

热核研究导论

A. 西 蒙

科 学 出 版 社

热核研究导论

A. 西蒙 著

郭 臻 译

科学出版社

1961

AN INTRODUCTION TO THERMONUCLEAR RESEARCH

by

ALBERT SIMON

Pergamon Press

1959

內 容 簡 介

本书是作者根据他在美国国立橡树岭实验室所作关于美国雪伍德方案的九个演讲改写而成的。书中阐明了受控热核反应的一些基本问题，首先叙述热核反应堆的原理、必要条件及基本计算，然后介绍美国为研究热核反应堆而拟定的一些装置及这些装置所存在的问题，最后还着重讨论了等离子体的稳定性及其在磁场中的扩散问题，并援引了一些近似的计算。

本书的讨论简明扼要，容易理解，适于初从事受控热核反应工作的人员参考。

热 核 研 究 导 论

A. 西蒙著

郭 臻译

科学出版社出版 (北京朝内大街117号)

北京市书刊出版业营业许可証出字第061号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

1961年8月第一版

书号：2375 字数：121,000

1961年8月第一次印刷

开本：787×1092 1/27

(京) 0001—9,000

印张：5 15/27

定价：0.62元

原 序

本书的材料是部分地基于 1955 年秋作者在美国国立橡树岭实验室所作的一系列讲演。当时橡树岭计划的规模还很小，工作局限于离子源、横越磁场的扩散和理论研究。这些讲演是为了实验室内较广泛的听众而作的；目的是把受控聚变研究的一些基本问题介绍给较大范围的希望得到有用的概念与科学知识的人们。典型的听众完全是技术人员（主要是物理学家，也有一些化学家、数学家及工程师；他们的文化水平是大学毕业或更高），讲演就是针对这个水平进行的。

这一系列讲演结束之后，许多人提出，把现有的材料写成文章是会有用的，于是，这个工作便在 1956 年夏天开始了。这个报告所包含的材料远远超出讲演的范围，它包括了在加特林布尔格会议（1956 年 6 月）所获得的某些资料，甚至于还有 1956 年秋在洛斯阿拉摩斯会议所报告的一些项目，称为“关于雪伍德方案的九个讲演”（ORNL-2285）的全部报告终于在 1956 年尾公布了。

第二届和平利用原子能国际会议期间，帕加蒙出版社（Pergamon Press）建议作者将这些讲演基本上以它们的原始形式印行，这个建议得到了作者的同意。这本册子里的材料比 ORNL-2285 改变了很多：改正了一些错误，并且为了清楚和教学上的考虑，已把前几章的陈述作了大量的修改。但是，并没有尝试把最近的材料补充进去，因为这样一项工作需时会是很长的，会把出版时间推迟数月，并且可能是部分地徒劳无功的，因为受控聚变研究的进程似乎随时间而劲头很快。在乐观情绪上升阶段之后，紧接着就是意气半消沉期。目前，由于无法控制不稳定性，收缩途径似乎处于很不利的状态，仿星器有不能解释的等离子体损失，而最有前途的高能注入装置[直流实验装置（DCX）和奥格拉（Орпа）]也还

沒有达到考驗它們的未来前景的临界阶段(燒毀)。

但是,看来这种随時間的动盪并不是无規的,因为在日内瓦首次揭露的美国与苏联的研究計劃显示了惊人地相似的随時間的发展。

無論如何,一个成功的等离子体所需要滿足的基本要求仍然沒有改变。同样,收縮效应、仿星器和磁鏡装置的基本概念也和以前一样。因此,希望这些講演仍然有用。

也許,由于这些講演在時間上切断的結果,所遺漏的最重要的項目是关于分子态离子注入裝置的資料(橡树岭的直流实验和苏联的奥格拉),哈威尔的环状管装置(ZETA),以及在普林斯頓計劃中的以螺綫場代替相当的8字形几何形态的工作。关于这些項目的文章可以在第二屆和平利用原子能国际會議文獻中找到。

作者並沒有试图把到1955年底为止的所有雪伍德方案的活動都包括进去。有些計劃几乎完全刪去了。关于各个計劃的叙述的相对权重是为作者个人的兴趣所影响的,它絲毫不意味着关于任一活动对于雪伍德方案成功的重要性的判断。

作者謹向斯必泽博士致謝,感謝他对于原始手稿 ORNL-2285 的寶貴的批評。这本冊子中的某些节基于两个报告中的資料,这就是斯必泽著的“‘启蒙’講演”(NYO-6049)和波斯特的“关于受控热核反应的十六个講演”(UCRL-4231)。这些出色的报告的影响在整个冊子中都可很明显地看出。此外,关于稳定性的一章部分是基于迈德霍恩計劃的卡耳斯腊德博士在橡树岭作的一个講演。最后,麦京博士很仔細地閱讀了最后的手稿,并提出了几个寶貴的建議,作者对他表示謝意。

目 录

原序	iii
第一章 聚变反应堆的潜在优势	1
地球上的能源	2
D-T 反应堆中氘的补充	4
氘的临界量	5
第二章 聚变反应堆所需的基本条件	7
反应截面	7
固体靶子	9
相碰束(库仑散射)	10
等离子体辐射(点燃温度)	13
磁场和粒子的密度和压强	16
约束时间	18
第三章 等离子体在均匀磁场中的行为	20
在均匀场中粒子的轨迹	20
横越磁场的扩散时间	22
热传导	26
第四章 终端的问题	28
螺旋管长度	28
环状管: 在不均匀磁场中粒子的漂移	28
其他方案	34
第五章 仿星器	35
一个没有倾斜的仿星器的性质	35
旋转与倾斜	42
对流电流和“皱褶”	46
燃料的注入和取出	50
等离子体的加热问题	52
实验仿星器模型的概况	59
一些经济上的考虑	63

第六章 磁鏡裝置與高能注入	67
磁鏡	67
穿過磁鏡的擴散損失	69
計劃中的裝置的描述	73
一些經濟上的考慮	75
高能注入	77
實驗計劃的概況	81
第七章 收縮效應裝置	84
定態收縮效應	84
收縮柱的動力學	87
扭曲型不穩定性	90
收縮柱的穩定	91
收縮效應的經濟問題	95
其他幾何形態	101
實驗計劃的總結	103
第八章 穩定性	107
平衡解	107
簡正模分析法	108
變分法	112
仿星器的穩定	115
一些零星的結果	116
第九章 橫越磁場的擴散	119
弱电离等離子体	
擴散系数	119
雙極擴散	122
有限等離子体中的擴散	127
短路	130
實驗結果	130
由於“等離子体振盪”的擴散	136
總結	137
完全电离等離子体	
一級擴散	137
同類粒子擴散	139
参考文献	141
人名對照	144

第一章

聚变反应堆的潜在优势

在人們有了用鈾及钚的裂变運轉的反应堆之后，考虑从最輕的元素的释热反应取得能量来作为动力的可能性无疑是一件很自然的事。奇怪的是，这方面的努力較裂变能的发展为迟。从历史上說，在裂变发现前許多年，人們就已經知道，存在着这一种可能的动力来源。人們知道，聚变反应是恆星的主要能源。

但是，在第二次世界大战以前，人們並沒有認真地探討利用这个能源所牵涉到的問題。这也許有一部分是由于心理的原因。当时一定是认为，在實驗室規模而不是在天文規模考虑释放核能的可能性是很荒謬的。

裂变过程的实现和从裂变释放出来的有用的中子改变了人們的看法。核能已經在地球上释放出来了。最后的一步是释放聚变能本身，例如氢弹，虽然它不是受控的。从二十世紀五十年代初期开始；一系列关于建造受控热核反应堆的设计方案的結果，产生了一个以雪伍德命名的美国原子能委员会的规划。这个领域中的一些重要研究工作正在普林斯顿、洛斯阿拉摩斯、里佛摩尔和橡树岭进行。在海軍研究實驗室和紐約大学也有較小規模的计划。

在以下几章中将叙述有关的一般性問題的要点及个别计划的詳細情况。基本問題可以最简单地归納为产生一个温度較太阳中心的温度为高的气体，并将它約束足够长的时间，以得到大量的核反应。上述研究中心当中的前三个正在各自的热核反应堆的具体方案上进行工作。橡树岭的主要任务是輔助性研究和发展，但現時正在研究一个可能的装置的设计。

地球上的能源

聚变能在地球上的能源中所占的地位肯定是一个首要问题。把帕麦尔·普特南的书中的一些数据^[1]列成表就最容易地回答了这个问题。

普特南采用了一个方便的能量单位 (Q)。1 Q 等于 10^{18} 英国热量单位。载于表 1.1 中的是普特南关于过去和将来地球上能量消耗的一些估计的结算数据, 以及他对于剩余储蓄量的估计数字。

表 1.1. 能量的消耗量

估计的消耗量	
到 1850	6 ~ 9 Q
1850 ~ 1950	4
到 2000 的总和	25
到 2050 的总和	100
目前的消耗率是每世纪 10 Q	
现有资源	
可用煤	32
油	6
	38 Q
核能	575

应当注意, 到 2000 年和 2050 年的能量消耗的估计量是根据人口的增长和每人能量的需要的增长推算出来的。

表的第二部分结算了我们行星上剩余的主要能源。这些估计只考虑了那些有经济价值的煤和油的储藏量, 其基本价格不高于目前平均价格的二倍。核燃料的总储

藏量包括铀和钍, 并假设完全燃烧。这个数字可能是普特南估计中最不可靠的。事实上, 有很多迹象说明它是一个过低的估计。因此很清楚, 目前并不迫切地需要发展聚变反应堆, 而有理由在裂变反应领域中作大规模的努力。但是, 同样清楚的是, 即使假设能达到完全增殖, 铀和钍也肯定不是无限的能源。如果地球上动力的需要较目前的水平有显著的增加, 那么, 可以想象, 在几百年中除聚变能和太阳能外, 所有其他的能源都会消耗完尽。

轻元素的聚变过程中可用的能量储藏量又是怎样的呢? 为了计算这个量, 我们来看看表 1.2 中所列的反应。以后将看到, 它们包含了聚变反应堆最可行的反应。D-D 反应产生一个中子或一个质子, 几率各约为 50%。在括号中的数字是反应产物的能量。

通过对于一个氘原子可能经历的一切反应的研究,可估计氘在燃烧中所释放的能量,即使开始时在一个反应堆中只有纯氘。反应的一个副产品氦会在 D-T 反应中用掉,另一个副产品 He^3 与氘核的

反应截面很小,因而在离开系统之前可能不燃烧。这与反应堆的具体构造有关。假如它也参与反应,能量平衡就由表 1.3 给出。

表 1.3. 能量平衡

$\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T}(1.0) + \text{p}(3.0)$
$\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{He}^3(0.8) + \text{n}(2.45)$
$\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He}^4(3.5) + \text{n}(14.1)$
$\text{D} + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4(3.6) + \text{p}(14.7)$
$6\text{D} \rightarrow 2\text{He}(7.1) + 2\text{p}(17.7) + 2\text{n}(16.55) + 1.8$

表 1.2. 聚变反应

$\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{He}^3(0.8 \text{ 兆电子伏}) + \text{n}(2.5)$
$\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T}(1.0) + \text{p}(3.0)$
$\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He}^4(3.5) + \text{n}(14.1)$
$\text{D} + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4(3.6) + \text{p}(14.7)$
$\text{T} + \text{T} \rightarrow \text{He}^4(3.8) + 2\text{n}(7.6)$
$\text{He}^3 + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4(4.3) + 2\text{p}(8.5)$

总的效果是燃烧了六个氘核。产品是两个质子,两个中子和两个 α 粒子。中子将带着它们的能量离开气体。带电粒子所得到的能量仍为气体所有,因为按理

带电粒子不会跑出去。带电粒子的能量之和被 6 除的结果表明,每个氘核给与气体的能量为 4.4 兆电子伏。同样,把中子所带走能量除以 6,就得到每个氘核还另有 2.76 兆电子伏能量的贡献。每个燃烧了的氘核所产生的总能量约为 7.2 兆电子伏。如果 D- He^3 反应不发生,则每个氘核所产生的能量仅为 4.7 兆电子伏。

用这些数字来计算在地球表面上以海水形式存在的可用能量是很有意义的。在海水中氘与氢之比为五千万分之一。很容易计算出,在 1 加仑海水中相应的能量为 10^4 千瓦小时的数量级。粗略地说,1 加仑水所含的能量相当于 300 加仑汽油。因为地球表面水的总量估计约为 10^{21} 加仑,很容易计算出海水中可用能的总量约为 $5 \times 10^{10} \text{Q}$ 。因此,如果我们能在一个受控热核反应堆中燃烧氘,地球上的动力来源问题将基本上永远地解决了。顺便提一提,

从1加仑海水中分离出氦所需的費用約为1角(美元),这个費用是完全可以忽略不計的。

除了能量来源这个理由之外,进行雪伍德工作规划至少还有三个其他的理由。首先,一个雪伍德装置可能供給比普通方法略为低廉的电力。原因是有可能将这种系統的能量輸出直接轉換为电能。在以后的叙述中可以看到,雪伍德装置中的工作流体是温度約为一亿度的完全电离的等离子体。

要找到某种办法将等离子体中电荷分离(至少到电势差等于 kT ,即 10^4 电子伏),从而实际上得到一个可以直接应用的直流电势,或許并不太困难。其他方案可能涉及利用膨胀的等离子体的感应作用。

第二个原因是竞争的刺激。大家都知道,苏联和联合王国都正在为这样的装置而工作。如果这样的装置成功的话,可以証明为一个重要的經濟、政治或心理上的成就。因此,为了国家的利益,不应当在这个研究領域内落后。

另一个并不是不重要的优点是核安全问题。一个热核反应堆可能是一个极端安全的装置,因为在一定時間內堆中的总燃料量只足以維持几秒钟的反应。此外,沒有象鈾反应堆中的那些裂变产物。但是由于在同一功率水平的中子通量較裂变的大得多,而且平均中子能量也高得多,防护将是較为困难的問題。

D-T 反应堆中氦的补充

在下一章中将要看到,原則上,在聚变反应堆中用D-T反应是最有希望的,因为它的反应截面最大。不幸的是,氦不存在于自然界中,大量的氦只能从裂变反应堆中得到。

把热核經濟和鈾經濟結合起来是不理想的。我們更希望以某种方法利用D-T反应的产物来再生氦。达到这个目的的一个可能方法是使D-T反应所产生的中子在一个鋰层中被吸收。 Li^6 中的 $n-\alpha$ 反应产生一个氦核,后者可用化学方法回收并回送到系統中。因此,这是一个中子經濟或中子增殖問題。

下面的計算指出問題的重要程度。假設 C 为裝置中轉化為氙的中子分數，則方程(1.1)給出在定態下沒有淨的氙的增加或減少的條件：

$$\begin{aligned} n_D \cdot n_T (\sigma v)_{D-T} - \frac{n_D^2}{2} (\sigma v)_{D-D} \left(\frac{1}{2} \right) = \\ = \left[\frac{n_D^2}{2} (\sigma v)_{D-D} \left(\frac{1}{2} \right) + n_D n_T (\sigma v)_{D-T} \right] C. \end{aligned} \quad (1.1)$$

左邊的第一項表示由於 D-T 反應而引起的氙的損失，第二項表示由於正在進行的 D-D 反應而引起的氙的增加。在右邊括號內的項表示在裝置中中子的產生率。可以從方程 (1.1) 得到 C 的解，它是氙與氘的濃度的比值以及 D-T 及 D-D 過程的截面的函數：

$$C = \frac{(n_T/n_D) [(\sigma v)_{D-T}/(\sigma v)_{D-D}] - \frac{1}{4}}{(n_T/n_D) [(\sigma v)_{D-T}/(\sigma v)_{D-D}] + \frac{1}{4}}. \quad (1.2)$$

下面我們將要看到，在我們有興趣的區域內，D-T 截面較 D-D 截面約大 100 倍。

從表 1.4 可以看到，必須回收的中子百分數很高，即使含有氙、氙各 50% 的混合物的反應堆，也是如此。

因此在任何 D-T 裝置中保存中子以使氙能再度循環是一個很嚴重的問題。這個問題對裝置的經濟問題、鋰層、繞組、以及屏蔽的設計是一個重要的因素。曾經考慮在吸收層中用鉍以利用 $(n, 2n)$ 反應的增殖。事實上，至少有一個設計的可以工作的熱核反應裝置具有這樣的特点：它可能實際成為一個氙的產生器^[2]——即在這個裝置中產生的氙將比消耗的多。這是對於這個裝置的總的經濟問題的又一個有利因素。

表 1.4. 氙的回收

C	% T	% D
0	0.25	99.75
0.6	1.0	99.0
0.78	2.0	98.0
0.995	50	50

氙的臨界量

自然，產生一個熱核反應堆的最簡單的方法是集合一個臨界

量的氘。这意味着我们要集合足量的氘，使表面辐射的能量小于或等于在氘中进行的热核反应所产生的能量，即使最初的温度是室温。因此系统会开始加热。当它的温度上升时，反应截面增加，可以期望这样一个装置的温度会自动地提高到一个合理的工作温度。

精确地计算这个临界值是很复杂的。让我们进行下列非常简化了的计算。在定态时，一半径为 r ，温度为 T 的不透明等温氘球中的黑体辐射及能量产生间的能量平衡式为

$$4\pi r^2 \sigma T^4 = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{n^2}{2} (\sigma \nu)_{D-D} E, \quad (1.3)^*$$

E 代表由于两个氘核燃烧所释放出来的能量，它约等于 14 兆电子伏； n 是原子密度， $(\sigma \nu)_{D-D}$ 是 D-D 反应的反应率。从这个方程可以解 r ，得

$$r = \frac{6\sigma T^4}{n^2 (\sigma \nu)_{D-D} (14 \text{ 兆电子伏})}. \quad (1.4)$$

从 D-D 反应率与能量的关系（见第二章表 2.1）很容易看出， $T^4/\sigma \nu$ 在 $T=10^8 \text{ K}$ 的附近有一个极小值（1 电子伏 = $1.16 \times 10^4 \text{ K}$ ，因此 $10^8 \text{ K} \cong 10 \text{ 千电子伏}$ ）。用这个假定的温度，并用假设的合理最高密度 10^{22} 粒子/厘米³，可得半径的数值如下：

$$r \geq \frac{(6)(6 \times 10^{-5})(10^{32})}{(10^{44})(10^{-18})(2 \times 10^{-5})} = 2 \times 10^7 \text{ 厘米}. \quad (1.5)$$

因此，即使在最有利的温度和密度的条件下，氘球的大小还约为月球的半径十分之一。

自然，上面简短的计算是自相矛盾的。装置的真实温度从内沿径向很快降低，因此必需考虑到内部压强的平衡。无论如何，在更精确的分析里大约也会得到天文数字的大小。显然，这样一个系统是不实际的。

* 方程两边的 σ 不代表同一量，左方的是斯忒藩恒量，右方的是 D-D 反应的截面——译者。

第二章

聚变反应堆所需的基本条件

建成受控的聚变反应堆需要一些基本条件。这些条件可从有关的核截面及原子截面推导出来。自然，最重要的是核反应总截面本身。

反应截面

图 2.1 和 2.2 给出 D-D 及 D-T 截面。因为他们都是带电粒

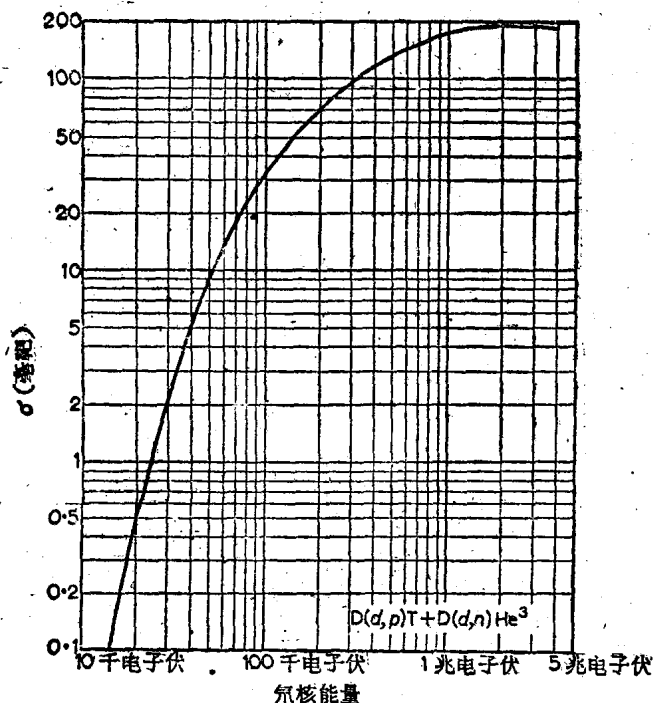


图 2.1.

子的反应,所以在低能时截面极小,接近势垒高度时,则增长得极快。低能时,截面由常用的伽莫夫因子给出:

$$\sigma \sim \frac{A}{v^2} e^{-B/v},$$

式中 A 和 B 都是恒量。

应当注意,能量为10千电子伏数量级以下的核子碰撞时,几乎没有能量产生。平均能量为这一数量级时,气体的温度约为一亿度。在考虑这样气体的性质以前,看看为什么有些较简单的方案失败了,为什么这些考虑永远导致灼热气体(或等离子体)的概念是有意义的。

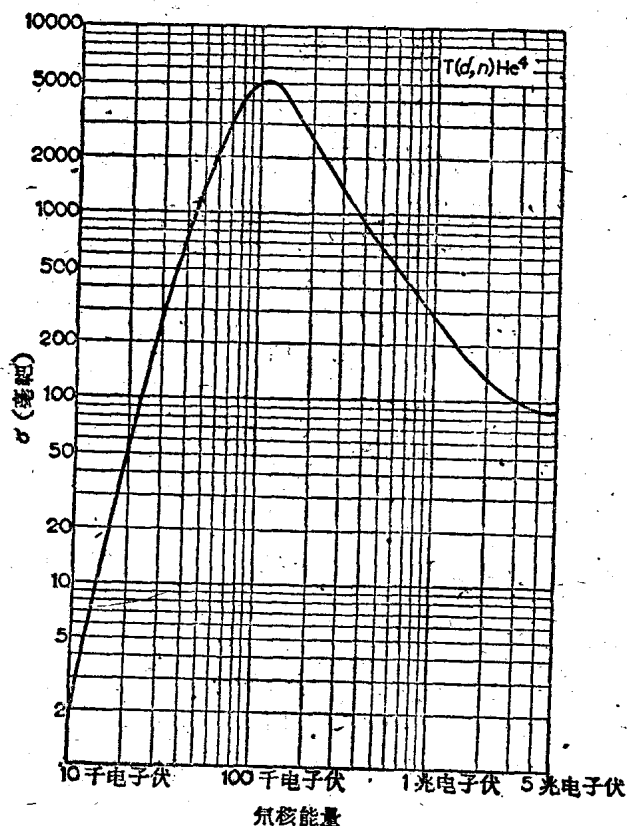


图 2.2.

固 体 靶 子

得到 D-D 反应的最明显的方法是用能量为 50 千电子伏以上的氘离子轰击固体的氘靶子。这样肯定地会发生核反应。但是，和靶子中逐渐慢化以及把其初始能量交给靶子中电子的氘核数比起来，核反应数是很少的。这个比值可以估计如下。

离子与冷电子碰撞时所损失的平均能量与质心坐标中的有效能量相近，后者是

$$E_{\text{质心}} = \frac{1}{2} m v_{\text{离子}}^2,$$

这是由于折合质量是 $mM/(m+M) \approx m$ ，而相对速度只是离子的速度（很冷的电子，即它的速度远小于离子的速度）。因此

$$E_{\text{质心}} = \frac{1}{2} \frac{m}{M} M v_{\text{离子}}^2 = \frac{m}{M} E_{\text{离子}}, \quad (2.1)$$

离子能量只有 m/M 部分损失掉。

实际的碰撞次数决定于冷电子对灼热离子的库仑散射截面，它是

$$\sigma_c \sim \left(\frac{e^2}{m v_{\text{离子}}^2} \right)^2 \quad (2.2)$$

解方程(2.1)及(2.2)，得到下面离子能量损失率的式子：

$$\frac{dE}{dt} = n_e \sigma_c v_{\text{离子}} \frac{m}{M} E_{\text{离子}} = n_e \left[\left(\frac{e^2}{m v_{\text{离子}}^2} \right)^2 \frac{m}{M} \right] v_{\text{离子}} E_{\text{离子}}, \quad (2.3)$$

这里 n_e 是固体靶子中电子的密度。方括号中的量代表一个离子丢失相当大一部分入射能量的“有效截面”。

真正在慢化前产生核反应的离子的百分数由核反应截面与“有效能量损失截面”的比值决定。在 50 千电子伏时，

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{损失}} &= \left(\frac{e^2}{m v_{\text{离子}}^2} \right)^2 \frac{m}{M} = \left(\frac{e^2}{M v_{\text{离子}}^2} \right)^2 \frac{M}{m} = \\ &= \left[\frac{(4.8 \times 10^{-10})^2}{10^5 (1.6 \times 10^{-12})} \right]^2 (3600), \end{aligned}$$

因为 $M/m \approx 3600$ ，这个截面的数值是

$$\sigma_{\text{损失}} \approx 7.5 \times 10^{-21} \text{ 厘米}^2.$$

在 50 千电子伏时 D-D 反应的截面为 10 毫靶的数量级。因此反应与能量损失的比为

$$R \cong \frac{10^{-26}}{7.5 \times 10^{-21}} \cong 10^{-6}.$$

在产生一个核反应之前，大约有 10^6 个离子由于库仑碰撞而损失它们的全部能量。以此补偿加速离子所用去的能量是远远不够的。

上面的估计实际上是太乐观的！所用的库仑截面是适用于大角度散射的。事实上，通过多次的小角度散射，离子损失能量要快得多。可以证明，这使有效截面增加约一百倍。（关于库仑散射参阅下节。）因此，每一次反应中大约有 10^8 的离子损失它们所有的能量。用较高的能量可以将这一比值改善一些。但是，能量间隙仍然是极巨大的。

怎样才能消除丢失给电子的能量呢？提高电子温度使电子的平均能量接近于离子的平均能量，显然可使这个损失率急剧地下降。不幸的是，在这个温度（约一亿度）下，固体靶子不再是固体或液体，甚至不是简单的气体。它是由离子及自由电子所组成的气体，即等离子体。因此问题在于产生和维持一个灼热的氘等离子体。

相碰束(库仑散射)

产生有用的热核反应的另一个可能方法是使两个高能氘束碰撞。如果由于空间电荷中和的原因，这些束中含有冷电子，则情况并不比以前好。假设这些电子不存在，或者它们是灼热的，那么，这会是一个现实的方法吗？至少由于两个原因，回答显然是否定的。第一个原因是弹性库仑散射与核反应过程的竞争。如在上节中所提到的，由于小角度散射的积累，偏转实际上较单一的大角度散射偏转为大。让我们来推导这个效应的式子。

考虑一个电荷为 z_1e ，质量为 M 的粒子，它在碰撞距离为 b 处掠过电荷为 z_2e 的散射中心。粒子在大约 $2b/v$ 的时间内感受到一个大小约为 $z_1z_2e^2/b^2$ 的偏转力。因此，它经受一个偏转动