

受控热核聚变实验装置概论

上 册

金 钟 声

中国科学技术大学

一九八二年九月

前 言

世界受控热核反应的研究工作于 1950 年前后开始。由于等离子体的宏观稳定性问题没有及时解决，致使该研究工作于 1960 年前后出现了低潮。但随着转向基础理论与实验技术密切配合的方针，对等离子体的平衡与稳定性问题不久就获得了显著的改进，于是使该领域的研究工作于六十年代末期出现了新的高潮，并持续至今。

近几年来，在受控热核反应研究的理论上与实验上均取得了令人鼓舞的成就——逐步地弄清了某些主要不稳定性的机制，提出了抑制的办法，创建了能较好地约束等离子体的种种磁场形态，使等离子体的温度达到 8 千 4 百万度（美国 PLT 装置，1980 年），约束指标 $n\tau = 3 \times 10^{13}$ 秒/立方厘米（美国 ALCATOR 装置，1978 年，1980 年）。惯性约束进展也很快，密度已达到 10^{23}cm^{-3} ，温度达到一千万度以上。但就其已达到的能量约束时间和粒子浓度的乘积 $n\tau$ 值而言，距能量得失相当的劳逊判据尚差 1—3 个数量级（视约束方式与磁场位形的不同而异）。因此，即使暂且不提聚变动力的应用，就是欲达到能量收支相当的最起码条件，也还必须作出十分艰巨的努力。

二十多年来，创建了从等离子体的约束方式、加热机制到装置工作原理、结构形式各不相同，各具其特色的很多受控热核反应实验装置。在初期建造的均属原理性试验装置，随后逐步地过渡到中间试验装置。目前正在向创造所谓“点火”装置进军。一旦这个里程碑胜利到达，就可以向实现最后的聚变动力的应用目标而迈进。按目前的发展趋势估计，如果中途不出现非常棘手的问题，于 1985 年左右实现“点火”，于本世纪末或下一世纪初建成商业聚变动力堆是可能的。

就目前已达到的水平及其内在的潜力来看，在磁约束装置中，以托卡马克装置、磁镜装置和角向箍缩装置较有希望，它们发展成聚变动力堆的潜力较大。仿星器由于具有稳态运行的特点，再加上结构上的一些改进，从长远来看，也是不容忽视的重要途径。利用惯性来约束等离子体的聚变装置，以其避免了庞大的磁场系统，而非常诱人重视，据初步估计也有发展成聚变动力堆的可能。但与磁约束概念相比，对惯性约束概念的基础研究较肤浅，因此在进一步发展中，是否会出现重大的问题，难以预测。到底那种类型能首先建成聚变动力堆，将来最适宜于发展成聚变动力工程，仅以现有的研究成果，尚难断言。鉴于这种情况，国际上对受控热核反应研究所持的方针与政策，在近期内基本上仍然是：有重点的发展，多途径的探索。

受控热核反应研究是一个综合性较强难度较大的科技领域。它正处于迅速发展的初期，有很多理论问题急待阐明建立，因此需要借助于很多其它学科的新成就。研究受控热核反应的最终目的是建成商用聚变动力堆，因此势必攻克一系列复杂的工艺技术难关，采用很多新技术。总之，受控热核反应研究的意义深远，任务艰巨，距实现的日子已日益临近。

我们认为，从事于受控聚变动力工程领域工作的科技人员，至少需要有三方面的专业

知识。其一是等离子体物理学；其二是受控热核反应实验装置；其三是高温等离子体的诊断方法。本教材是为培养将来从事于这个领域工作的大学生编写的，其内容共分七章：第一章受控热核反应实验装置基础知识；第二章到第六章叙述几种主要类型实验装置的工作原理、磁场形态、装置结构等问题；最后一章介绍受控聚变动力堆系统。鉴于真空技术、电源与控制系统已有专门课程介绍，故本课程不予叙述。本教材偏重于论述各类装置本体的工作原理、主要部件的结构、主要工程技术问题的考虑以及装置的运行情况。在叙述中必然会碰到的一些等离子体物理问题，一般只引用其结论，而不作详细描述，用到的公式也不作推导。希望通过本课程的学习，对受控聚变动力工程能有一个全貌的了解，并对建造实现受控聚变装置的工作内容、存在问题以及解决途径有一粗略的概念。

受控热核聚变研究是一个崭新的科技领域，有的内容从理论到实验并不很成熟。特别象装置这一课程，涉及到的内容较广，同时又不断地提出一些新概念与新设想。各种新装置不断建立，实验结果日新月异。文献资料虽多，但缺乏集中的简要归纳。在本教材的编写过程中，尤感困难的是国内外至今尚无一本较系统地、较集中地叙述装置方面的书籍可供借鉴。再加上本人水平有限，经验贫乏，时间又短促，因此本教材中错误与不适之处必然难免，也有可能抓次漏主，诚恳地希望大家批评指正。

本教材的全部插图由冯秋萍同志帮助完成，在此表示谢意。

承蒙学部委员李整武和项志遴、杨衍明、陈春先、金尚宪等教授对本教材的审阅，在此表示谢意。

在81届研究生的教学实践中，已增补了部分新内容，但由于时间关系，本次印刷仍按80年原稿排印。

金 钟 声

1982年3月底

目 录

前言	(1)
第一章 受控热核聚变实验装置基础知识	(1)
§ 1—1 受控热核聚变与未来的能源	(1)
§ 1—2 热核等离子体及其特征量	(3)
§ 1—3 核聚变反应	(7)
§ 1—4 实现受控热核聚变的条件及其措施	(13)
§ 1—5 实验装置的分类	(19)
§ 1—6 受控热核聚变实验装置的发展现状	(20)
§ 1—7 受控聚变研究的现状及展望	(21)
第二章 托卡马克装置的基本原理与结构	(26)
§ 2—1 发展概况	(26)
§ 2—2 基本原理	(30)
1. 磁场形态	(30)
2. 等离子体在环形螺旋磁场中的约束	(32)
3. 等离子体的平衡	(35)
4. 等离子体的稳定性	(40)
5. 环形等离子体的新经典扩散与热导	(43)
6. 能量平衡	(48)
7. 非圆截面等离子体	(51)
§ 2—3 托卡马克装置的结构与主要部件	(54)
一、变压器	(54)
1. 铁芯脉冲变压器	(56)
2. 空芯变压器	(57)
二、纵场线圈	(61)
三、真空室及抽、充气系统	(64)
四、铜壳和垂直场	(65)
五、控制系统与测量系统	(65)
六、辅助加热系统和冷却系统	(66)
§ 2—4 托卡马克装置的参数选择与定标定律	(66)
1. 托卡马克装置的經驗定标定律	(66)
2. 基本参数的选择和工程问题的考虑	(70)
§ 2—5 托卡马克装置的运行与调试	(75)

1、放电特性实验	(75)
2、杂散场对托卡马克放电特性的影响	(79)
一、杂散场的定义	(79)
二、杂散场的来源	(79)
A. 均匀垂直或水平杂散场的来源	(79)
B. 螺旋型杂散场的来源	(79)
三、杂散场对托卡马克装置等离子体的影响	(79)
四、对杂散场水平的要求	(80)
五、降低杂散场的措施	(80)
3、杂质对托卡马克装置放电特性的影响	(83)
一、杂质的种类及其主要来源	(83)
二、杂质对托卡马克装置等离子体的影响	(88)
三、减少杂质的措施	(90)
四、对杂质问题进一步的理论和实验研究工作	(94)
4、辅助加热	(95)
一、中性束注入	(95)
二、波加热	(97)
三、绝热压缩	(98)
四、湍流加热	(100)
五、离子和电子束注入	(100)
§ 2—6 托卡马克装置实验和理论上的进展	(101)
§ 2—7 几个主要托卡马克装置的简要介绍	(103)
(一)、一般概况	(103)
(二)、Alcator、双流器位形、T—10 装置介绍	(106)
(三)、“点火”装置	(114)
§ 2—8 当前托卡马克研究的主要任务、发展趋向与存在的问题	(118)
第三章 仿星器装置的发展概况	(122)
§ 3—1 仿星器装置的发展概况	(122)
§ 3—2 仿星器装置的基本原理	(127)
1、等离子体的约束	(127)
2、等离子体的平衡和稳定性	(137)
3、等离子体的产生和加热	(139)
4、仿星器的结构及其主要部件	(140)
5、仿星器与托卡马克的比较	(143)
§ 3—3 仿星器装置的研究现状	(144)
§ 3—4 简单介绍几个装置	(149)
(1) “ураган” 装置的实验结果	(149)
(2) 仿星器 Wendelstein-VII	(151)

(3) Cleo 仿星器装置	(153)
(4) “凌云”装置	(154)
§ 3—5 仿星器的目前水平、存在问题及其发展趋势	(156)
第四章 磁镜装置概况	(160)
§ 4—1 基本原理	(160)
1、磁镜装置等离子体的约束原理	(160)
2、磁镜装置的磁场形态	(164)
3、等离子体的产生和加热	(171)
4、等离子体的稳定性	(176)
5、磁镜磁场形态的特点	(178)
§ 4—2 磁镜装置的主要物理问题	(178)
1、定标定律	(178)
2、磁镜装置的起动问题	(179)
3、稳态问题与几何定标	(179)
4、改善功率平衡——提高 Q 值的问题	(180)
§ 4—3 磁镜装置的新概念	(182)
1、场反向磁镜	(182)
2、串联磁镜	(184)
3、多级磁镜	(185)
4、非对称多级镜和非绝热磁镜	(186)
5、环链磁镜	(187)
6、几个新设想	(192)
§ 4—4 磁镜装置的发展概况、现状及其发展趋势	(192)
§ 4—5 简介几个磁镜装置	(202)
1、2X—ⅡB 装置	(202)
2、BB—Ⅰ装置	(204)
3、大型磁镜聚变实验装置——MX 装置	(205)
4、聚变工程研究装置 (FERF)	(207)
§ 4—6 磁镜装置目前的水平、存在的问题及其展望	(209)

第一章 受控热核反应实验装置基础知识

§ 1—1 受控热核反应与未来的能源

人类的生存和社会的发展都离不开能源。人们在不断地认识世界和改造世界的伟大斗争中，也在不断地研究、发掘和利用新的能源，以适应人类生活和社会发展的需要。

目前作为动力的能源有风力、水力，也已开始利用地热、太阳能和核裂变能，但主要仍以煤、石油、天然气等矿物燃料作为动力能源。随着生产的迅速发展和生活水平的不断提高，人类对能量的需求量越来越大。如美国每人平均所需的能量是印度人的 50 倍。大家知道，发展中国家的人口占世界总人口的 2/3，近些年来，发展中国家工农业发展迅速，生活不断提高。所以对能量的需要，就世界范围来说，将会迅猛增加。据估计，在未来的 10 年中，人类对能量的需要将增加一倍，到 2000 年，将增加四倍。地球上煤、石油、天然气等矿物燃料的储量是有限的，据日内瓦国际和平利用原子能会议的估计，如果不采用新的能源，而仍主要以上述矿物燃料来满足人类对能量不断增长的需要，那末地球上几千万年积累起来的这些矿物燃料，在一百多年以内就会用尽（表 1—1）。另外，煤、石油、天然气等矿

表 1—1 世界主要能源储量表（单位 $Q = 3 \times 10^{14}$ 千瓦·小时）

		已找到储量	估计可找到储量	可供使用年限
矿物燃料	煤	18.9	400	(根据1975年的估计耗能量和已找到的储量计算出来) ~100
	石油	1.7	23	
	天然气	1.9	3.2	
	共 计	23	453	
裂变核燃料	富 矿	490		~2500
	贫 矿	1.6×10^6	5×10^6	8×10^6
聚变核燃料	氘	7.5×10^9	7.5×10^9	3.8×10^{10}
	锂 ⁶	6×10^6	6×10^6	3×10^7

物燃料中含有很多宝贵的成份，直接燃烧以生产电能也是很经济的。这就促使人们去开辟能源利用的新途径，寻找新能源。

从五十年代中期开始，部分国家建造了原子能发电站（裂变电站），这当然能弥补一些矿物燃料的不足。但是原子能发电站所用的裂变核燃料，其储量也有限。而且富矿储量少，贫矿浓缩价格昂贵。据估计，裂变燃料也只能供人类使用二千多年。此外，这种以重元素裂变为基础的原子能发电站还有一个很大的缺点，这就是其燃料的燃烧“废物”具有很强的放射

性，处理起来比较麻烦，对环境污染也很严重。因此，这也不是理想的能源。

经过进一步的探索研究，人们找到了实现受控热核反应的途径。这种以轻元素的聚合为基础的聚变能源，具有如下一些优点：

1. 每单位质量燃料放出的能量大。石油燃烧时，每单位质量放出约为 $(4-5) \times 10^4$ 焦耳/克。煤燃烧时，每单位质量放出的能量为 3.3×10^4 焦耳/克。在裂变过程中，每单位质量放出的能量为 8.2×10^{10} 焦耳/克。而在聚变反应过程中，每单位质量放出的能量为 $(2-3) \times 10^{11}$ 焦耳/克。这就是说，燃烧单位聚变物质所放出的能量，要比燃烧单位化学燃料所放出的能量大几百万倍，也要比燃烧能量较集中的单位裂变物质大 3—4 倍。因此，聚变发电就没有矿物燃料发电那样的大量运输问题。

2. 储量丰富，这是最突出的优点。聚变物质氘是氢的同位素，约占氢的 $1/6700$ （原子数），故每升海水中约含氘 0.03 克，完全燃烧后可产生 $(2.4-10.5) \times 10^9$ 焦耳的能量，即大约相当于燃烧 100—300 升汽油所放出的能量。地球上海水是取之不尽，用之不竭，而且从海水中提取氘的成本也比较低。聚变物质氚在自然界虽没有天然存在，但地球上能产生氚反应的物质锂的含量却很丰富。因为聚变燃料可以从海洋（水）里提取，因此不会受到自然条件与别国的限制。

3. 聚变堆和裂变堆相比，聚变堆比较安全。聚变堆只产生少量的寿命短的放射性产物，因而也就没有裂变电站那样大量放射性废物的处理问题和环境的污染问题。但这并不意味着，受控热核聚变装置本身不需要防护措施。因为在聚变过程中所产生的高能中子，会使周围的结构物质活化而产生放射性，同时在氘的循环过程中，也存在放射性问题。

4. 聚变堆具有固有的安全性。因为在任何时刻，热核反应装置中只有少量的聚变物质存在，所以不会象裂变装置那样有发生爆炸或其它反应失去控制的危险性。聚变装置也没有矿物燃料那样的化学燃烧产物。在冷却剂偶然损失的情况下，聚变堆也没有余热问题。聚变堆的固有安全性意味着可以将电站建在需要电力的中心，甚至建在城市中。这样，可以大大地节省电力的损耗和降低投资。

5. 聚变堆是一个高能中子源，是产生和转换元素的主要方法之一。当它与裂变堆混合使用时，可以从贫铀、天然铀及钍中增殖裂变材料。

6. 受控热核反应装置还具有直接发电，从而有抛弃投资大而效率低的热循环的可能性。

由此可见，聚变能源是一种非常理想的能源。正因为这样，目前世界上许多国家都投入相当多的人力物力致力于这方面的研究工作。在不同时期世界范围内用于磁约束的研究投资由各国分担的情况如图 1—1 所示。在 1959—69 这十年内，全世界研究总费用增加到大约每年四千万英镑。显然，美、苏居领先地位，而西欧作为一个整体则投资稍少一些。一旦受控热核动力装置建成，人类的能源问题就彻底地解决。所以有人把实现受控热核反应，说成是人类有史以来改造大自然和利用大自然的最宏伟规划之一。

我们伟大的社会主义祖国，地大物博，动力资源非常丰富。煤的蕴藏量估计占全世界的 $1/3$ 。一旦黄海与东海大陆架的油藏量大部分探明以后，我国会被认为是世界上石油资源最丰富的国家，估计蕴藏量在一百亿吨以上。天然气的生产现已居世界第五位。铀矿也不少。此外，水利的潜在能量估计到达五亿四千万千瓦，是美国全部水利资源的五倍多。我国

不会象资本主义国家那样发生能源危机。但是从动力资源的综合利用政策及长远的目标出发，国家有关部门对受控聚变能源的研究也予以相当的重视。

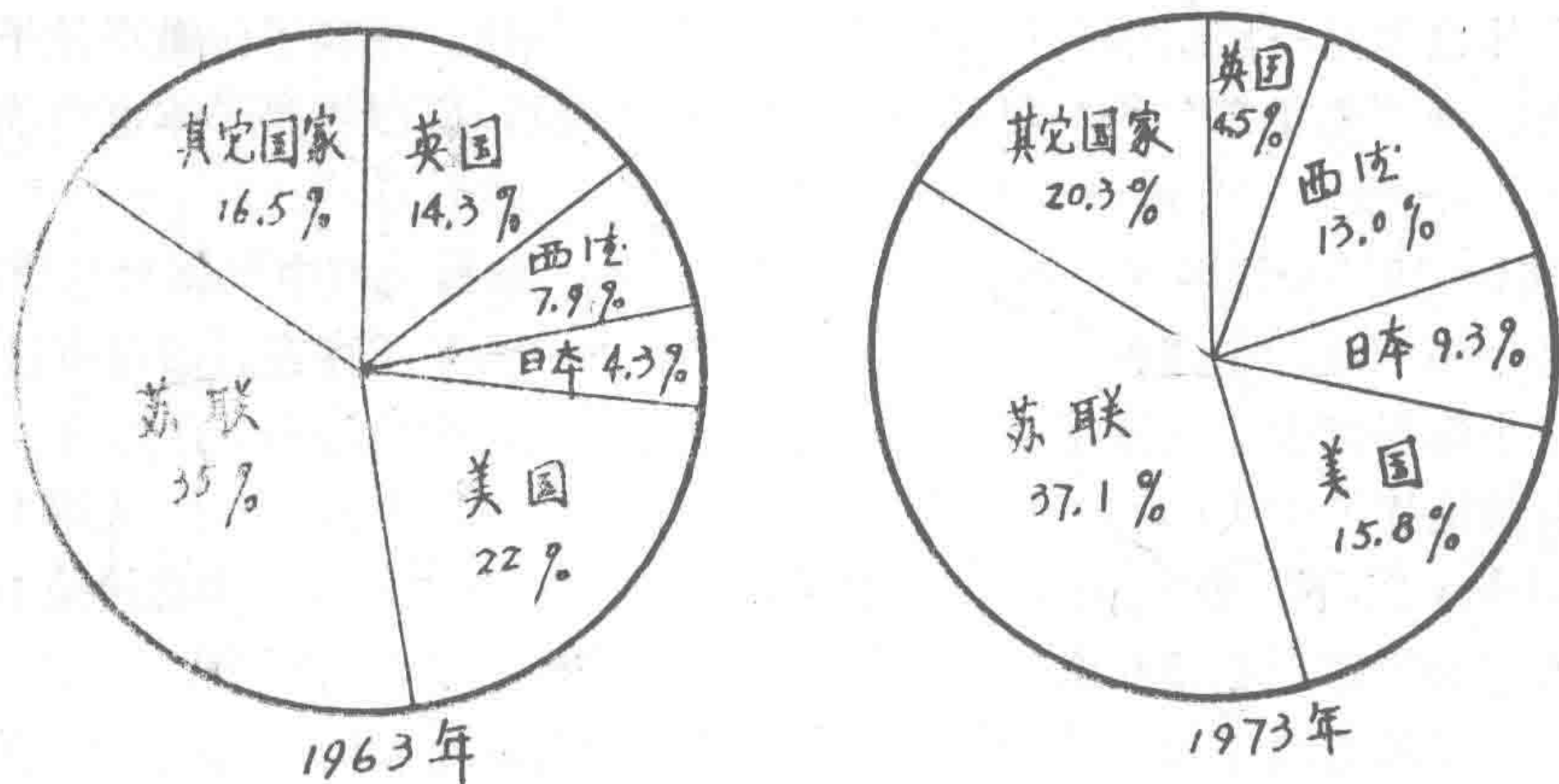


图 1—1 各国受控核聚变研究在磁约束系统上不同时期的投资情况

§ 1—2 热核等离子体及其特征量

任何一种物质因温度不同其存在状态也不同，如图 1—2 所示。固体、液体、气体即所谓物质的三态，是众所熟知的。物质到达气态以后，如果再继续从外界得到能量就会发生电离过程，出现带正电的离子和带负电的电子。当气体中的粒子有足够数量（通常只需要大于千分之一）电离以后，气体的行为就由自由离子和电子的库仑相互作用所支配，这时中性粒

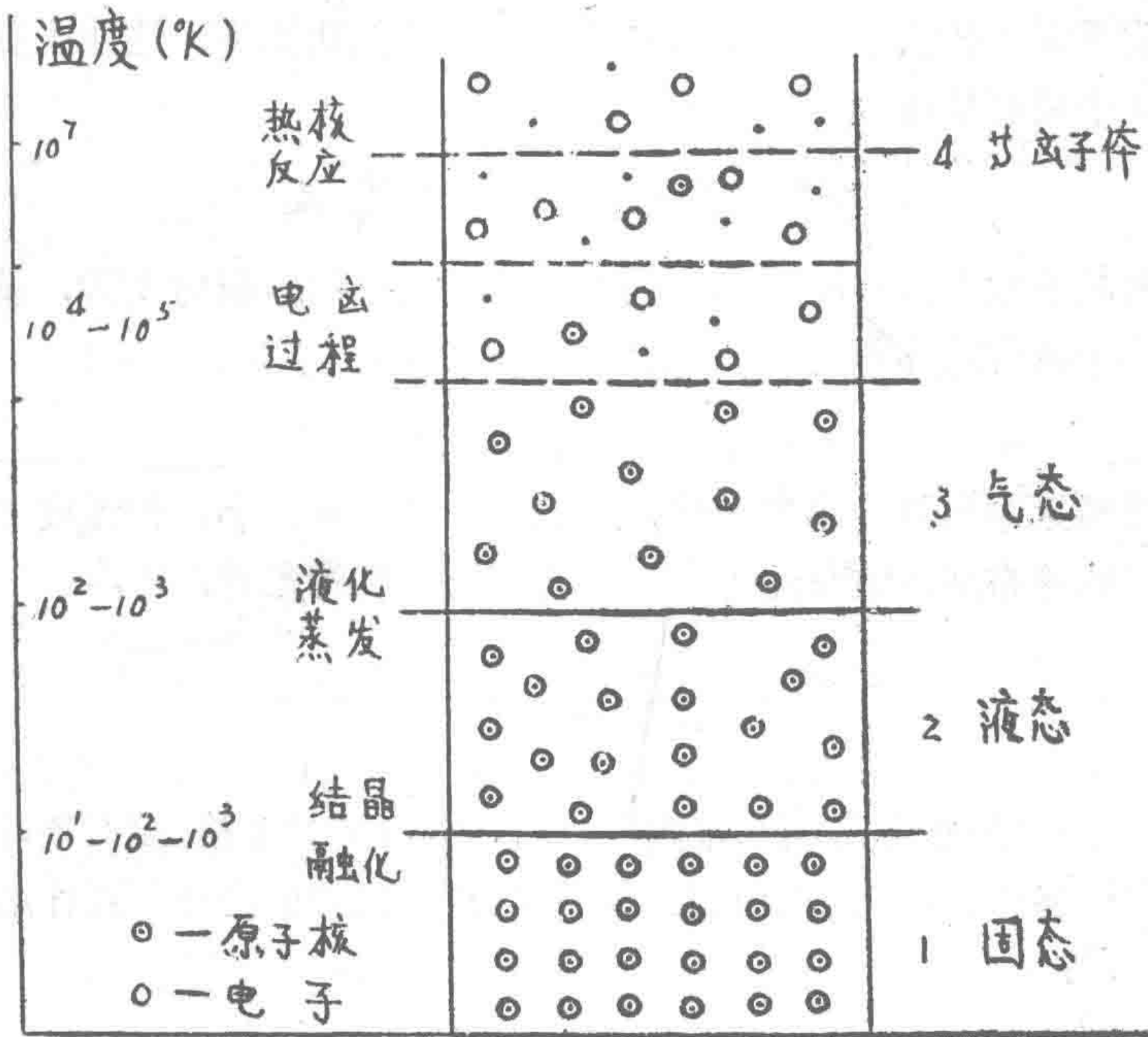


图 1—2 物质状态与温度的关系示意图

子的作用退居次要地位，整个气体能由外界电磁场加以影响，成为一种高电导率的导电流体。考虑到它是由相等数目的电子和正离子组成的一个电中性体集，所以叫做等离子体。简言之，等离子体也就是一团由带电粒子组成的高温电离气体。等离子体微观粒子之间的结合比气态更松散，从“聚集态”的次序来说，它排在第四位，所以等离子体也叫物质存在的第四态。

通常把 $10^4 - 10^5$ °K 的等离子体称为低温等离子体。象日光灯中气体放电形成的等离子体，即为低温等离子体。在这种等离子体中，还有少量中性粒子存在。当温度达到几十万度以上，中性粒子越来越少，气体完全由电子和原子核组成，就成为等离子体态。如果温度继续升高，聚变截面逐渐增大，终于产生热核反应，这就是热核等离子体。从图 1—7 可以看出，在 0.5—1 keV 以下，聚变截面 σ_F 几乎为零。因此，热核等离子体必然是 100—1000 万度以上的高温等离子体，它是从事受控热核反应工作者所要研究的对象。

为了进一步了解等离子体，并给它下一个明确的定义，需要简要的描述一下表征等离子体的参量。

(1) 宏观电中性

等离子体作为一个整体是电中性的，所以应该满足宏观电中性条件：

$$n_+ \simeq n_- \simeq n, \quad (1-1)$$

式中 n_+ 是离子数密度； n_- 是电子数密度； n 是指两者之一的数密度，其单位均为厘米⁻³。

由于电子与离子质量相差悬殊，电子的能量不容易传递给离子，所以在等离子体内部首先是各种带电粒子成分各自达到热力学平衡。因此，就有所谓电子温度 T_e 和离子温度 T_i 之分。当等离子体电子和离子两种成分相互达到热力学平衡状态以后，就有共同的温度 T 。

n 和 T 是确定等离子体状态的两个独立参量。在平衡状态下，这两个独立参量可以决定等离子体的其它几个重要特征量。

(2) 粒子间平均距离

设单位体积内粒子数为 $N = n_+ + n_-$ ，则每个粒子所占的体积为 $1/N$ 。设粒子间的平均距离为 d ，则每个粒子所占的体积为 d^3 。因此可得：

$$d = N^{-\frac{1}{3}}. \quad (1-2)$$

在受控核聚变实验装置中出现的等离子体，虽然粒子质量 m 很小，但温度 T 非常高，所以能满足等离子体粒子的德布洛依波长远远小于粒子间平均距离的条件，即：

$$\frac{h}{mv} \simeq \frac{h}{\sqrt{mkT}} \ll d, \quad (1-3)$$

式中 $h = 6.5 \times 10^{-27}$ 尔格·秒是普朗克常数； $k = 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/度是玻耳兹曼常数。这表明等离子体能应用经典理论。在热核温度下，带电粒子之间的库仑相互作用位能远远小于粒子热运动的动能，即：

$$\frac{e^2}{d} \ll kT. \quad (1-4)$$

这就意味着每个粒子几乎是完全自由的。因此，可以把等离子体看成是理想气体，它在平衡状态下的粒子分布函数就是通常的玻耳兹曼分布。

(3) 德拜 (Debye) 屏蔽长度

设想有一个离子处在坐标原点，如图 1—3 所示，因为它吸引电子排斥离子，故其周围的电子数要比离子数多些，也就是说，不是电中性。这时空间净电荷密度为： $\rho_e = e(n_i - n_e)$ 。此时，电位 U 满足泊松方程： $\nabla^2 U = -4\pi\rho_e$ 。由于离子的质量大，不易移动，故可假定 $n_i = n_0 = \text{const}$ ，而电子的空间分布为： $n_e = n_e(r)$ ，于是有： $\nabla^2 U = -4\pi e(n_0 - n_e(r))$ 。 $n_e(r)$ 服从玻耳兹曼分布： $n_e(r) = n_0 e^{eU/KT_e} \simeq n_0 \left(1 + \frac{eU}{KT_e}\right)$ ， K 为玻耳兹曼常数。于是有：

$$\nabla^2 U = 4\pi n_0 e^2 \frac{U}{KT_e} = \frac{U}{\lambda_d^2}, \text{ 由此可以得到:}$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{KT_e}{4\pi n_0 e^2}} = 6.9 \sqrt{\frac{T_e}{n_0}}, \tag{1-5}$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dU}{dr} \right) = \frac{1}{\lambda_d^2} U. \tag{1-6}$$

令 $U(r) = \frac{\phi(r)}{r}$ ，则 $\phi''(r) - \lambda_d^{-2} \phi(r) = 0$ 。

边界条件为： $\begin{cases} r \rightarrow \infty, U \rightarrow 0 \\ r \rightarrow 0, U \rightarrow \text{库仑势 } \frac{e}{r} \end{cases}$ 。

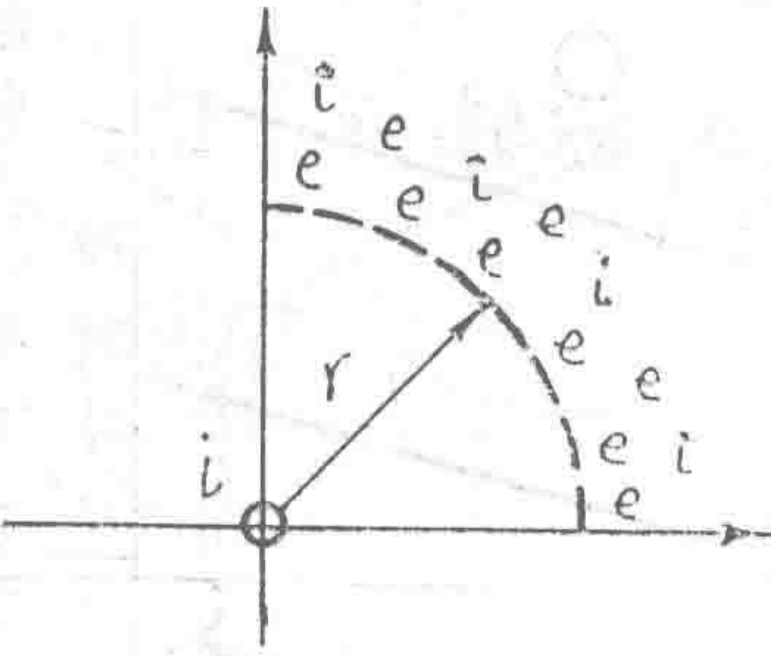


图 1—3 离子周围电荷分布

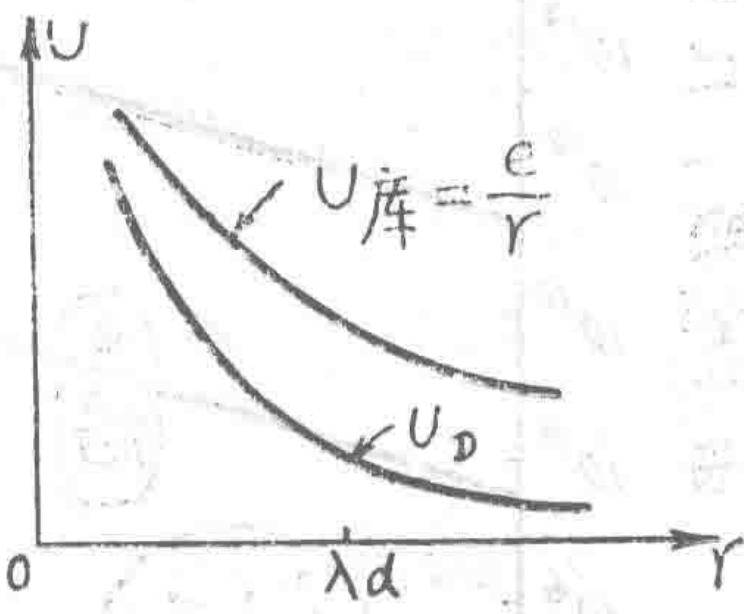


图 1—4 U 与 r 的关系

(1—6) 式的解为： $U_D = \frac{e}{r} e^{-r/\lambda_d}$ 。 U 与 r 的关系如图 1—4 所示。当 $r = \lambda_d$ 时， U_D 下降为 $U_{\text{库}}$ 的 e^{-1} 。也就是说，位于坐标原点处的离子的电场，受到周围电子的屏蔽作用而迅速下降。 λ_d 可作为一个电荷的有效作用半径来看待。在 λ_d 范围内，与电中性的偏离大，而在 λ_d 范围外，偏离小，可以近似地看成是电中性的。 λ_d 叫做德拜屏蔽半径。设所考虑的电离气体，其线度为 L ，如果能满足如下的条件：

$$\lambda_d \ll L, \tag{1-7}$$

则这种电离气体就可以认为是电中性的，就可以称为等离子体。利用德拜长度的计算公式(1—5)，对热核等离子体的 λ_d 进行计算，当 $T_e = 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$ ， $n_0 = 10^{14} \text{ 厘米}^{-3}$ 时，这相当于托卡马克装置的情况，得到 $\lambda_d = 6.9 \times 10^{-3} \text{ 厘米}$ ；当 $T_e = 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$ ， $n_0 = 10^{16} \text{ 厘米}^{-3}$ 时，这相当于 θ -收缩装置的情况，得到 $\lambda_d = 6.9 \times 10^{-4} \text{ 厘米}$ 。由此可见，对于受控热核实验装置， $\lambda_d \ll L$ 这个条件总是能满足的，所以在研究受控热核反应实验装置的等离子体问题时，总可以认为电子数与离子数相等，即 $n_e = n_i$ 以及空间净电荷密度 $\rho_e = 0$ 。

(4) 等离子体频率

等离子体的振荡是由其内部出现局部电荷分离引起的。设电荷分离的结果，在某一区域内出现电子过剩。这些过剩电子产生一个电场，迫使电子向外运动，过剩很快就消失。但运动的速度使电子不能在恢复到电中性时就停下来，结果出去的电子过多，形成正电荷过剩，产生一个反向电场，又把这些电子拉回来，电子过剩又将重新出现。这样的过程不断重演下去，就形成等离子体内部电子的集体振荡。电子振荡角频率为：

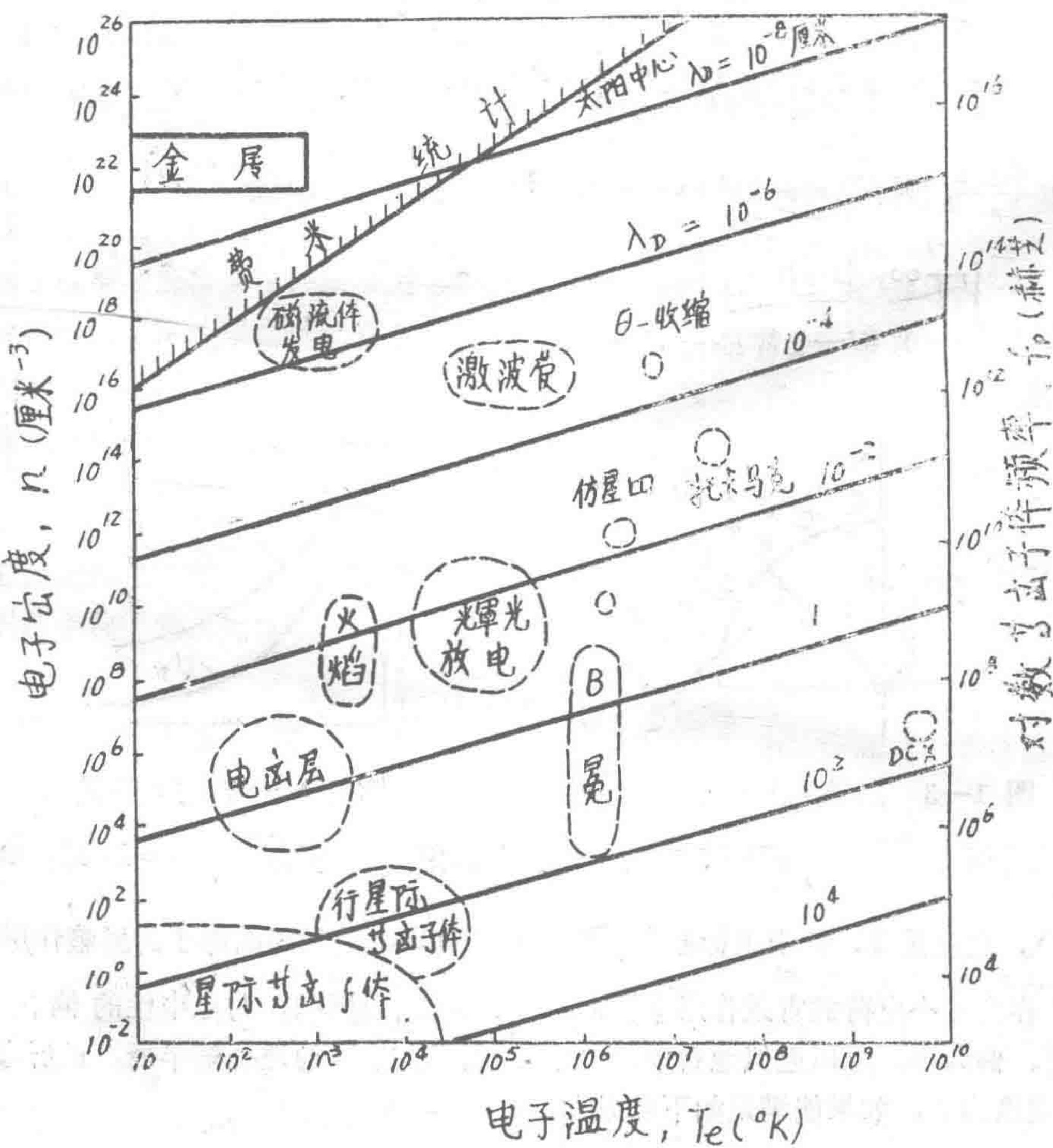


图 1—5 各种等离子体及其主要特征量

$$\omega_{pe} = \left(\frac{4\pi n e^2}{m_e} \right)^{1/2} \simeq 60(n)^{1/2} \text{ 弧度/秒}, \quad (1-8)$$

式中 n 是电子密度，以厘米⁻³计。线频率则为：

$$f_{pe} = \frac{\omega_{pe}}{2\pi} \simeq 10(n)^{1/2} \text{ 赫芝}. \quad (1-9)$$

这就是等离子体电子振荡频率。在导出这个频率时，热运动和碰撞认为可以忽略不计。离子的振荡角频率 $\omega_{pi} = \left(\frac{4\pi n e^2}{m_i} \right)^{1/2}$ ，由于 $m_i \gg m_e$ ，所以 $\omega_{pi} \ll \omega_{pe}$ 。因此，通常就把电子振

荡频率称为等离子体振荡频率，即 $\omega_p \simeq \omega_{pe}$ 。由上述公式可以看出，密度 n 越大，等离子体频率就越高，电荷分离的空间和时间尺度也就越小。所以等离子体振荡频率实际上表示了等离子体对电中性破坏反应的慢快。

最后，顺便提一下，等离子体不能认为只是电离气体。凡是包含足够数量正、负自由带电粒子而可以导电的那种物质聚集状态，都可称为等离子体。象金属和半导体是固体等离子体，电解质溶液是液体等离子体。甚至藉某种长程力而实现的粒子聚集体，如银河系，也可以称为等离子体。因此，等离子体的范围很广，其特征量的幅度极大，如图 1—5 所示。我们所研究的热核等离子体只是等离子体中的一小部分。

§ 1—3 核 聚 变 反 应

原子能利用的理论基础是原子核物理学。对原子核结构的研究得到一条结合能曲线（图 1—6）。由曲线可以看到，质量数小的轻原子核和质量数大的重原子核，其平均结合能均小

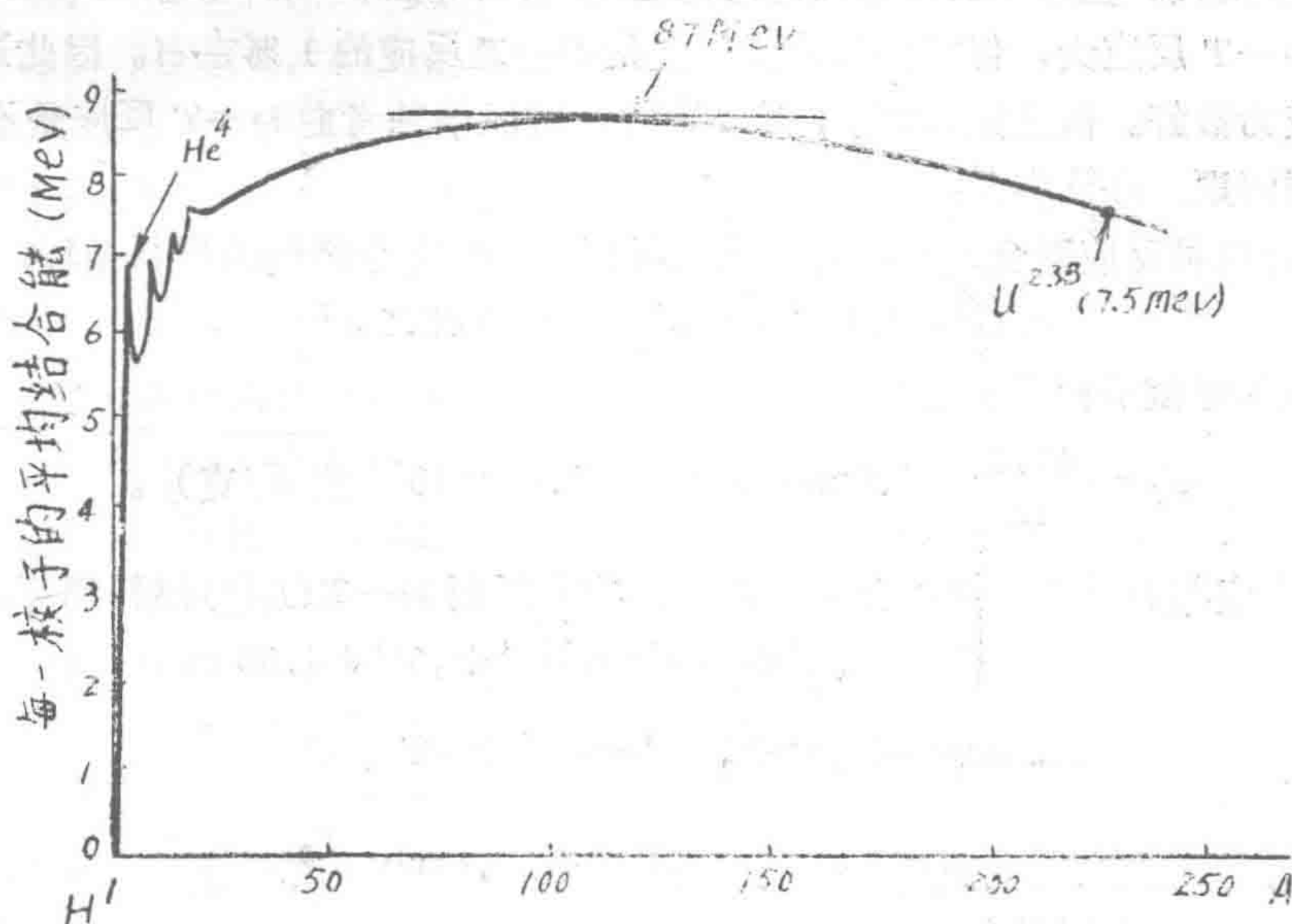
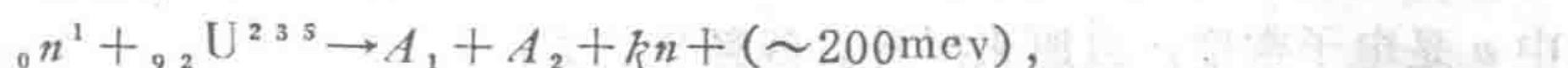


图 1—6 核内每一核子的结合能与核子总数的关系曲线

于中等质量数的原子核的平均结合能。设法使重元素分裂为较轻元素和轻元素聚合成较重元

素，均会发生能量与质量的改变。由此得出，原子能利用的途径有两：其一是使重元素，如铀、钚、钷等分裂成较轻元素，即实现所谓裂变反应：

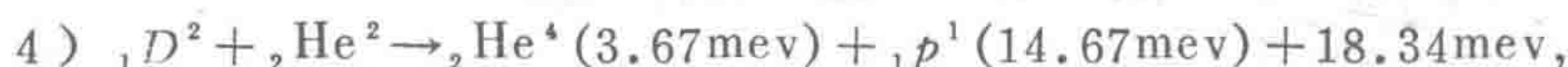
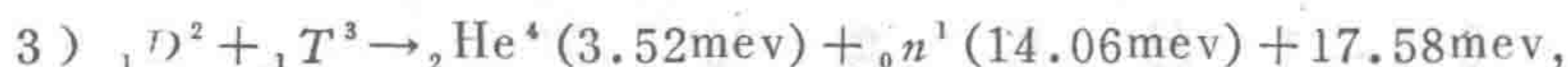
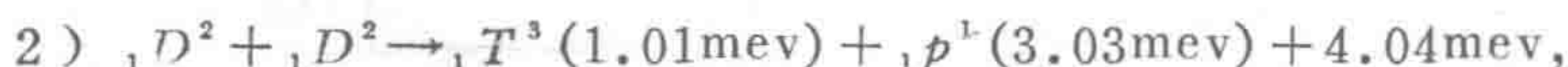
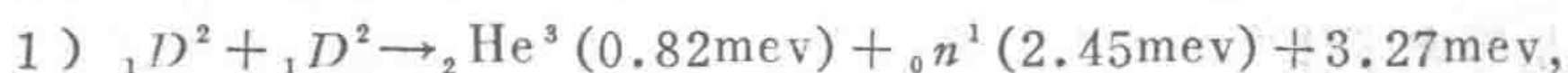


式中 n 为中子， k 为 2—3 的常数， A_1 和 A_2 为质量相近的裂变碎片，放出的能量约 200mev ($1\text{mev} = 1.6 \times 10^{-13}$ 焦耳)，来源于核子的结合能，表现在 A_1 、 A_2 和 kn 的动能上。在这个反应中，每个核子放出的能量约为：

$$\frac{200\text{mev}}{236} \simeq 0.85\text{mev/核子},$$

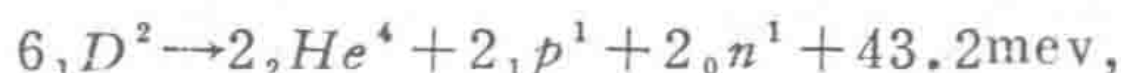
相当于 $0.85 \times 1.6 \times 10^{-13} \times 6.02 \times 10^{23} \simeq 8.2 \times 10^{10}$ 焦耳/克。原子弹爆炸时所产生的能量就是未加控制的裂变能。裂变反应堆就是受控制的裂变能源。自五十年代末期开始，原子能电站已成功地为电力系统输送电能。其二是使较轻的元素，如氢的同位素氘和氚，在一定条件下聚合成较重元素，即实现所谓聚变反应。不受控制的聚变反应（氢弹爆炸）早已实现。现在世界上有不少国家正在致力于受控核聚变反应的实现，使之成为巨大的动力能源。

聚变反应也叫热核反应。聚变反应的种类很多，从获取能量为目标的重要聚变反应有以下四种：



p 为质子。 $D-D$ 反应有两种，其反应几率大致相等。 $D-D$ 反应是重要的，因为氘 (${}_1D^2$) 的储藏量多，而且不难大量提取。 $D-T$ 反应释放的能量比 $D-D$ 反应的大三、四倍，而且反应截面 σ_{D-T} 又大。在热核反应感兴趣的温度范围内， $\sigma_{D-T} \simeq 100\sigma_{D-D}$ 。 $D-\text{He}$ 反应释放的能量虽比 $D-T$ 反应大，但它的反应截面仅是 $D-T$ 反应的 1% 左右。因此这四种反应中以 $D-T$ 反应为最好。但是氚 (${}_1T^3$) 天然不存在，所以单独考虑 $D-T$ 反应是不行的。为了解决氚的来源问题，办法有两：

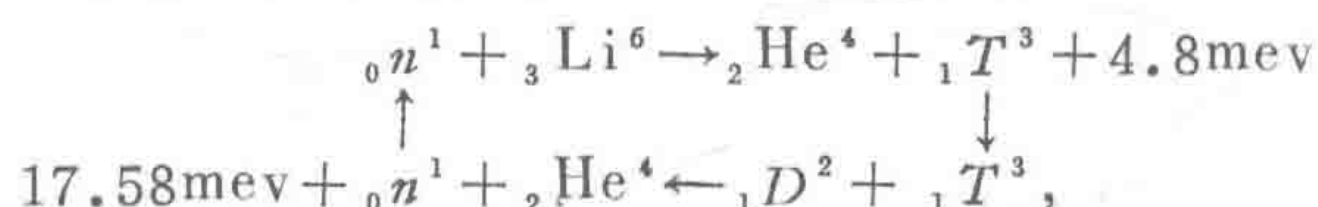
1. 把上述四种反应联合起来进行，构成所谓 $D-D$ 完全燃烧的燃料循环，即



由此释放的能量每核子相当于

$$q_f = \frac{43.2}{12} = 3.6\text{mev/核子} (\simeq 3.46 \times 10^{11} \text{ 焦耳/克}).$$

2. 裂变反应与 $D-T$ 反应联合起来进行，构成所谓 $D-T (\text{Li}^6)$ 燃料循环：



即



由此产生的能量每核子相当于

$$q_f = \frac{22.4}{8} = 2.8\text{mev/核子} (\simeq 2.68 \times 10^{11} \text{ 焦耳/克}).$$

其次， $D-T$ 反应不足之处还在于所释放的能量在带电产物和中性产物的分配上，却没有 $D-D$ 反应有利。大家知道，中子是不受磁场约束的，要离开反应器，它所带走的能量，对反应器来说是一种损失。由上述的反应式可以看到，在 $D-D$ 反应中，释放能量的 66% 左右归于带电产物，约 34% 被中子带走；而在 $D-T$ 反应中，仅有 20% 的能量归于带电产物，80% 的能量要被中子带走。

为了进一步了解核聚变反应，简要阐述一下下列几个重要物理量的基本概念。

(1) 反 应 截 面

参与反应的原子核必须具有足够的能量，并且接近到可以产生强烈相互作用的程度，才能引起某种核反应。两核接近的程度用反应截面 σ 来量度，其单位为靶恩(靶)， $1 \text{ 靶} = 10^{-28} \text{ 厘米}^2$ 。反应截面可以理解为衡量原子核发生某种反应的几率。截面越大，越容易发生反应；反之，则不易发生反应。反应截面是两个核之间相对速度的函数。核反应种类不同，截面也不同。聚变反应是带电粒子间的反应，粒子必须具有巨大的能量以克服彼此间的静电排斥力而达到相互接近，才能发生反应，所以核聚变反应截面是各种反应截面中最小的。对四种重要聚变反应截面 σ_i ，可以利用下列公式来计算：

$$\begin{cases} \sigma_{D-D} = \frac{1.55 \times 10^{-28}}{E} (e^{-31.4/\sqrt{E}}) [(E-300)^2 + 6.09 \times 10^4]^{-1}, \\ \sigma_{D-T} = \frac{4.51 \times 10^{-28}}{E} (e^{-34.4/\sqrt{E}}) [(E-48.8)^2 + 1.71 \times 10^3]^{-1}, \\ \sigma_{D-H^3} = \frac{3.33 \times 10^{-28}}{E} (e^{-6.88/\sqrt{E}}) [(E-183)^2 + 2.04 \times 10^4]^{-1}, \end{cases} \quad (1-10)$$

式中 E 的单位都是 keV。由截面与粒子能量的曲线(图1-7)可以看到，当温度小于 10keV 时， σ_i 很小。为了产生聚变，必须把等离子体加热到 $10^8 \text{ }^\circ\text{K}$ 左右 ($1 \text{ eV} = 11600^\circ\text{K}$, $10 \text{ keV} \simeq 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$)。如何把它加热到这么高的温度，是受控核聚变研究中必须解决的问题，也是现在面临的巨大困难之一。

(2) 反 应 率 及 功 率 密 度

设第一类核以 v 的相对速度连续射向作为“靶”的第二类核，如果靶核密度为 n_2 ，那末每一个第一类核在单位时间内与第二类核发生反应的次数是 $n_2 \sigma v$ 。设第一类核的密度为 n_1 ，则单位时间单位体积内核反应的次数，即反应率就等于

$$R_f = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle, \quad (1-11)$$

对于同种核的反应，则有

$$R_f = \frac{1}{2} n_i^2 \langle \sigma v \rangle, \quad (1-12)$$

式中 $\langle \sigma v \rangle$ 是对核子的速度分布求平均。在热核反应条件下，假设第一类核都具有同一温度 T 的马克斯威分布。由数值计算已经求出 σv 对马克斯威分布的平均是：

$$\langle \sigma v \rangle = \frac{A}{T^{1/3}} e^{-\frac{B}{T^{1/3}}}, \quad (1-13)$$

式中 T_i 以 keV 为单位； $\langle\sigma v\rangle$ 以 cm^3/sec 为单位； A, B 是常数，对于四种主要聚变反应的值列于表 1—2。在温度从 1 到 100keV 范围内，对 $\langle\sigma v\rangle_{D-D}$ 、 $\langle\sigma v\rangle_{D-T}$ 和 $\langle\sigma v\rangle_{D-H^3}$ 的计算数值表

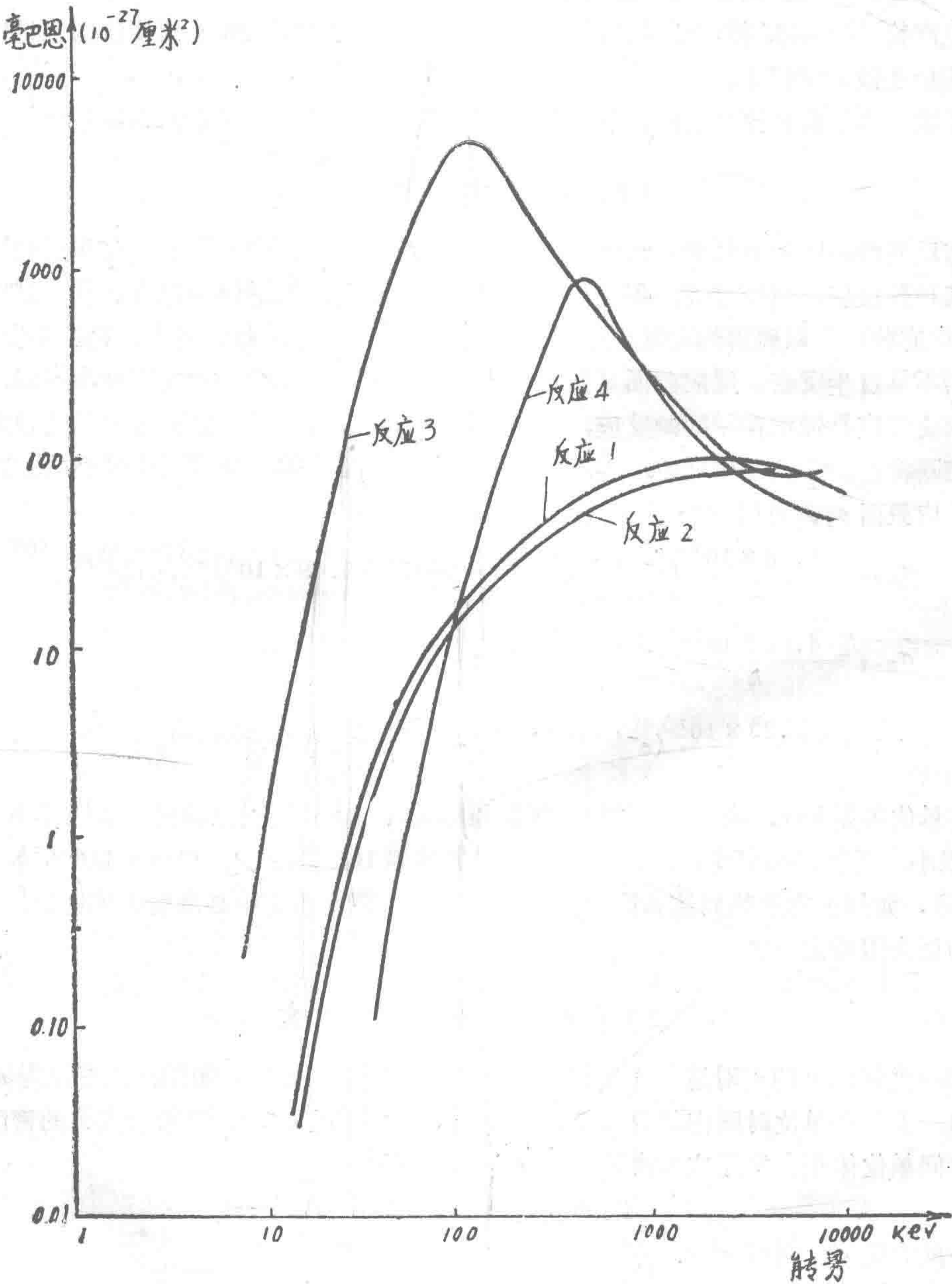


图 1—7 聚变截面 σ_i 与反应粒子氘的相对能量的依赖关系

示在图 1—8 上。从图上可以看到，在温度低于 5keV 时， $\langle\sigma v\rangle$ 的数值是很小的，也就是说反应率很低，只有温度高于几个 keV（即几千万度）时，才开始有可察觉的反应率。

反应率乘单次反应释放的能量 q_i ，就得到聚变反应功率密度

$$P_i = R_i q_i. \tag{1-14}$$

表 1—2 A 和 B 数值表

反 应	A	B
1) D—D	$\left\{ \begin{array}{l} 5.8 \times 10^{-15} \end{array} \right.$	9.15
2) D—D		
3) D—T	1.1×10^{-12}	9.72
4) D—H _e ³	1.4×10^{-12}	15.44

对于两种 D—D 反应, 平均的 $q_f = (4.04 + 3.27) / 2 = 3.65 \text{mev/反应} = 3.65 \times 1.602 \times 10^{-3} \text{焦耳/反应}$, 以此值及 (1—12)、(1—13) 代入 (1—14) 式, 得 (未考虑产物重新参与反应的贡献):

$$P_{f,D-D} = 1.7 \times 10^{-27} n_D^2 T_i^{-2/3} \exp(-9.15 T_i^{-1/3}) \text{瓦/厘米}^3. \quad (1-15)$$

由此可知, 功率密度是与粒子密度平方成正比的。与此类似地可以求得:

$$P_{f,D-T} = 3.1 \times 10^{-24} n_D n_T T_i^{-2/3} \exp(-9.72 T_i^{-1/3}) \text{瓦/厘米}^3, \quad (1-16)$$

$$P_{f,D-H_e^3} = 4.1 \times 10^{-24} n_D n_{H_e^3} T_i^{-2/3} \exp(-15.44 T_i^{-1/3}) \text{瓦/厘米}^3. \quad (1-17)$$

图 1—9 画出了 T_i 为 100keV 时 D—D 反应功率密度和 D—T 反应功率密度对氘核密度的依

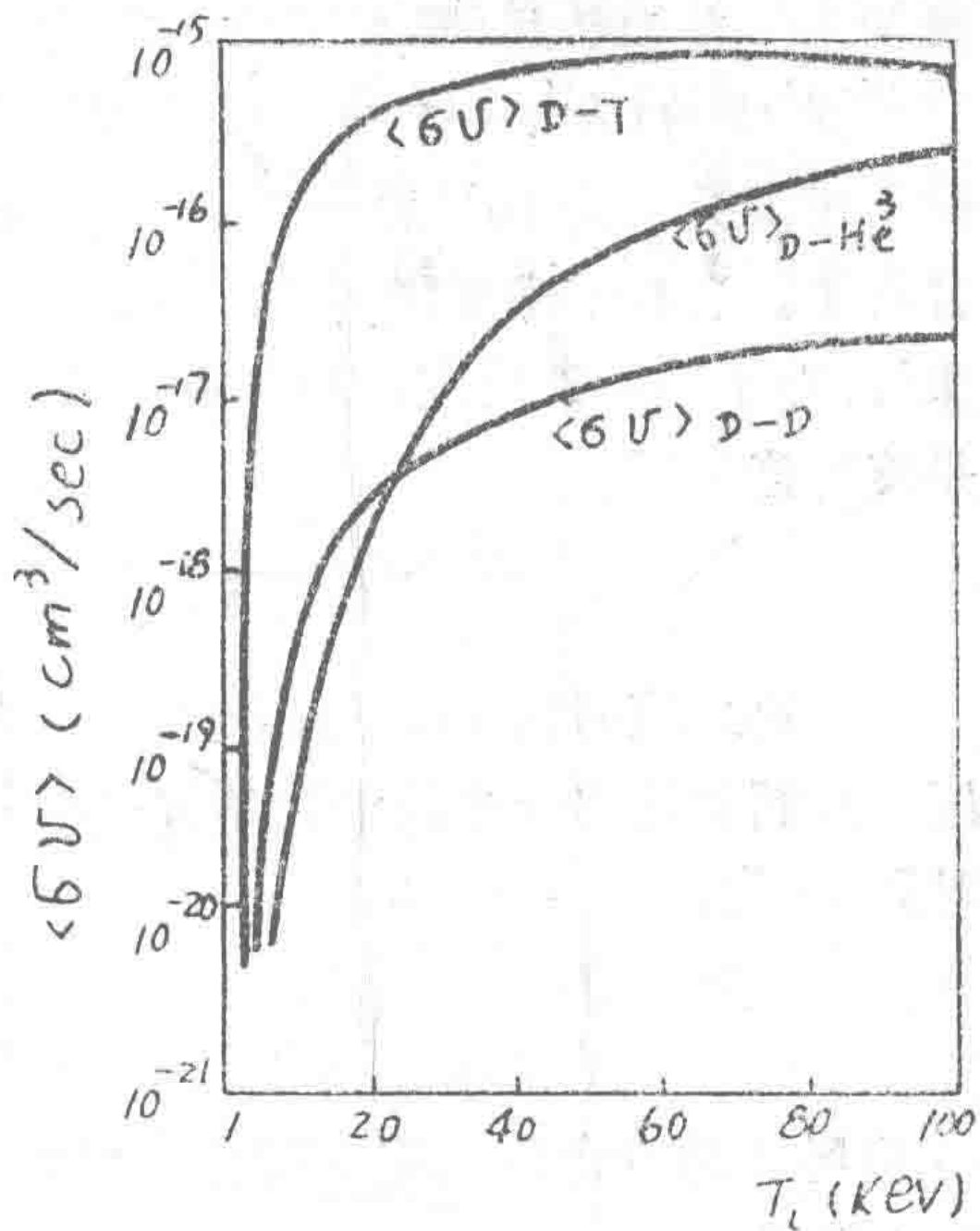


图 1—8 $\langle \sigma v \rangle$ 与 T_i 的关系曲线

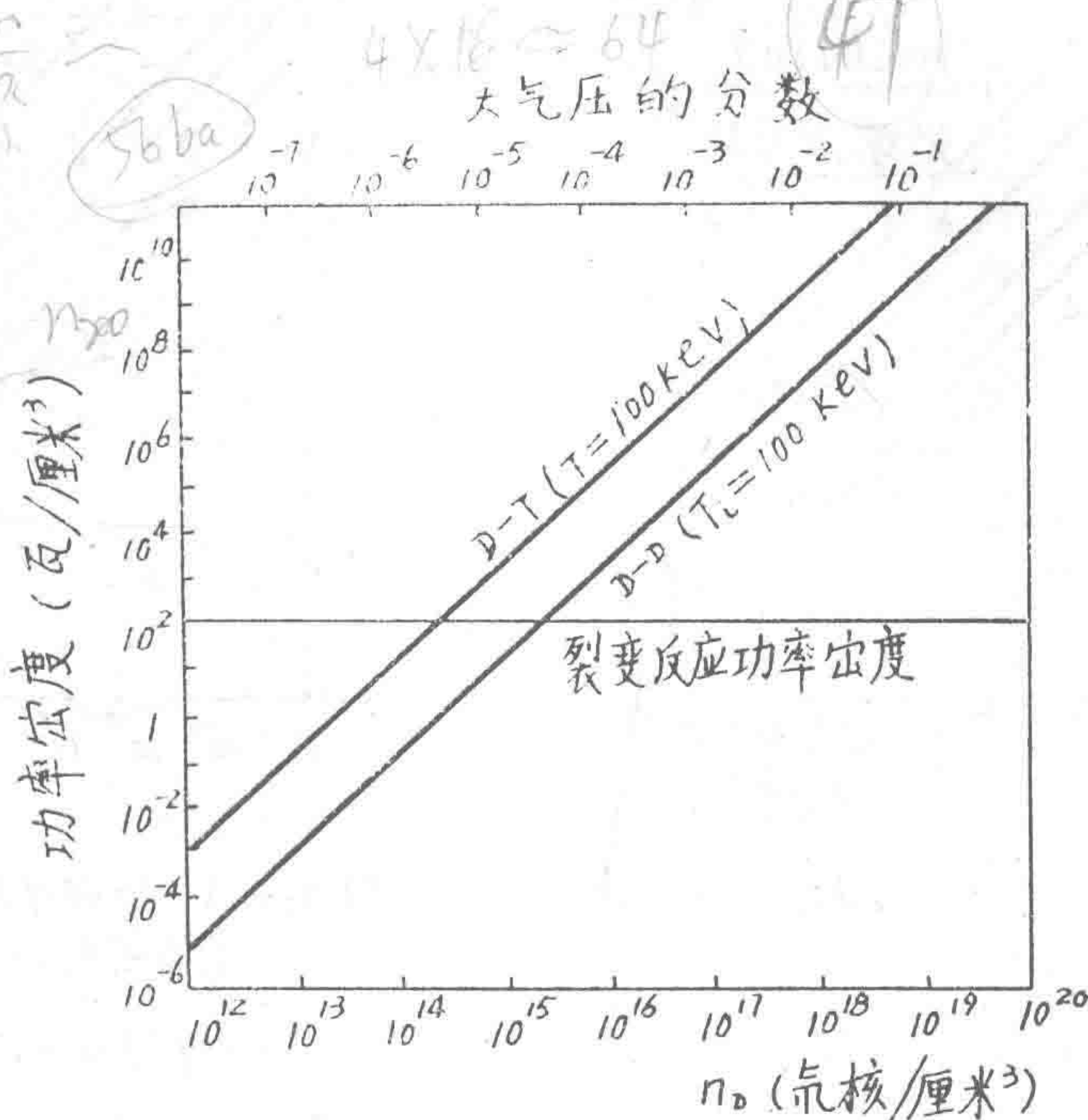


图 1—9 功率密度与氘核密度的依赖关系