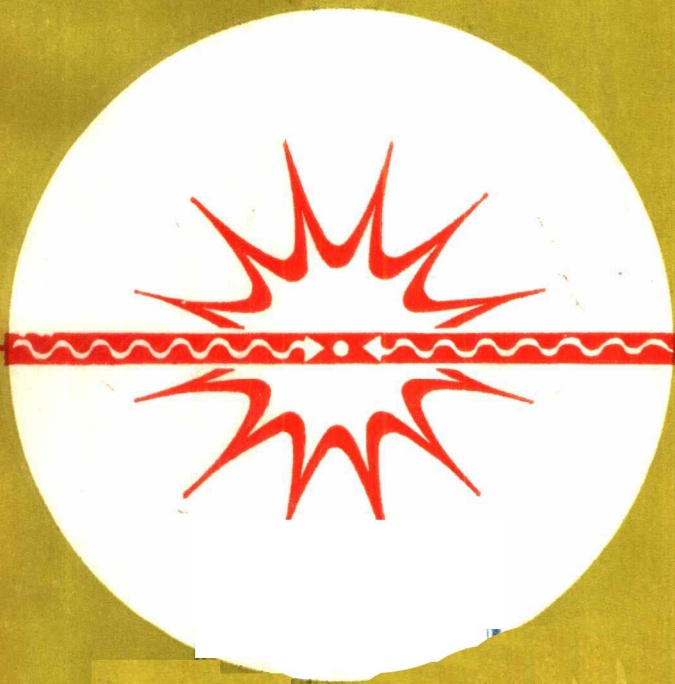


惯性约束核聚变

袁之尚



原子能出版社

惯性约束核聚变

袁之尚

内 容 简 介

本书较为全面地介绍了受控核聚变的一种新方法——惯性约束聚变。

全书分为四大部分。首先介绍核能和受控核聚变的一般知识，然后重点说明惯性约束聚变的基本原理、特点及其独特的军事价值，惯性约束聚变的主要研究课题以及它的研究和发展现状等。

本书可供具有中等文化水平的青年、科技人员、教师和干部阅读，也可供从事惯性约束聚变研究的读者作为入门读物或参考。

惯性约束核聚变

袁之尚

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $2 \frac{2}{4}$ ·字数 63千字

1984年11月第一版·1984年11月第一次印刷

印数 1—2100·统一书号：15175·542

定价：0.39元

序

能源科学是当代科学技术的重大课题之一，对于解决人类未来的能源问题，受控核聚变则是人们追求的一个非常重要的目标。

受控核聚变的传统方法是磁约束聚变，惯性约束聚变是后起的一种新方法。与磁约束方法相比，它具有设备简单、经济和灵活等优点，而且它还可以模拟热核爆炸因而具有独特的军事价值，所以引起了人们广泛的关注。

惯性约束聚变研究的真正历史只不过十几年，但研究工作进展迅速、成绩卓著，现在它也已将受控核聚变的初期目标——能量得失相当实验提上了日程。

现在世界上许多国家都在积极地研究惯性约束聚变，我国已有几个研究所加入了这一行列，并已取得了一些可喜的成绩。

本书的目的在于使广大关心受控核聚变的读者对惯性约束聚变有一个通俗而比较全面的了解。从事这项研究工作的同志也可把它作为一个入门的读物。我希望通过它的介绍能有更多的人来关心这一新课题；希望研究惯性约束聚变的同志们有强烈的责任感与事业心；同时还希望有关方面的领导能给予大力的支持。在工作安排上，既要有所分工，又要通力协作。只要大家团结一致、努力工作，我们就能尽快地将这一具有重要意义的研究项目搞上去。

王淦昌

一九八二年五月一日

目 录

一、受控核聚变的基本原理	1
原子核和核能.....	2
受控核聚变研究的意义.....	6
最理想的能源.....	9
实现受控核聚变的途径.....	11
高温和劳逊判据.....	15
二、惯性约束聚变登上了舞台	19
什么是惯性约束聚变.....	19
微型氢弹的爆炸——受控的惯性约束聚变.....	22
靶丸的聚爆.....	24
各种驱动手段和它们的比较.....	28
束流的参数和条件.....	33
惯性约束与磁约束的比较.....	36
惯性约束聚变的独特军事价值.....	39
三、惯性约束聚变研究的主要课题	41
驱动器的研制.....	43
束流与靶物质相互作用的研究.....	55
靶丸的设计与制造.....	59
惯性约束聚变研究的计算机模拟.....	63
惯性约束聚变的诊断.....	65
惯性约束聚变反应堆的初步设想.....	67
聚变-裂变混合堆.....	72
四、惯性约束聚变研究的现状和展望	75

一、受控核聚变的基本原理

本世纪初，物理学取得的一项杰出成就就是人类揭示了原子核的组成和原子核能的秘密。这一伟大成就，不仅意味着人类对客观世界的认识产生了一次质的飞跃，而且还必将对人类的未来产生深远的影响。

原子核能简称为核能（习惯上又叫做原子能），它蕴藏在原子核那个小小的王国之中，一旦释放出来，其威力很大，目前还没有哪一种常规能源能与之匹敌。自从核能发现以来，人们进行了大量的科学实践活动，目的就在于开发这种强大的能源，使之成为人类造福。

经过半个多世纪的努力，核能已部分地为人类所控制，即利用原子核裂变反应释放裂变能的原理，建造了核电站。现在，核能已作为一种崭新的能源加入了现有能源的行列。核发电在经济和技术上现已发展到完全成熟的阶段了，而且核电正在为人类的文明作出贡献。

核电站的出现，不能不说这是人类智慧所创造的一个奇迹。在核电站中，核裂变能是按照人们的意志缓慢地释放出来的，这就是裂变能的“受控”释放。

对于人类开发核能来说，核裂变能的应用，只不过是一场好戏的开台锣鼓，精采的场面还在后头。这出戏的高潮大概要算核能释放的另一条途径——聚变能的“受控”释放了。聚变能不仅比裂变能更为强大，而且核聚变电站比核裂变电站还将有更多的优点。现在世界上许多国家都在积极研究核聚变能的受控释放，这项研究工作被称为“受控核聚

变”。实现这一目标，人类将会得到一种取之不尽的新能源。

受控核聚变的研究已有三十年的历史了，目前虽说是晨光熹微，但距最终的目标仍有相当一段艰难曲折的路。

受控核聚变的一种年轻的方法——惯性约束聚变将是本书的重点内容，但在说明它之前，还是让我们先简单地介绍一下原子核的结构和原子核释能的基本知识、实现受控核聚变的意义以及如何实现受控核聚变等，然后再对惯性约束聚变作重点介绍。

原子核和核能

近代科学上一系列重大发现和进步，终于使人们确认了世界上的一切物质都是由极其微小的颗粒——原子——所组成的。原子的直径大约只有一亿分之一（ 10^{-8} ）厘米那样大。换句话说，一亿个原子一个接一个地排起队来也不过只有一厘米长。可是，别看原子的个儿小，它的构造却相当复杂。原子的中心有一个带正电荷的核，即原子核，核周围有带负电的电子绕着它飞快地旋转，其情形就好象太阳系中的行星绕着太阳旋转一样。在通常情况下，原子是不带电的，因

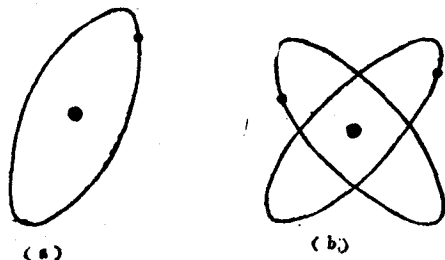


图1 原子结构示意图
(a) 氢原子，(b) 氦原子。

为原子核的正电荷与核外电子的负电荷数值正好相等，所以整个原子呈电中性。我们用图 1 来表示原子的结构，图 1 (a) 表示氢原子，图 1 (b) 表示氦原子。

原子已经是足够小的颗粒了，而原子核却更小，它的直径只有原子的十万分之一。若将原子比作一座巍峨的大厦，那么原子核只不过是大厦中的一颗小小的弹丸。因此，原子核和其周围电子之间存在着广阔的空间。

人对自然界的认识是无穷的，通过对原子核的深入研究，人们又进一步发现了它在整个原子中占有特殊的重要地位。它不但几乎集中了整个原子的质量，而且它本身又别有一番复杂的天地。极其巨大的核能就深深地蕴藏在这个非常微小但却十分不平静的世界之中。

原来，原子核是由更小的微粒——中子和质子组成，人们分别用符号 n 和 p 来代表它们。中子和质子被统称为核子。中子是不带电的，质子则带有一个单位的正电荷。不同的原子核所含的质子数和中子数是不相同的，质子数相同而中子数不同的原子核构成的元素叫同位素，它们在周期表中占据着同一个位置。例如氘 (D) 和氚 (T) 都是氢 (H) 的同位素，它们的原子核中都只含有一个质子。但氢的原子核就是一个质子 (不含中子)，而氘和氚的原子核除有一个质子外还分别含有一个中子和两个中子 (见图 2)。原子核中的质子和中子紧紧地挤在一起，它们都处于永不停息的运动状态之中。

原子核在发生变化时会放出能量，这与质子和中子在组成原子核时存在着所谓“质量亏损”现象有直接关系。按照经典理论，既然原子核由质子和中子组成，那么它的质量就应该等于组成它的质子和中子的质量之和。然而反复的精确

测量证明，每个原子核的质量总小于组成它的质子和中子的质量之和。减少的那部分质量就是“质量亏损”。这种现象用经典理论是无法解释的，可是根据相对论学说，人们找到了这个问题的明确答案。

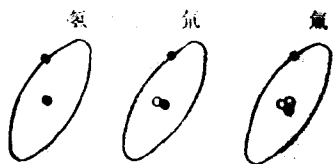


图2 氢、氦和锂的原子结构

○代表中子；●代表质子。

1905年，伟大的科学家爱因斯坦提出了一个划时代的理论，即相对论学说。这个学说突破了经典物理学的局限，使物理学发生了革命性的变化。作为相对论学说的一个推论，爱因斯坦指出，质量和能量是物质存在的两种不同形式，但它们并不彼此孤立而是密切相关的，即一定的质量相当于一定的能量，反之亦然。这就是著名的质能相当原理。它们的定量关系式即质能公式：

$$E = mc^2$$

式中 E 代表能量， m 代表质量， c 代表光速。这样一来，在一个物质系统中，如果质量发生了变化，则系统的能量必有相应的改变；反之，系统的能量若有改变，则必然伴随着质量的变化。按照质能公式计算，任何一克质量的物质都相当于 9×10^{20} 尔格的能量，这些能量可供一个一百瓦的灯泡不断地点燃近三万年！但是现在人类还不能完全地改变物质的质量使它以相应的能量形式释放出来，不过部分地改变物质的质量是可以办到的。改变的办法，以后将会讲到。

质能相当原理使原子核的“质量亏损”现象得到了完满的解释：“质量亏损”是因质子和中子在结合成原子核时以相应的能量释放出去了，它的数值可以根据“亏损”的质量

用质能公式计算出来。质量和能量这种相当关系，早已为科学实验所证实。

核子在组成原子核时放出的能量叫做原子核的“结合能”，它就是核能。原子核的结合能是非常大的。例如，质子和中子结合成4克的氦时，放出的结合能等于75万千瓦小时，这竟相当于燃烧80吨优质煤所释放的能量。人们对各种原子核的结合能进行了系统的研究，结果发现不同的原子核的结合能是不同的。为了比较在组成各种原子核时每一个核子放出的能量，科学家们引进了“平均结合能”的概念。平均结合能就是在组成原子核时每个核子平均放出的能量，它的数值等于原子核的总结合能除以原子核中的核子总数。平均结合能呈现如下的规律：最轻的一些原子核的结合能很小，而且数值波动较大；最重的一些原子核的结合能也比较小；中等质量的原子核的结合能最大。图3表示出平均结合

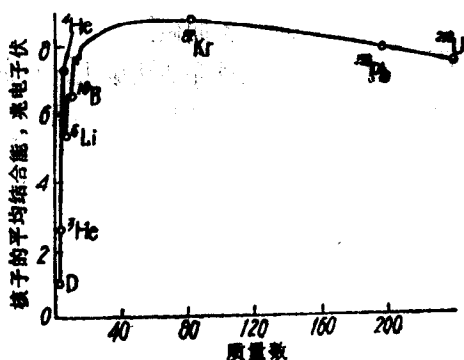


图3 平均结合能曲线

能随原子核质量数的变化关系，它就是众所周知的结合能曲

线。结合能的研究对释放核能有很重要的意义。由图中曲线看出，如果用某种办法使原子核变革或叫做使原子核发生反应，让平均结合能小的原子核变成平均结合能大的原子核，那么，多余的结合能就可以释放出来，这就是释放核能的基本原理。

原子核的放射性现象是天然的核反应并伴随核能释放的过程。不过，这种自发的放能过程速度太慢、功率太低，而且它又不受外界条件的影响，所以难于用作动力。

原子核除了自发地发生变化而放出能量外，也可实行人工核反应使核能得到释放。根据平均结合能规律，人工释放核能可利用两类核反应，它们就是得到核能的两条途径：一条是原子核的裂变反应，这是使重的原子核（如铀或钚等）分裂成为中等质量的原子核；另一条是原子核的聚变反应，这是使轻的原子核（如氘和氚等）聚合成较重的原子核（如氦）。这两类核反应，无论是哪一类都将发生质量的“亏损”并放出巨大的核能。前一类叫做原子核的裂变能，后一类叫做原子核的聚变能。聚变能是更为强大的核能。

如前所述，裂变能的受控释放已经成为活生生的现实了，但是聚变能却没有全部为人类所驾驭，尽管大规模的、急剧的聚变能释放——氢弹的爆炸早在1952年就实现了，然而其效果是造成破坏。受控的聚变能释放还没有实现，人们正在孜孜不倦地探索着。

受控核聚变研究的意义

人类社会的存在和发展，依赖于能源（燃料）的消耗。能源对于人类如同布帛菽粟一样，一时一刻也不能离开。尤

其是现代社会，能源的作用就更显得重要了，没有能源，一切工厂就不能运转，一切现代交通工具就会归于瘫痪；至于人们的日常生活，如做饭、取暖、照明及文化活动也无不需消耗大量的能量。社会实践已经表明：能源的开发和利用，已经成为衡量一个国家的经济和技术发展以及人民生活水平的一个重要标志了。不仅如此，随着社会的进步与生产力的高度发展，能源的需求量在急剧地增长，对能源的质量也提出了更高的要求。在人类的历史上，所用的能源已几经更迭，而每次更迭都大大推动生产力的发展。现在也处在一个能源利用的更迭时期。

人类最原始的能源是人力、畜力、水力、风力和柴草等，自世界进入工业化社会以来，代之而起的是第二代能源——起初是煤，后来是石油。煤和石油被统称为化石燃料。直到目前，化石燃料仍是人类的主要能源。自五十年代起，原子核的裂变能已经成为一种新的能源，不过，目前它在整个能源中的比例还是很小的。

：七十年代以来，国际上“能源危机”的呼声很高，特别是一些工业发达的国家叫得更响。对于能源问题的担忧，我们不能说那是“杞人忧天”。事实上，世界上能源短缺的问题将日益迫近。据估计，地球上的煤和石油的储存大概只能使用一、二百年的时间。核燃料铀和钍等虽然可用的时间比化石燃料要长，但储量也是有限的。人类如果不及早地开发新的能源，那么在不太远的未来，就会面临一场真正的能源危机。另外，现有的燃料给环境造成的污染也令人深为担忧。在这种形势下，寻找新的、更为理想的能源，取代传统的能源，以解决人类未来的能源问题，就成为当代科学技术要解决的一个重大课题了。在新能源的探索中，聚变能的应

用是一个令人向往的目标。如果受控核聚变能成为现实的能源，就会一劳永逸地解决人类的能源问题。受控核聚变研究的最终目的就在于此。

受控核聚变的研究已经进行多年了，实践告诉人们，受控核聚变的实现将与人类同自然斗争所实现的某些其他重大目标一样，代价与得益共存。即一方面它给人们带来极大的利益，但另一方面却又需要人们付出很大的代价。过去三十年，人们为此已经花费了大量的心血和资金，今后还需付出更艰苦的劳动。对于这一长期而艰巨的任务，在短时间内是不可能完成的。人们必须有长期奋斗的思想准备，逐步开展各项研究工作以逐步解决各种难题，同时在实践中培养出一大批从事受控核聚变研究的人材。企图临渴掘井或等到将来某一朝一夕就轻易地攻下这个堡垒是不现实的。人们现在所以投入很大的力量来研究它，这也是一个重要因素。

受控核聚变除了解决能源问题之外，还有其重要的军事目的。因为聚变反应产生的中子可以用来生产核武器所需的核燃料。一旦受控核聚变得成功，它将能在较短的时间内以较高的质量、较多的数量为一个国家制造核武器提供需要的核燃料钚和氘。正因为如此，所以它受到一些核大国军事部门的大力支持。五十年代初，一些最早开展受控核聚变研究的国家，也是以军事需要为目的的。

受控核聚变的研究还有重要的科学价值。这一课题的本身就包含等离子体物理、核物理和材料科学等重要学科，它又与天体物理、流体力学、统计物理、工程技术和辐射效应等方面的科学技术有着密切的关系，它还涉及高温、高密和强流等多种极端条件下的物理现象。因此受控核聚变研究的进展必将与其他学科相互产生重大的影响。

聚变能开发的这些重要意义是与其本身的一系列特性分不开的，这些特性决定了它在新能源的候选者中，被人们视为最理想的能源。

最理想的能源

作为人类未来长久的能源，人们渴望找到一些在地球上蕴藏量丰富、价格低廉、极少污染而又使用安全的新能源。在许多候选对象中，聚变能基本上能满足这些要求，因此人们誉之为最理想的能源。

前文说过，原子核的裂变能是一种强大的新能源，它的出现已使人类在能源问题上得到更多的自由了。不过，裂变能的潜力现在还没有充分发挥出来，在未来的一段时间里，它仍大有用武之地。但裂变能不能算作理想的能源，如果与聚变能相比，那它就相形见绌了。

首先，聚变燃料在地球上的储藏量极为丰富。

：裂变核燃料来自铀和钍，这些矿藏估计可用数百年。如果将来用增殖堆*来增殖裂变燃料，它们可使用的会更长。尽管如此，使用的时间还是有限。聚变燃料则不同，它几乎有无穷的储藏量。将来的聚变燃料是氘，而氘包含在普通水中。按质量计，它约占水的0.003%。地球表面约有70%的面积为烟波浩渺的大海所覆盖，它们总共含水约有一百四十亿亿吨，其中含氘约四十二万亿吨。一千克（约一升）海水中所含的氘若全部聚变燃烧的话，就相当于三百升汽油燃烧所放出的能量。若海水中的氘全部聚变燃烧，它们放出的能

* 增殖堆是一种将非裂变燃料转换成核燃料，从而使核燃料得到增殖的裂变反应堆。

量即使按照人类很高的能量消耗水平来计算也足够使用几十亿年之久。这对于人类来说，聚变能可谓是取之不尽、用之不竭的了。

裂变核燃料的另一缺陷是它们的价格昂贵。从世界的勘探情况看，这类资源在地球上分布很不均匀而且品位低，造成来源缺乏、开采困难。目前主要的核燃料是铀-235，它在天然铀中仅占0.7%，要想得到高浓度的铀-235，必须进行困难的同位素分离。这些都使得核燃料生产规模庞大、工艺复杂，产品价格自然高。聚变燃料的生产就比较简单。水是容易得到的，从水中提取氘既不用开矿也不需挖井，只要让水流经提炼工厂即可将它们方便而经济地提取出来。就目前的技术水平而论，提取一升水中的氘大概只需几分钱，这样的价格是相当便宜的。

第二，聚变燃料的释能本领比裂变燃料大，化石燃料更是望尘莫及。例如，一千克氘完全聚变燃烧放出能量为 3.5×10^{14} 焦耳，一千克铀完全裂变燃烧放出能量为 8.2×10^{13} 焦耳，一千克煤完全化学燃烧只能放出 3.3×10^7 焦耳的能量。三者相比，聚变燃料比裂变燃料的放能本领要大好几倍，比化石燃料的要大上百万倍。到目前为止，还没有发现任何一种燃料有这样大的放能本领。真可谓“得天独厚”。

第三，未来的聚变堆运行将比裂变堆安全。一般来说，现代的核电站有高度的安全系数，运行是安全的。研究表明，核电站的风险要比其他能源工业的风险小得多。不过由于控制操作系统失灵或人为过失致使堆芯燃料元件熔化、放射性物质外逸而污染环境事故是有可能发生的。与裂变堆不同，聚变堆将只含有少量的燃料（微克—百分之一克），而且聚变反应是靠高温来维持的，一旦系统失灵，高温条件就

不能维持，聚变反应将自动终止，因此不会发生像裂变堆那样的事故。

此外，裂变堆的运行总要产生大量的强放射性裂变产物，其中某些产物的寿命又特别长，它们在短期内是不会“死”掉的，对于它们必须进行妥善的处置，不能让它们泄漏到环境中去。聚变电站仅产生低放射性的氚，氚的寿命为12年，毒性较小。但聚变反应产生的大量中子能使物质活化，从而产生放射性物质。不过它们的放射性水平要比裂变产物的低得多。尽管如此，也要对聚变反应堆的结构材料作精心的选择，还须对它们进行必要的屏蔽防护。

聚变能的这些优点以及实现受控核聚变的美好前景在人们召唤，近年来研究工作的重大进展又令人鼓舞。然而聚变能的巨大潜力只有在克服前进道路上的种种困难之后，才能发挥出来。

实现受控核聚变的途径

在释放核能的两种途径中，受控裂变能的释放似乎没有碰到太大的困难，在五十年代初就实现了。核裂变是利用铀（或钚）的原子核在吸收中子后分裂成两块质量大致相等的核并放出2—3个中子来获得核能的。由于裂变反应能增殖中子，这些新中子又引起别的铀核分裂，于是核分裂过程像雪崩一样自持地进行下去形成“链式核反应”（见图4）。链式核反应在极短的时间内发生，同时放出大量的裂变能。

聚变反应过程则反裂变反应之道而行之。它不是使核分裂而是使核结合。例如氘和氚结合成较重的氦并放出中子（如图5所示）。可是这种核反应的发生要比裂变的发生困

难得多。受控核聚变迟迟未能实现，其内在原因就在于此。

裂变反应是由中子打入原子核使之分裂而引起的。中子不带电，它非常容易进入原子核，所以裂变易于发生。聚变反应则是两个原子核充分接近然后结合在一起形成新的原子

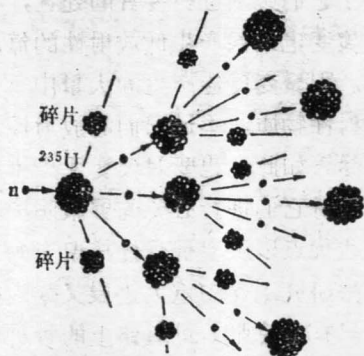


图4 链式核反应示意

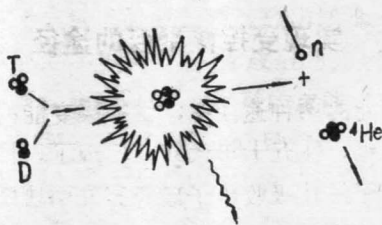


图5 氘和氚的聚变反应

核。由于原子核都带有正电荷，它们相互排斥。这种静电斥力又叫库仑位垒，它像一座山似地横挡在两个核之间阻止它们接近。那么怎样实现两个核的结合呢？通过对原子核及其变化现象的深入研究，人们发现原子核之间除了静电斥力之外还有一种强大的引力——核力。核力的特点是“短”和“强”。