^6 K。

由等离子体和核物理研究得知,为了实际产生能量,实现受控热核反应的技术问题就归结为要获得离子温度至少为 10^8 K、密度为 $10^{13}\sim 10^{14}$ 厘米 $^{-3}$ 的等离子体。显然,用平常的容器来装盛处于这种状态的等离子体是不行的,因为还没有有一种能经受所需高温的材料。

已经有许多约束等离子体并使之绝热的方法被提出来了。最有独创性也最有希望的方法是托卡马克,它是苏联提出的,已经发展了十多年了^[1],其工作原理如图1所示。等离子体被环形螺线管中产生的磁场约束。等离子体位于线圈之中,成半径为 R 的环形,环的截面半径为 a 。等离子体在几个大气压的压力下被保持着。当它在磁场中扩张时,就会激发阻碍这种扩张的电流。等离子体被真空绝热层包围,以保持发生热核反应所需的足够高的温度。这种约束方法受到时间上的限制。计算表明,因为等离子体热容量低,即使在等离子体存在几秒钟的情况下,等离子体初始加热的能量与产生的热核能量相比仍然是很小的。因此,这种类型的反应堆仅能在脉冲形式下有效地工作。托卡马克的启动同电子回旋加速器一样,即借助于电容器经变压器轭上的线圈放电来启动。实际上,用这种方法来约束等离子体并不简单。首先,在磁场中稳定等离子体环有困难。随着截面半径 a 更由于环形线圈半径 R 的增长,等离子体环将失去其本来的形状而成为不稳定的。选择 R 与 a 的适当比例并恰当地设计磁场,可以克服这个困难,虽然目前等离子体的约束时间仅为几分之一秒。人

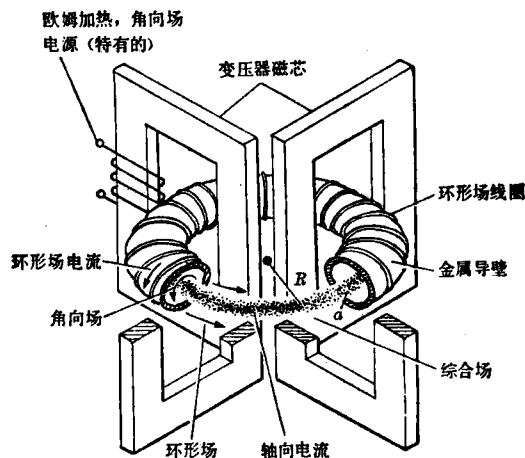


图 1 托卡马克的主要特征。

们假定,如按比例放大托卡马克,约束时间将正比于该装置尺寸的平方。

但是主要的困难还在于开始时尚未完全了解的一些原因上。为了进行热核反应, D 和 T 的离子必须加热, 现在对它们传热的主要困难起因于等离子体是用电场加热的这一事实。在这种情况下, 因为离子的质量比电子的大, 所有的能量都传输给了电子, 传输给离子则相当迟缓。温度越高, 热量的传输效率越低。在托卡马克中, 等离子体是由电容器放电而感生的电子回旋电流来加热的。这样, 加热等离子体的能量全给了电子, 通过碰撞再传给离子。加热离子到需要的温度所需的时间 Δt 比我们用电流维持对等离子体加热的时间要长得多。通常的计算是复杂的, 并且曾经努力使计算做得尽可能地准确; 即使如此, 它们仍然不够清楚。用下面的简单公式^[2]容易估计加热离子所需的时间下限。

$$\Delta t > -2.5 \times 10^2 \frac{f}{A} \frac{T_e^{3/2}}{n} \ln \left(1 - \frac{T_i}{T_e} \right).$$

这里假设了在加热期间, 等离子体密度

$$n = \frac{7.3 \times 10^{21} p}{T_e},$$

并假设压力 p (大气压) 和电子温度 T_e 保持不变。

系数 f 等于离子质量与质子质量的比值; A 是熟知的对数因子^[3], T_i 是离子温度。对于使用 D+T 反应来运行、等离子体温度 $T_i = 5 \times 10^8 \text{K}$, $n = 3 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ (初始电子温度 $T_e = 10^9 \text{K}$) 的现代托卡马克来说, 加热离子到核反应温度所需的时间要超过 22 秒, 比其中的约束时间至少大两个数量级。延长等离子体约束时间只有靠建造更大的装置, 因为时间 Δt 正比于装置尺寸的平方。从这个公式也可得知 D+D 反应的时间 Δt 又要大两个数量级, 于是 $\Delta t \sim 2 \times 10^3$ 秒。如今在离子加热时间上的困难已完全被人们认识清楚了, 虽然人们还不知道如何缩短这个时间, 以及如果在等离子体的离子被加热以前, 从电容器来的所有电子回旋加速能量全部被电子辐射掉的话, 如何使托卡马克得以开动。这就是现代托卡马克方案中设想了外加能源的原因, 设想的外加能源比电子回旋加速过程的能量大, 后者只是在开始时用于点燃等离子体。

外加的能量必须以比电子对离子的库仑散射更有效的方式传送给离子。为此目的, 有两种可能的过程。第一种^[1], 也是已经使用的一种, 是把已加速到热核反应所需温度的氘

原子或氦原子注入等离子体环。第二种加热过程是用循环高频电流在外磁场中激励阿尔文(Alfvén)磁声波。大家知道^[3],被磁声波耗散的能量是直接传送到离子上的,而且传送的功率足以加热离子并维持其温度到某一足够长的时间。这样,加热离子的问题也许可以解决,可是托卡马克运行的方式将比最初提出时更为复杂。托卡马克的设计变得更为复杂,效率就减低了。

在所有的核反应堆中,产生的功率正比于活性区的体积,损耗主要与其表面积成正比。因此,核反应堆的尺寸越大,效率亦越大,核反应堆存在一个临界尺寸,仿照这个尺寸就可产生有用的功率。实际需要的尺寸不是由科学家而是由工程师决定的,装置通常是由他们设计的,还要适当选择产生能量所需的全部附属设备及工艺。今后的发展在很大程度上取决于设计工程师的天资和创造能力。这就是托卡马克的临界尺寸主要取决于所提出的设计的原因。我个人认为目前已公布的设计方案已把我们引向一个使托卡马克无法付诸实施的临界尺寸。但是社会生活无疑已证明人的创造力是无穷的。因此人们不相信在将来不会得到一个托卡马克的实际有用的临界尺寸。

虽然,在托卡马克中获得热核反应的主要困难是加热氘离子和氚离子,但也还存在着别种困难,它们也不曾有确切的解决办法。例如,在一个托卡马克中,等离子体吸引并吸收从容器壁逸出的杂质。这些杂质大大降低了反应的速率。等离子体发射的中性原子撞击和腐蚀器壁。此外,从中子中抽取能量也使托卡马克的设计复杂化并导致临界尺寸更大。我们能够使托卡马克的临界尺寸成为实际可能的尺寸吗?即使它最终会实现,我们当然还无法说什么时候会实现。现在我们只能说,在托卡马克中受控热核反应不能实现是没有理论根据的,但释放有用能量的可能性依然超出了目前实践的范围。

在控制热核聚变的其他途径中,应予以认真考虑的是没有磁场约束的脉冲方法^[1]。其想法是,在短时间内加热一个直径约为1毫米的D+T靶丸,使得它来不及飞散。为此,需要很高的压力,以确保离子与电子间强烈的热量传送。有人设想用这种方法可以在一个D+T靶丸里充分地发生热核反应。为此需要一个很强的聚焦激光源,它应在约一毫微秒时间内同时从各个方向加热靶丸。这种加热是一种复杂的过程,但用现代计算机可以计算出所需的一些条件。如果我们用聚焦良好的激光束照射一个靶丸,这将会导致热核能量的盈余。但当人们细致地考虑这个过程时,还不清楚怎样才能解决技术上和工程上的困难。比如,怎样才能保证均匀而同时地照射,而中子能量又怎样才能有效地利用?

在这种情况下也可以这样说,基本的理论思想是正确的,但随之而来的用现有技术作工程上的发展则是我们力所不能及的。虽然,依我看来,设计激光向心爆炸似乎比象托卡马克之类的脉冲磁场方法更缺少可能性,但还是不能把解决这个问题的可能性完全排除在外。

热核反应堆的第三种途径是以等离子体连续加热为基础的。直到现在这种方法只有在我们这个研究所里有所进展。我们的工作在前九年已描述过了^[4]。此后,对这种类型的反应堆作了详细的研究,会遇到的主要困难是显而易见的。这里我将概括地叙述需要作出科学解答的一些问题。

对于形成热核过程的条件来说,我们的方法与托卡马克及激光向心爆炸法都截然不同,我们的方法并不是专门的发明,而是在研制高功率连续运行的微波发生器时偶然发现的热等离子体现象。我们建造了一个高效率的微波发生器,它在20厘米波长处工作,功率为几百千瓦。这个发生器定名为尼戈特朗(Nigotron),文献^[5]中描述了它的基本原理,它的构造

和工作特性的详尽情况则在文献[6]中提出。在1950年开始的研制过程中,当试验我们的早期模型时,高功率的微波辐射透过一个充满压力为10厘米汞柱的氦的石英球。观察到一个边界完全确定的发光的放电,但时间仅几秒钟,因为石英球有一处被熔穿了。

这些观察导致了以下设想,即球形闪电可能起因于高频波,就象在常见的闪电之后由雷暴云所产生的那样。这样就产生了必需的能量以维持在球形闪电中观察到的宽阔的辉区。这个假说发表于1955年^[7]。中断了几年以后,我们得以继续做这个实验。1958年3月,我们在一个与强烈的 E_{01} 振荡谐振的球形谐振器中得到一次自由气体放电,该谐振器中充有大气压力下的氦。这个放电是椭圆形的,在电场最大的区域中形成,缓慢地沿着圆形电力线移动。

我们开始研究这种等离子体不直接与谐振器壁接触的放电。我们假定该等离子体可能处于高温状态。我们用不同的气体和不同的压力(直至几十个大气压),并以不同的功率水平(直至几十千瓦)研究这个有趣的现象达数年之久。在我们的实验中还研究了磁场的效应(磁场可达2.5 T)。这个工作详述于文献[4]中。我们的装置的略图如图2所示。

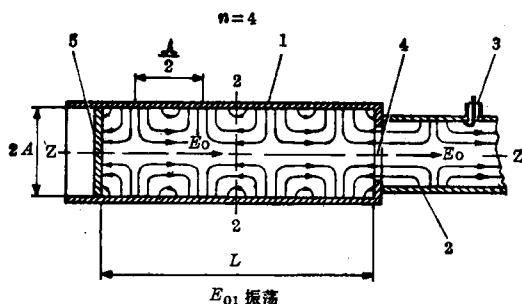


图2 在 E_{01} 振荡谐振器中的高频场结构。

等离子体放电呈线状,长10厘米,等于半波长。强烈的微波振荡 E_{01} 是用圆柱形谐振器激励的。线状放电区位于电场最大处,且其沿纵轴方向的稳定性归因于高频电场。而沿径向的稳定性则是借助于不断旋转气体来提供的。在氢或氦中放电是很有趣的。在低功率时,放电没有十分明确的边界,辉区是弥散的。功率越高,辉区越大,放电区的直径也增大。在放电区内部可观察到一个轮廓分明的丝线状核心。在我们最初的实验中,放电耗费的功率达15千瓦,压力达25大气压。压力越高,放电越稳定,并有确定的形状(图3)。测量等离子体的电导率并运用有源与无源的频谱诊断术,我们能够确切地证实:放电中心区有很高的温度——大于一百万开。这样,在线状等离子体边界几毫米的间隔内,有大于一百万开的温度跃变。这意味着在其表面上有一个热绝缘程度很高的绝热层。起初,有人表示对存在这种绝热层有些怀疑。各种诊断等离子体的方法都用过了,它们都始终证实存在着极高的温度。后来我们弄清楚应怎样解释这种温度跃变的物理性质。容易证明,在这样高温的情况下,电子在边界上散射,当电子自由地扩散入周围的气体中时,能够带走好几千瓦的功率。不存在这种热流量的情况,可以假定存在着电子在偶极层边界进行无损耗的反射来加以解释。类似现象的存在是大家熟知的,在用绝缘材料(比如玻璃和陶瓷)做的器壁包围着的热等离

子体中就存在着这样一个绝热层。

大家知道,在这些条件下,甚至在高压的情况下,电子可以有好几万开的温度,但依然未显著地把器壁加热。这个现象可以很好地解释为在绝缘表面上存在有偶极层。形成这种偶极层表面的机制是简单的。当电子撞击表面时,因其有较大的迁移率,故穿入绝缘材料的深度比离子更大,从而形成一个电偶极层,该偶极层的电场是这样取向的,使得它能弹

性地反射热电子。等离子体表面的电子热导率相当低,这一点在气体放电灯中已得到广泛应用,等离子体热绝缘的方法则是朗缪尔(Langmuir)首先提出的。我们假定,在足够高的压力

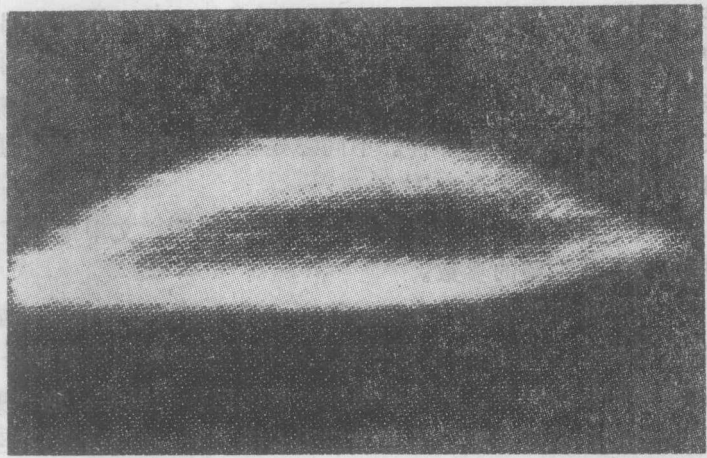


图 3 在掺有百分之五的氢,处于高功率($P=14.7$ 千瓦)及高压($p=3.32$ 大气压)状态下的氙中的线状放电区照片。放电区长度为10厘米。放电区的左端为窗户所堵。振荡为 E_{01} 型。

下一个类似的热绝缘机制可在我们的热等离子体中发生。在线状放电区边界上由于密度的突变而存在的等离子体偶极层已被我们在实验中观察到。这种温度突变的机制,仅当离子温度比电子温度低得多,而又比等离子体被显著电离处的温度高得不多时,才能存在。但这仅在放电的边界区域才是必需的。在放电的中心区域,离子温度可达很高的值。正象我们下面将看到的那样,中心和表面温度的不同是由离子气体的热流量及热导率的数值决定的。通常热导率是高的,但在强磁场中横向热导率会变得很小。因此,我们可以预期,在强磁场中,中心区的离子温度与电子温度并无不同,并可达到充分高的温度,使得在氙或氙的等离子体中产生热核反应。这是设计一个用来产生有用能量的热核反应的基础,此项设计业已完成^[8]。反应堆的略图和说明如图4所示。

线状放电(1)在约束容器和谐振器(2)中发生。氙的压力是30大气

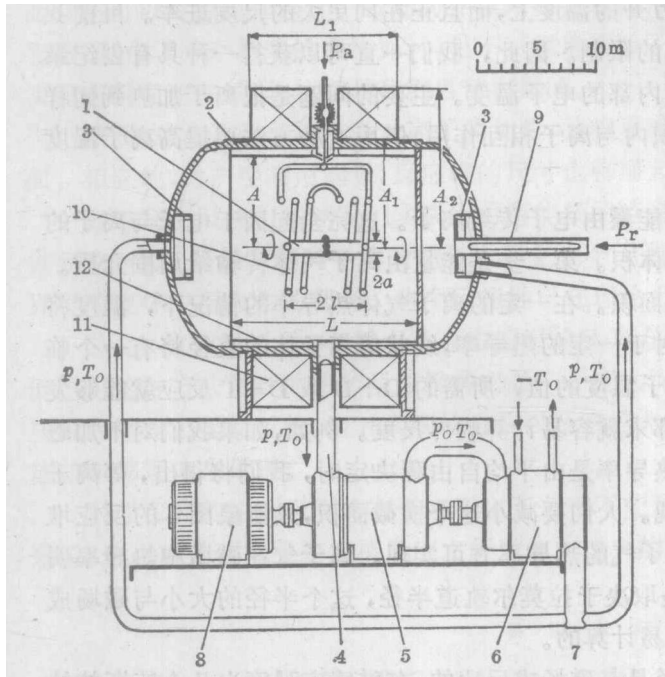


图 4 在一个闭合循环中运转的热核反应堆结构

1. 线状放电区; 2. 反应堆的圆柱形容器; 3. 倾斜喷嘴;
4. 反应堆容器与燃气轮机连接的管子; 5. 燃气轮机;
6. 等温压缩机; 7. 冷却用的水; 8. 发电机; 9. 同轴波导管;
10. 交变磁场线圈; 11. 螺线管; 12. 谐振器铜壁;
- L , 谐振器长度; L_1 , 螺线管长度; P_a , 磁声振荡功率;
- P_r , 高频功率; A , 谐振器半径; A_1 , 线圈内径; A_2 , 线圈外径; $2l$, 线状放电区长度; $2a$, 线状放电区直径; h , 谐振器与容器壁之间的距离。

压,磁场为1T,它是由一个普通的螺线管产生的。设计指出了利用中子能量的方法。被中子加热的气体通过燃气轮机(5),在那里作绝热膨胀,然后再通过涡轮压缩机(6)受等温压缩。盈余的功率为发电机(8)所用。线状放电区由一个高频电场加热,就象圆柱形谐振器(见图2)中所进行的那样。不同之处在于,环绕放电区的是线圈,它用来激励磁声波以提高等离子体的离子温度^[4]。

这个设计及有关的计算发表于1970年^[6],文中论证了使用我们那种线状等离子体时核反应堆所期望的参数。

随着时间的流逝,我们对等离子体处理过程的认识也显著增加了。我们主要改进了微波诊断技术,现在能够以百分之五的精确度测定径向密度分布,测定它对磁场、压力、外加微波功率的依赖关系。必需的稳定性条件已得到证实。这一项改进就使我们把微波功率增加了许多倍,从而将电子温度增加到5千万开。如果我们甚至能在不借助于磁声振荡来另外加热等离子体的条件下建立起电子与离子间的温度平衡,我们就能实现D+T反应。这个反应堆的设计更为简单,尺寸也更小,因此不仅热核反应堆更易建造,而且中子能量也更易转换成机械动力。这样我们就避免了在建造脉冲型热核反应堆过程中的主要困难了。

但是我们也还有一些尚未解决的困难值得极为认真地进行考虑,因为它们可以使整个问题不能解决。主要的困难有如下述。在我们那个装置中,可以在25大气压的压力下获得高频放电,并连续地将电子维持在5千万开的温度上,而且正在向更大的尺度进军。目前我们那种放电的尺度仅受传送给它的功率的限制。因此,我们一直可以获得一种具有创纪录高温的电子气,其温度甚至可高于太阳内部的电子温度。主要的问题是把离子加热到同样的温度,因为虽然电子气在整个放电体积内与离子相互作用,但用这种方法要提高离子温度是很不容易的。

温度的均衡分两步进行。第一步是能量由电子传给离子。这完全起因于电子与离子的碰撞,在此情况下,显然热传输将正比于体积。第二步是能量由离子气体传输给周围介质。这个热流量将正比于线状等离子体的表面积。在一定的离子气体热导率的情况下,温度将随线状等离子体的尺寸而增大。因此,对于一定的热导率,线状等离子体的直径将有一个临界尺寸,此时离子温度将达到接近于电子温度的值,所需的D+D或D+T反应就能够发生。如果我们知道等离子体的热导率,那末就容易计算临界尺度。例如,如果我们对不加磁场的普通离子等离子体作这种计算,当热导率是由平均自由程决定时,我们将得出,等离子体的尺度必须有好几千米,大得无法实现。人们要减小这个横截面积,只能象图4的反应堆那样,将等离子体放置于磁场中减少离子气的热导率方可实现。离子气在磁场中热导率明显地减小,不再取决于平均自由程,而是取决于拉莫尔轨道半径,这个半径的大小与磁场成反比。离子气体在磁场中的热导率是容易计算的。

由此可见,线状等离子体的临界直径是与磁场成反比的,在磁感应强度为几个特斯拉的磁场中为获得热中子所需的线状等离子体直径将为5~10厘米,这是容易置备的。为此,我们所需的等离子体设备应比我们目前研究等离子体中电子气的性质所用的设备大得多。而在我们实验室里,这个装置是完全办得到的,现在正在建造中。

可以看出,如果到目前为止还没有别的最终可使整个过程无法实现的因素,我们所介绍的连续运行反应堆不仅可能获得D+T反应的条件,而且也可能获得D+D反应的条件。

考虑离子的平均自由程,假定它等于拉莫尔轨道半径,但不计及气体中热量对流的效

应,我们就可决定离子气的热导率。众所周知,甚至在普通气体中的对流热传导也比分子碰撞引起的热传导大得多。人们也都知道,即使对于普通气体中的无规湍流运动的简单情况,要从理论上计算对流热传导实际上也不可能,这是不幸的。然而,借助于量纲上的考察,我们往往能够估计在类似情况中的热导率,然后将它推广到特殊的情况中去,凭借经验来确定所需的系数。在等离子体的情况中,过程依赖于更多的参数,确定对流热导率的问题比普通气体更为复杂。但是从理论上我们可以估计哪些因素对对流的速率最有影响。为了维持对流,必须供给能量。在气体中,这个能量是由气流的动能提供的。

在静止的等离子体中没有这样的能量来源。但是在离子化的等离子体中可能有另外的能量来源来激励对流。这个能量来源与温度梯度有关,某些热能的流动能产生对流。这个过程用内应力作定量描述是麦克斯韦^[1]首先研究出来的,他指出内应力正比于粘度导数的平方及温度梯度的平方。在普通气体中,内应力很小以至于到现在为止它们还不曾在实验中被观察到。这是因为粘度正比于常压情况下的平均自由程,约等于 10^{-5} 厘米,因此在低的温度梯度情况下,内应力是很小的。

在等离子体中,电子和离子的平均自由程约为几个厘米,而温度梯度是大的。在这种情况下,服从麦克斯韦公式的内应力比气体中的大十个数量级,我们不但可以对对流作预计,而且还可以对湍流作预计。磁场的存在无疑将对这种现象有影响,至于电场对对流的附加影响,则作了一个粗略的理论探讨,很不可靠地估计了对流的数量级。因此唯一的抉择是用实验来研究这些过程,这正是我们目前在做的。

然而,对流热传导将减弱对离子的加热,并将形成更大的线状热核等离子体的临界横截面。相应地,为产生有用能量,反应堆的尺寸也将增大。

如果这个尺寸将超越我们实践上力所能及的范围,我们就应想办法减少对流传热。要做到这一点,可以在等离子体的边界上建立一个无湍流层,就象在有普伦特尔(Prandtl)边界层的流体中所发生的那样。这个可能性已在理论上作了考虑^[4]。

总之,我们可以说,在托卡马克中运用的脉冲方法现在已能够从理论上完全制订出来,但根据这种方法建造的热核反应堆势必是一个庞大而复杂的装置。相反,我们那个热核反应堆在结构上是简单的,但其实现的方法以及它的大小取决于对流热传输过程,这个过程不能单单靠理论来处理。

科学工作的主要吸引力在于它引出了若干不能预知其答案的问题,而对于一个科学家来说,这也就是研究受控热核反应之所以如此迷人的原因。

参 考 文 献

- | | |
|---|--|
| [1] F. L. Ribe. <i>Rev. Mod. Phys.</i> 47 , 7 (1975). | [6] ———, S. I. Filimonov, S. P. Kapitza, <i>Sbornik "Elektronika bolshikh Moshchnostai"</i> Nauka (No.6)(1969), p.7. |
| [2] P. L. Kapitza, <i>JETP Lett.</i> 22 (No. 1), 9 (1975). | [7] P. L. Kapitza, <i>Collected Papers</i> (Pergamon, Oxford, 1965), vol. 2, p. 776. |
| [3] ——— and L. P. Pitaevskii, <i>Sov. Phys. JETP</i> 40 (No. 4), 701 (1975). | [8] ———, <i>Sov. Phys. JETP</i> 31 (No. 2), 199 (1970). |
| [4] P. L. Kapitza, <i>ibid.</i> 30 (No. 6), 973 (1970). | [9] J. C. Maxwell, <i>Phil. Trans. R. Soc. London</i> 170 , 231 (1879). |
| [5] ———, <i>High-Power Microwave Electronics</i> (Pergamon, Oxford, 1964). | |

(潘友星译自 *Science* vol. 205, No. 4410, 7 Sept. 1979; 陆全康校)



A·A·彭齐阿斯

元素的起源

阿诺·彭齐阿斯 (Arno A. Penzias) 1933 年生于德国慕尼黑。他一家由于是犹太人，曾被纳粹放逐波兰，旋又返回慕尼黑。第二次世界大战前夕，希特勒对犹太人的杀害变本加厉，彭齐阿斯一家在千辛万苦中分次逃往英国，半年后才得会聚一处，乃于 1939 年 12 月底迁往美国，1940 年 1 月抵达纽约定居，他父亲做木匠，母亲做缝纫工，苦度余生。

彭齐阿斯先在布鲁克林技术学校学习，后入纽约市立学院读化学工程。读完一年级后对物理学发生兴趣，遂即改读物理学。1954 年毕业后，在美国陆军通信部队当雷达技术员两年。1956 年秋转往哥伦比亚大学辐射实验室任助理研究员。这时他刻苦钻研微波物理学，受命为一项天文实验建造一个微波放大器，并在汤斯 (Townes) 教授指导下开始写这方面的论文，1961 年，他的论文完成，仰慕新泽西州霍尔姆德尔贝尔实验室的高级天文仪器，在那里找到一个临时工作，以便完成他写论文时开始的天文观察。由于他的卓越才能，被贝尔实验室永久留任。六十年代末，他和威尔逊一起发现了 3 K 宇宙背景辐射，受到天体物理学家特别是宇宙学家的普遍重视，认为这是继哈勃发现的星系红移现象后，对大爆炸宇宙学说的又一重大的实验支持。

他的主要兴趣在元素起源方面，他对元素和同位素的丰度，特别是氘的丰度从射电天文学角度进行了深入的研究，使人们探索银河系中氘的分布成为可能，并为这一物质的起源从宇宙学角度提供了证据。

1972 年，彭齐阿斯改任贝尔实验室无线电物理研究部主任，他的前任就是建成 20' 喇叭形天线的杰出的工程师克劳福特 (A. B. Crawford)，他和威尔逊就是利用这个喇叭形天线发现了宇宙背景辐射的。1972 年之后，他又是在普林斯顿大学天文物理系短期讲学的成员之一。1976 年起，彭齐阿斯任无线电研究实验室主任。——编者