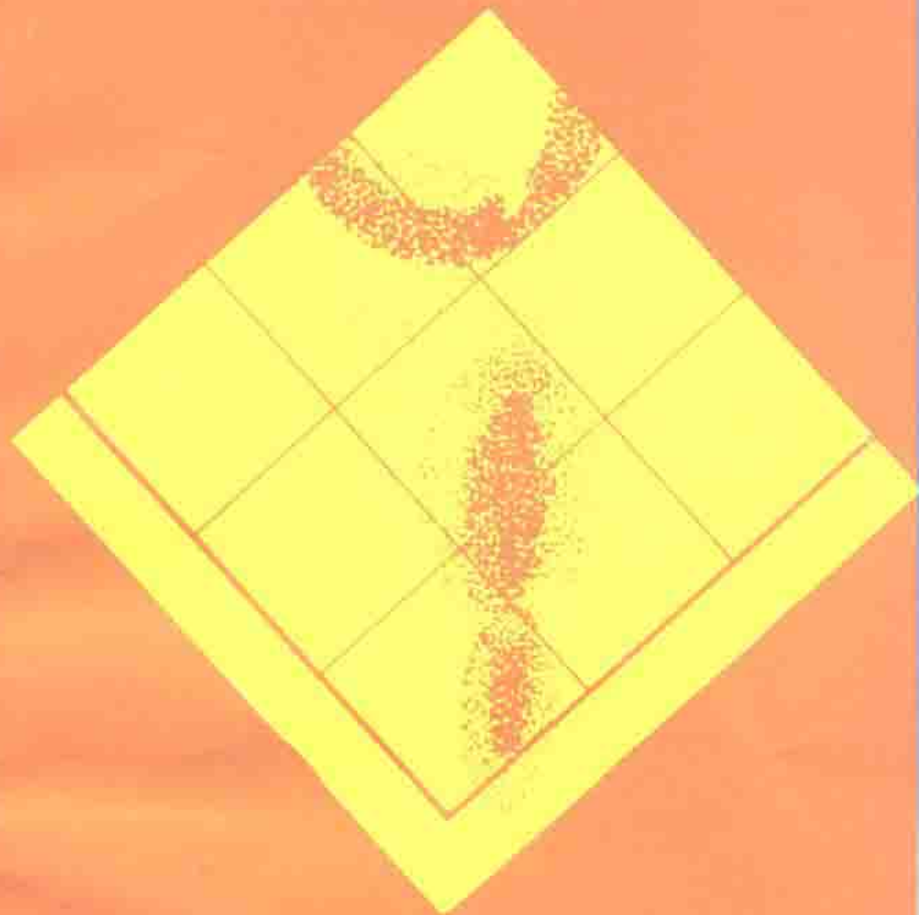


物
理
学
基
础
知
识
丛
书



胡 希 伟 编 著

受控核聚变

科 学 出 版 社

内 容 简 介

受控核聚变是当代主要的重大科研项目，世界上有好多国家都很重视它的研究。这本书用通俗的语言，生动地介绍了受控核聚变的基本原理以及人们为获得聚变能，解决人类能源问题所作的种种努力。主要内容有明日的能源；能量释放之谜；磁约束原理；磁约束装置简介；惯性约束简介和充满希望的二十年。

本书可供具有中等文化程度的广大青年、教师、科技人员和干部阅读和参考。

受 控 核 聚 变

胡希伟 编著

责任编辑 王玉生 姚平录

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981年11月第一版 开本：787×1092 1/32

1981年11月第一次印刷 印张：4 1/2

印数：0001—3,180 字数：85,000

统一书号：13031·1750

本社书号：2387·13—3

定价：0.60元

代 序

1978年8月，中国物理学会在庐山召开年会，不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的伟大作用，建议中国物理学会与科学出版社合作，编辑出版一套《物理学基础知识丛书》，有计划有系统地普及物理学的基础知识和物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此，中国物理学会理事会进行了认真讨论，积极热情地支持了这一建议，于是，就在风景绮丽的庐山，在中国物理学会和科学出版社的共同主持下，正式成立了本丛书的编委会，讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划，正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律，物质的结构及其相互作用，它是许多科学技术的基础。从本世纪开始，物理学经历了极其深刻的革命，从宏观发展到微观，从低速发展到高速，由此诞生了量子物理学和相对论，并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来，物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就，不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用，使人类掌握了新的能源；半导体科学技术的发展，导致了计算技术和自动控制系统的革命；激光的出现焕发了经典光学的青春；凝聚态物理学的发展，使人们不断创造出许多性能大大提高的材料……，因此，向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展，乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的目的，就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识，介绍物理学的最新发展，要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神，力求做到题材新颖。风格多样，勇于发表独创性、探索性的见解，以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动，深入浅出、引人入胜，以说透物理意义为主，尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中，我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励，还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、陆学善等同志的热情赞助和关怀。美国加州大学热斐尔学院院长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作，并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意。

《物理学基础知识丛书》编委会

1980年12月于北京

目 录

第一章 明日的能源	1
从钻木取火到破核取能	1
人类最理想的能源——聚变能	4
第二章 能量释放之谜	7
能量的宝库——原子和原子核	7
聚变和裂变——一对孪生姐妹	11
恒星的能源	15
一帆风顺的裂变和命运多乖的聚变	19
困难在哪里?	21
生炉子的学问——点火条件	25
聚变能的综合利用	31
第三章 磁约束原理	36
烧不坏的容器——场	36
磁场的约束本领	40
磁流体力学不稳定性和稳定三要素	53
粒子和能量是怎样跑掉的?	63
等离子体是怎样加热的?	70
第四章 磁约束装置简介	76
花样繁多的角向箍缩	76
刮目相待的磁镜	79

雄心勃勃的环流器(托卡马克).....	88
老当益壮的仿星器.....	101
第五章 惯性约束简介.....	107
烧小氢弹的内燃机.....	107
点火条件对激光的要求.....	112
压强放大器——聚爆.....	116
激光聚爆的具体过程.....	119
激光聚爆研究的现状.....	126
第六章 充满希望的二十年.....	129
点火前的检阅.....	129
新的目标——实验功率堆.....	131

第一章 明日的能源

从钻木取火到破核取能

人类的生存和发展都离不开能源。一部能源发展史也就是人类和自然作斗争的历史，一部人类社会生产力的发展史。

现在所发现的最早人类大约生活在三百五十万年之前，在这以后的漫长时代中，人类和火——这个神秘的朋友结下了不结之缘。是火帮助人类渡过了严寒的冰河时期，抵御和猎获了无数的野兽；是火改变了人类的食欲，使人类的食物更富有营养、更容易消化，因而促进了身体和大脑的发育；火还帮助人类开荒种地、冶炼金属、制造工具，开发了人类社会的最初生产力。可是火离不开燃料，而木材和植物的茎叶就成了人类最早利用的能源。从这个意义上来说，没有木材就没有人类社会的最初发展。

但是，在人类发展的好长一段时间内，人类对能源的利用和需要却没有明显的进步。当时最基本的动力首先还是人力，其次才是畜力和少量的水力、风力。封建时代的许多伟大工程，如长城、运河、宫殿、城堡都和奴隶制时期的金字塔一样，是靠人海战术来完成的。连打仗，也主要靠人多、靠体力。当然，在这段时期，人类也开发了更多的能源，如煤、石油等，

但是这些都和木材一样，它们的主要工作在于帮助人们日常生活，在生产上的巨大潜力还远远没有得到发挥。

在这期间，人类社会虽然步履艰难，但还是顽强地在前进着。科学知识和技术水平的缓慢积累终于由量变引起了质变，对人类历史起了巨大推动作用的工业革命终于在西欧首先发生了。工业革命把煤带到了一个新的广阔天地，以煤为能源的蒸气机为工业提供了巨大的动力。新的机器可以有百倍、千倍甚至于万倍于人力和畜力的力量和效率；生产的规模有了翻天覆地的变化，在工业革命以来的二、三百年中地球面貌的改变超过了以往的几千年。同时人类社会也经历了巨大的、有时甚至是很痛苦的变革，地球上没有一个角落没有感受到工业革命的冲击，凡是能勇敢地驾驭这种力量的国家和民族都迅速强大，凡是闭关自守的国家都一落千丈，沦为殖民地、半殖民地。我们古老国家的大门，也就是被工业革命的产物——火炮和快舰打开的。

二十世纪以来，随着内燃机和电力的广泛应用，人类的生产力有了更飞跃地发展，许多落后的国家也迅速走上了工业化的道路。无论在生产领域还是在生活领域，人类对能源的需求和依赖都愈来愈大，并且以前所未有的速度上升着。表 1.1 列出了世界耗能量的发展趋势，从表中可以看到人类对能源的消耗和需求是如此之大，已经使一向被认为是取之不尽的矿物能源（如煤、石油）面临枯竭的险境。例如现已查明的煤、石油……等燃料的储量约为 80Q，也就是说按表中所预计的消耗速度只够维持一百年左右了。虽然在这些资源的

估计上可能有很大的误差,但是很明显,这些传统燃料已经不再是人类的可靠能源。如果不能找到更多的非传统能源,那么人类迟早会面临一场真正的能源危机。

表 1.1 世界的耗能量(单位: Q^0)

时 期	总耗能量	平均年耗能量
—1850	0.3—0.5	
1850—1950	4	0.04
1950—2000	11	0.22
2000—2050	预计 61	1.22

幸运的是自四十年代以来,一种崭新的能源出现了,这就是原子能——确切地说是原子核的裂变能,它使所有的传统能源都相形见绌。原子能的潜力现在还没有完全发挥,但是它的巨大威力却已经无可争辩地表现了出来。裂变能源的蕴藏量要比传统能源大得多,虽然其中比较容易被利用的铀

① Q 是一个很大的能量单位

$$1Q \cong 10^{21} \text{ 焦耳} = 10^{23} \text{ 尔格}$$

焦耳是功的单位,在热力学中常用的热量单位是卡,在原子和原子核物理中常用的能量单位是电子伏(ev)。由于功和能、热之间可以互相转化,所以焦耳、卡、电子伏都可以用来表示能量。它们之间的关系是

$$1 \text{ 卡} = 4.18 \text{ 焦耳},$$

$$1 \text{ 电子伏} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦耳}$$

$$= 3.8 \times 10^{-20} \text{ 卡}。$$

电子伏在受控聚变中还往往用来表示温度。因为温度为 T 的物质,它的内能是

$$E = kT,$$

(k 是玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/K或 $k = 8.62 \times 10^{-5}$ 电子伏/K, K 表示开氏温度)。所以温度和能量之间有确定的对应关系

$$1 \text{ 电子伏} \cong 11600K \sim 1 \text{ 万度}。$$

235 (只占天然铀的 0.7%) 现有储量只够用几十年;但是铀中另外 99.3% 的铀 238 和另一种元素钍 (Th) 232 的储量却很大, 如果能全部利用起来估计够人类用一千多年 (一千多个 Q)。

这样, 人类从钻木取火发展到破核取能, 完成了从被动地依赖于自然界到主动地向自然界索取能量的成长过程。人类在自然界面前开始站立起来了!

人类最理想的能源——聚变能

但是, 原子核的裂变能并不是人类理想的能源。因为在它的利用方式上还存在许多缺点, 而且地球上裂变物质的储量相对其它元素来说并不丰富, 开采和提炼过程又十分困难, 光是裂变能并不能保障人类在可以预见的生存时期内获得足够的能源。我们必须为子孙后代寻找更方便、更安全、更丰富的能量资源。

现在已经可以有把握地说, 人类的自然科学知识和技术力量已经有可能开发一种崭新的、几乎是取之不尽用之不竭的能源——原子核的聚变能了。

原子核的聚变能和裂变能一样, 都是原子核在反应过程中放出来的一部分核子结合能, 但它不仅比传统能源而且比核裂变能威力更大!

下面是单位重量的各种燃料放出的能量①

① 煤的燃烧值取 7900 卡/公斤, 汽油的燃烧值取 12700 卡/公斤。

- 一公斤煤(燃烧): 3.3×10^7 焦耳,
- 一公斤汽油(燃烧): 5.3×10^7 焦耳,
- 一公斤铀(裂变): 8.2×10^{13} 焦耳,
- 一公斤氘(聚变): 3.5×10^{14} 焦耳。

由此可见,一公斤氘释放的聚变能量相当于四公斤铀、六千六百吨汽油、近一万吨煤。

除此之外,聚变能还有以下的显著优点。

燃料丰富 聚变所用的氘在地球上大量存在,例如一升(相当于一公斤)水中就有 0.03 克的氘,聚变后释放的能量相当于燃烧 300 升汽油!地球上约有 10^{21} 公斤的水,于是就有 10^{17} 公斤的氘,含有聚变能 $10^{11}Q$,足够供给人类用几百亿年。这不但大大超过了人类已经生存的时间(几百万年),而且超过了太阳和地球的使用寿命(四十五亿年)。因此光是氘的聚变能就几乎是取之不尽、用之不竭的。更何况随着科学技术的发展,一定还可以开发更多的元素作为聚变能源呢!

燃料的提取和保存容易 从水中提取氘的方法比提纯铀要简单得多,成本也低。和铀不同,氘没有放射性,因此保存、运输、使用都比裂变燃料要安全、方便。

污染较轻 目前裂变核电站的一个大缺点就是放射性的产物很难处理,搞不好会造成很严重的污染。但是聚变的产物却是无放射性的,热核中子造成的污染比核裂变也要轻。

比较安全 裂变核电站,特别是高温堆和快堆,由于堆芯温度很高或者反应进行得又多又快,往往很难控制,一旦出了事故就会造成很大损失,甚至引起火灾或爆炸。而聚变堆中

充入的聚变燃料很少，即使失控也不会造成严重事故或放射性物质的大量泄漏。

所以从长远来看，聚变能要比裂变能优越得多，是人类最理想的能源。聚变能的开发对人类社会的影响将是难以估计的。

聚变能为什么有这么大的威力？我们又怎样才能开发它呢？为了弄清这些问题，必须从自然界的最大秘密之一——**能量释放之谜**开始谈起！

第二章 能量释放之谜

为什么烧木头、煤、石油能够得到能量，而烧石头就得不到能量呢？

原子能是什么？它和传统能源有什么不同？为什么有那么大的威力？

聚变能和裂变能又有什么不同？为什么它的威力更大？

大自然虽然早就慷慨地给予人类各种燃料，但是却严守着能量释放的秘密。几千年来，人类一代又一代的，就像神话中的探宝英雄一样，在科学知识的深山丛林中劈荆斩棘、不畏劳苦地探索着，终于在本世纪初得到了打开能源宝库的金钥匙。这把金钥匙不是别的，就是有关原子和原子核结构的知识。没有这些知识，我们虽然也能利用煤、石油这类传统的燃料，但是想要打开原子能宝库的大门就无论如何也办不到。

能量的宝库——原子和原子核

每个中学生都知道原子和原子核，虽然它们非常小，却蕴藏着非常大的能量。

要了解其中奥秘，首先要了解原子和原子核的构成。简单地来说，原子是由电子和原子核组成的，原子核又是由中子

和质子(统称核子)组成的。但是这还不够,我们还必须知道电子和原子核是怎样结合成一体的,中子和质子又是怎样结合成一体的。

为了形象地说明其中道理,我们先来看下面这个模型(图 2.1)。

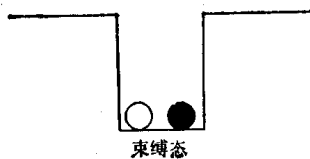
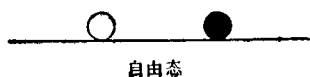


图 2.1

在一个平坦的桌子上,放二个球,它们可以分别在桌面上自由滚动,这就相当于两个粒子没有结合在一起时的状态。现在设想在桌面上有一个洞,洞下面有一个袋,当两个球都落在袋中时,它们就不能随意分开了,最多也只能在袋内运动,这就相当于两个粒子结

合成一个整体时的状态。

当然,在自然界里并没有谁去制造一个口袋,但是在电子—原子核之间的静电力和核子—核子之间的强相互作用力却能形成一个能量上的口袋——位阱,起到把这些粒子结合成一体的作用。静电位阱和核力位阱既有相同之处,又有很大不同,下面我们就分别来说明。

静电学告诉我们,一个电子在正电荷场中有位能

$$V = \frac{eq}{r},$$

r 是两者之间距离, e 、 q 分别是电子和原子核带的电量。

因为 e 和 q 总是反号,所以位能 V 总是小于零,它随 r 的变化就像一个带斜坡的无底洞(图 2.2),电子就呆在这个位能的阱

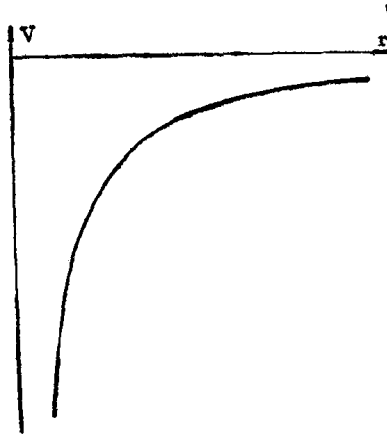


图 2.2 静电位阱

里,和原子核结合成一个原子。那么电子会不会像石头一样,沿阱壁一直滑下去,滑到和原子核相碰为止呢? 不会的,因为电子在原子中并不是静止的,它有一定的动能,而动能总是正的,正是这个动能使得电子不会被静电力吸引到原子核上去,正象地球绕太阳公转,因而不会被太阳吸引过去一样。电子的动能和它的位能 V 相加就等于电子的总能量,电子的动能愈大,总能量也就愈大,在静电位阱中离阱口就愈近,因此它离原子核的距离就愈远。电子离原子核的距离是由总能量 E 决定的。

如果我们把图 2.2 中的阱口当作 $E = 0$ 的状态,阱口以下 $E < 0$ 。这样,当电子的总能量 $E \geq 0$ 时,它和原子核就分别自由行动;只有当 $E < 0$ 时才和原子核结合成原子。 E 愈小,

阱就愈深,原子就愈稳定。这样,就可以用阱的深度 $B = 0 - E = |E|$ 来表示原子的稳定程度。 B 称为原子的结合能,它总是正的,而且它愈大原子愈稳定,所以用它来描述原子的稳定程度比用总能量 E 更方便。

同样,在核子之间也存在着吸引力——核力(也称强相互作用力),不过它的强度比静电力要大几百倍,同时力的作用范围也要比静电力小得多——只有 10^{-13} 厘米。所以,由核力构成的位阱又深又窄。我们同样可以用核子在原子核中的总能量 $E < 0$ 来解释原子核的形成,也同样可以用原子核的结合能 B 来描述它的稳定性。原子核中往往有许多核子,它们的地位大体是平等的(和原子中原子核起着核心作用不一样),因此往往引入每个核子的平均结合能 \bar{B} (总结合能除以核子数)来描述原子核的稳定性: \bar{B} 大的原子核比 \bar{B} 小的原子核稳定, \bar{B} 等于零时,原子核就瓦解了。

有了这些知识,就可以解开能量释放之谜了!

原来在木材、煤、石油这些普通燃料燃烧时,它们的分子(原子)和氧原子化合成新的分子。在形成新分子的过程中,原有原子中外层电子重新排列,引起它们总能量的改变,因而反应前后的结合能也就不一样了。在燃烧过程中,新分子要比原来的更稳定一些,即 $B_{\text{新}} > B_{\text{旧}}$, 所以反应中就放出了分子(原子)的结合能

$$\Delta B = B_{\text{新}} - B_{\text{旧}} > 0,$$

化学上把它称为化学能或燃烧热,这就是我们从燃烧中得到能量的来源。

很明显,不是所有的反应过程都有 $\Delta B > 0$,那些 $\Delta B < 0$ 的反应过程(例如烧石头)就不但不能供给能量,反而要吸收热量,这样的物质显然就不能作能源。

在原子核的反应过程中,也有类似的情况。有的原子核在反应过程中有 $\Delta \bar{B} > 0$,因此就放出核子的结合能——这就是普通说的原子能(其实叫作原子核能更确切),这样的物质就可以当能源;而那些核反应过程中 $\Delta \bar{B} \leq 0$ 的物质就不能作能源。

普通燃料与核燃料之间的差别只在于“燃烧”时放出的结合能大小相差很悬殊,这是由于静电力比核力弱得多造成的。原子外层的电子结合能一般从几个电子伏到十几个电子伏,这样所能释放出的化学能通常只有十分之几个电子伏。而核子结合能在几个兆电子伏以上,因而释放出的核能高达几个兆电子伏、乃至几十个兆电子伏。于是,在一次反应中,原子能就大约是化学能的几千万倍到一亿倍!——这就是原子能威力惊人的秘密。

聚变和裂变——一对孪生姐妹

什么样的原子核最适于作核燃料呢?按照上面所说的原理,只有那些在核反应中能放出核结合能的原子核才能当核燃料。放出的结合能 $\Delta \bar{B}$ 愈大,愈是好燃料。因为 $\Delta \bar{B} = \bar{B}_B - \bar{B}_A$,所以作为燃料的原子核其平均结合能 \bar{B}_A 愈小愈好;而反应后生成的原子核其 \bar{B}_B 愈大愈好。