



“科学的力量”科普译丛
Power of science

第二辑

一瓣太阳

——可控核聚变的寻梦之旅

[英]丹尼尔·克利里 著 石云里 主译



上海教育出版社
SHANGHAI EDUCATIONAL
PUBLISHING HOUSE

本书由上海文化发展基金会图书出版专项基金资助出版

一瓣太阳

——可控核聚变的寻梦之旅

[英]丹尼尔·克利里 著 石云里 主译



上海教育出版社
SHANGHAI EDUCATIONAL
PUBLISHING HOUSE

A PIECE OF THE SUN: THE QUEST FOR FUSION ENERGY By DANIEL CLERY

Copyright: ©2013 BY Daniel Clery

This edition arranged with Louisa Pritchard Associates and The Science Factory through BIG APPLE AGENCY, INC., LABUAN, MALAYSIA.

Simplified Chinese edition copyright:

2015 Shanghai Century Publishing Co., Ltd. Educational Publishing House

All rights reserved.

图书在版编目(CIP)数据

一瓣太阳:可控核聚变的寻梦之旅 / (英)克利里(Clery,D.)著;

石云里主译. —上海:上海教育出版社,2015.12

(“科学的力量”科普译丛)

ISBN 978-7-5444-6770-4

I. ①一… II. ①克… ②石… III. ①热核聚变—普及读物
IV.①TL64-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第301233号

“科学的力量”科普译丛

一瓣太阳

——可控核聚变的寻梦之旅

[英]丹尼尔·克利里(Daniel Clery) 著

石云里 主译

出 版 上海世纪出版股份有限公司
上海教育出版社
易文网 www.ewen.co

地 址 上海市永福路123号

邮 编 200031

发 行 上海世纪出版股份有限公司发行中心

印 刷 昆山市亭林印刷有限责任公司

开 本 890×1240 1/32 印张 8.625 插页 1

版 次 2015年12月第1版

印 次 2015年12月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5444-6770-4/N·0006

定 价 35.00元

(如发现质量问题,读者可向工厂调换)

丛书编委会

主任 方 成 卞毓麟

副主任 贾立群 王耀东

编 委 (按笔画为序)

石云里 杨利民 杨学文 李 祥

李 晟 沈明玥 林 清 徐建飞

屠又新 章琢之

“科学的力量”科普译丛(第二辑)

序

科学是技术进步和社会发展的源泉,科学改变了我们的思维意识和生活方式;同时这些变化也彰显了科学的力量。科学技术飞速发展,知识内容迅速膨胀,新兴学科不断涌现。每一项科学发现或技术发明的后面,都深深地烙下了时代的特征,蕴藏着鲜为人知的故事。

近代,科学给全世界的发展带来了巨大的进步。哥白尼的“日心说”改变了千百年来人们对地球的认识,原来地球并非宇宙的中心,人类对宇宙的认识因此而发生了第一次飞跃;牛顿的经典力学让我们意识到,原来天地两个世界遵循着相同的运动规律,促进了自然科学的革命;麦克斯韦的电磁理论,和谐地统一了电和磁两大家族;戴维的尿素合成实验,成功地连接了看似毫无关联的有机和无机两个领域……

当前,科学又处在一个无比激动人心的时代。暗物质、暗能量的研究将搞清楚宇宙究竟由什么东西组成,进而改变我们对宇宙的根本理解;干细胞的研究将为我们提供前所未有的战胜疾病的方法,给我们提供新的健康细胞以代替病变的细胞;核聚变的研究可以从根本上解决人类能源短缺的问题,而且它是最清洁、最廉价和可再生的……

以上这些前沿研究工作正是上海教育出版社推出的“‘科学的力量’科普译丛”(第二辑)所收入的部分作品要呈现给读者的。这些佳作将展现空间科学、生命科学、物质科学等领域的最新进展,以通俗易懂的语言、生动形象的例子,展示前沿科学对社会产生的巨大影响。

一瓣太阳——可控核聚变的寻梦之旅

这些佳作以独特的视角深入展现科学进步在各个方面的巨大力量,带领读者展开一次愉快的探索之旅。它将从纷繁复杂的科学技术发展史中,精心筛选有代表性的焦点或热点问题,以此为突破口,由点及面来展现科学技术对人、自然、社会的巨大作用和重要影响,让人们科学有一个客观而公正的认识。相信书中讲述的科学家在探秘道路上的悲喜故事,一定会振奋人们的精神;书中阐述的科学道理,一定会启示人们的思想;书中描绘的科学成就,一定会鼓舞读者的奋进;书中的点点滴滴,更会给人们一把把对口的钥匙,去打开一个个闪光的宝库。

科学已经改变、并将继续改变我们人类及我们赖以生存的这个世界。当然,摆在人类面前的仍有很多的不解之谜,富有好奇精神的人们,也一直没有停止探索的步伐。每一个新理论的提出、每一项新技术的应用,都使得我们离谜底更近了一步。本丛书将向读者展示,科学和技术已经产生、正在产生及将要产生的乃至有待于我们去努力探索的这些巨大变化。

感谢中科院紫金山天文台的常进研究员在这套丛书的出版过程中给予的大力支持。同时感谢上海教育出版社组织了这套精彩的丛书的出版工作。也感谢本套丛书的各位译者对原著相得益彰的翻译。

是为序。

南京大学天文与空间科学学院教授

中国科学院院士

发展中国家科学院院士

法国巴黎天文台名誉博士

方励

2015年7月

献给贝尔纳黛特
她使一切成为可能

也献给萨姆和埃伦
感谢他们无限的热情

目 录

第 1 章 为什么是聚变?	1
第 2 章 英国:托曼与箍缩装置	17
第 3 章 美国:斯皮策与仿星器	52
第 4 章 俄国:阿尔齐莫维奇和托卡马克	82
第 5 章 托卡马克异军突起	104
第 6 章 激光聚变	154
第 7 章 一个大装置	200
第 8 章 若非此时,更待何时?	230
致谢	261
译后记	264

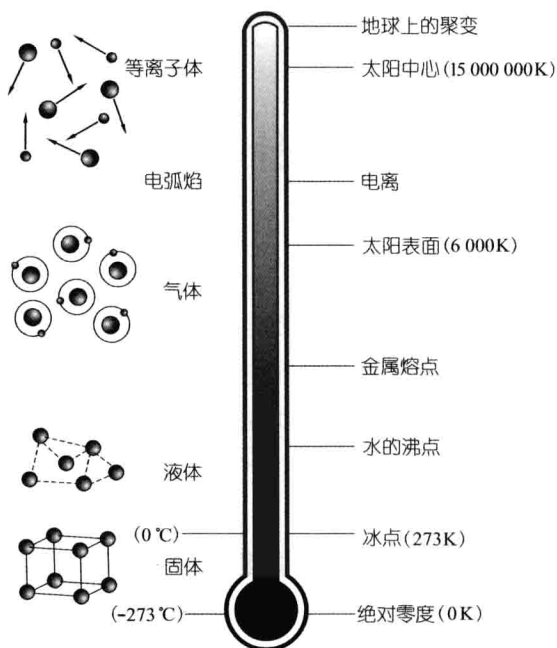
第 1 章 为什么是聚变？

我们把所有的一切都归因于聚变，太阳和在夜空中闪烁的每颗恒星都是由聚变提供能量的。没有它，宇宙就会是黑暗、阴冷和毫无生命的。聚变使宇宙中充满光和热，使地球上和可能的其他地方诞生生命。地球自身、我们呼吸的空气以及构成我们的物质，都是聚变的产物。

在“大爆炸”之后，一旦一切都冷却到中性原子能够形成的程度，宇宙中马上就会出现氢原子——最简单的原子，这些氢原子分布相当均匀。当然也存在少量的氦和一些神秘的暗物质，但是宇宙看上去仅仅只是氢原子和空旷的空间。那么，聚变是怎么将这张苍白的画布变换成今天可见的天体“动物园”（指星座）和我们身边 92 种元素的呢？首先它从引力中获得一些帮助。尽管引力是一种很弱的力，但经过数千万年的作用，它将氢原子彼此拉近。氢原子聚集成球形团块，引力则随着团块的增大而增大，从而吸入更多的氢原子。

随着这些由氢原子所组成的球逐渐增大，外部全部氢的重力导致球心气体的压力随之增加，而增大的压力则产生更高的温度（想想充气中的自行车轮胎：你打气越多，它变得越热）。温度越高意味着原子运动得越快，也就越来越剧烈地相互碰撞。当温度达到一定程度时，强烈的碰撞会把带负电的电子从原子核外层撞飞。就氢原子来说，这些核仅由一个简单的亚原子粒子构成，也就是带正电的质子。结果就产生了等离子体：一股带电粒子的热涡流。

一瓣太阳——可控核聚变的寻梦之旅



在高温状态下,等离子体(电离的气体)成为除固体、液体和气体之外的第四种物态。

当新生星增长到一定大小时——大致是地球质量的 28 000 倍,其核心温度达到 1 000 万摄氏度,聚变开始发生。聚变只不过是两个原子核相互融合而形成更大的核,但却很难做到,因为所有原子核都带有正电荷,同种电荷相斥。正在形成的恒星中心相互碰撞的质子就是如此。然而,当温度达到几百万摄氏度时,原子核之间碰合的猛力将突破静电斥力,并通过另一种近距离作用力相互结合。这就是使质子同它不带电的伙伴——中子相互结合,形成原子核的那种力。在这种力能够捕获它们,并把它们连在一起形成一个新原子核之前,两个碰撞质子之间的距离必须达到亚原子水平。但是,两个质子形成的核本身并不稳定,因此大部分质子对几乎都立刻分裂。

在非常偶然的情况下,这些短暂聚合体中的一个质子会很快衰变成一个中子。由一个质子和一个中子组成的原子核——也就是氘核,是很稳定的,新原子核因此得以存活下来。随着时间推移,这个过程会在原恒星的中心创造出越来越多的氘核,而当它们的量积累到足够多时,另一种反应开始发生。例如,一个氘核可以和另一个质子聚合产生一个氦-3(两个质子加一个中子);而且,一旦有足够的氦-3,两个氦-3可以聚合成一个氦-4(两个质子加两个中子),并放出两个质子。这些反应是链式核聚变的开始,结果产生了锂和铍两种元素。

作为副产品,这些聚变会产生热量。举例来说,一个氦-3的原子核要比产生它的原子核对略轻(在这个例子中是一个氘核和一个质子)。这个质量并没有消失,它在聚变过程中变成了能量。因此,这种链式反应一旦开始,无数的原子核将参与聚变,原始恒星的中心会变成一座狂暴的熔炉,温度进一步升高,导致更多的反应发生。这个简单过程将气体球变成一个成熟的恒星,并且正是它——或某种非常相似的反应链——为所有的恒星提供了能量,从被认为在大爆炸之后1.5亿年最早被点亮的那些恒星,一直到宇宙137亿年历史上的所有恒星。

聚变还有更多的戏法。在一个恒星生命的末期,当所有的氢都被“烧”完时,它便开始了消耗氦的链式反应,产生出铍、碳和氧。当所有的氦被用尽,其他链式反应又开始消耗这些原子核,并产生出更重的元素。通过这种方式,在一个恒星的死亡过程中,聚变创造了直到铁的所有元素。最终,当不再有聚变燃料存在,恒星的残留部分将在自身引力的作用下坍缩。如果是一颗大恒星,这种坍缩将释放非常大的引力能,在一场天翻地覆的大爆炸中将恒星外层崩飞,这就是超新星。超新星的能量如此强烈,能使恒星灰烬中遗留的重核进一步聚合。这些聚变又产生了其他所有的元素,从铁到

铀,以至超铀元素。

这样,在一个恒星的生命周期里,聚变以氢为原材料,将它锻造成周期表中的所有其他元素。而当恒星最终爆炸时,它将这些元素散播到太空中。在那里,它们与新的氢混合,并慢慢结合成新的恒星和行星。因此,这些第二代恒星和它们周围形成的伴随行星中都含有元素的混合物,这使一些行星形成了岩石表面、海洋、大气和生命。除氢之外,你身体中的每一个原子都是在某颗恒星的漫长死亡过程中经由聚变创造的。

为了搞清楚究竟是什么使太阳和所有其他恒星发光,从19世纪下半期到20世纪早期,科学家一直在研究。令他们困惑的是,太阳如何能够在数十亿年间不断释放出如此巨大的能量而不会出现燃料短缺。到20世纪30年代后期,他们已经弄清了上述聚变反应的大致细节,并得出了自己的答案。这个答案将一颗思想的种子植入了一些人的头脑之中。由于第二次世界大战,这颗种子的萌发滞留了一段时间。但是,战争结束之后,它很快开始发芽。这颗种子是什么?它是这样一种想法:如果聚变在数十亿年间为太阳提供能量,那么,在能够加以控制的情况下,它是否同样能为地球提供无尽的能量?古希腊神话人物普罗米修斯(Prometheus)从神那里盗取火种,并把它交给人类,导致了进步、技术和文明。科学是否能“盗取”太阳的能量,并在地球上将它重新点燃,以此为全人类造福?

普罗米修斯的下场很惨——他因为自己的罪过而被链子永远锁在了一块岩石上。战后科学家们不用去担心那图谋报复的宙斯(Zeus)。事实上,他们认为驯服聚变会比较容易。恒星使它看起来似乎很容易:使足够多的氢聚集成团,施加引力,聚变就……发生了。然而在地球上可没有像恒星上那样容易实现的有利条件,其中就包括那种等效于千万个地球的重力,它能够对核心形成挤压,将

氢加热和压缩至聚变温度。科学家不得不寻找其他某种方式来实现对氢的加热和压缩——这究竟会有多难？

尽管战争年代是灾难性的，但期间还是产生了一些技术奇迹。刚开始，一些人仍然在马背上作战，但很快战争中大量使用了快速移动的装甲坦克、远程空中轰炸机、巨型航空运输机以及潜艇。到了战争后期，还出现了能攻击几百英里外目标的火箭、喷气引擎飞机，以及最重要的——一种能摧毁整座城市的炸弹。战后，在一些科学家中弥漫着一种乐观情绪。既然他们在6年的战争时期都能取得如此多的成就，那么想象一下他们在和平时期该能做些什么。

其中之一就是发展核能。不过这并不是聚变，而是另外一种核反应，投掷在日本广岛和长崎的原子弹所利用的反应过程——裂变。裂变，从某种意义上来说是聚变的逆过程。在裂变中，我们所知道的一些最大的核，比如铀，分裂成两个新的核。这个起始核比裂变反应后得到的碎片稍重一些，那部分消失的质量在反应过程中转化成了能量。与聚变不同，裂变无需高温触发，大的核被高速运动的中子击中后很容易分裂。这是在1938年的新发现，一些核分裂时会附带产生中子，从而导致一种链式反应的开启：一个核被一个中子击中，它分裂并射出两个中子；这两个中子击中两个新核又射出四个中子，以此类推。这种链式反应使原子弹——裂变炸弹成为可能：如果你集合了一堆像是铀或者钚这样的所谓可裂变物质，且超过某一临界量，链式反应就会自发开始并失去控制，在一瞬间发生爆炸。

在加入曼哈顿计划（第二次世界大战期间盟军的原子弹研制计划）的科学家们制造出原子弹之前，他们在世界上第一座反应堆中以一种可控的方式测试了链式反应。该反应堆是秘密建设的，就位于芝加哥大学（University of Chicago）体育场所在的施塔格足球场（Stagg Field）底下的一个壁球场内，被称为芝加哥1号堆，因为组成它的是一堆铀和石墨块。反应堆的建设由恩里科·费米（Enrico

Fermi)领导,他是一位著名的意大利裔美国物理学家。石墨吸收中子以减缓裂变反应。反应堆中的石墨块是经过精心设计而特别排列的,既保证有足够多的铀彼此足够接近,以维持链式反应,同时又不足以让它失控并发生爆炸。反应堆周围既没有辐射屏,也没有采取措施防止可能的爆炸——费米认为无须如此,他对于自己的计算足够自信。1942年12月2日下午3点左右,费米的助手们从反应堆中心慢慢拉出一根石墨控制棒。按照计算,在反应堆中,这点石墨量的减少恰好能允许链式反应开始。费米盯着一台中子计数器,看到中子数量随着控制棒被抽出开始上涨。在一群显要人物的见证下,费米启动了第一次可控核反应,持续了近半个小时,然后重新插入控制棒中止反应。

战争结束之后,工程师们在第一时间内将这项技术投入商业用途。第一座用来发电的核反应堆于1951年在美国建成,第一个向电网供电的反应堆则于1954年在苏联建成,第一座真正的商用核电站于1956年在英国开始运转。在那时,许多人预期核动力发电是廉价且无限的。但是,将裂变用作能源仍存在问题。

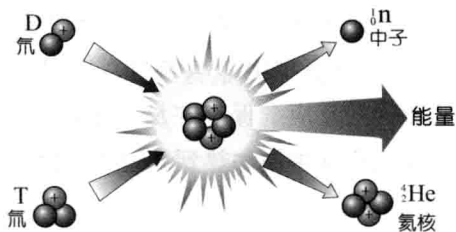
第一,铀是一种有限的资源,一些预测说在21世纪结束前铀就可能变得非常稀缺。

第二是安全问题:因为裂变反应堆依靠链式反应,反应的运行可能会过速,而反应堆则可能会因此而过热。反应堆虽然不会像原子弹那样引起核爆炸,因为其内部的可裂变物质太过分散;但是它会导致过热并熔化核芯——就像1979年发生在三哩岛的事故,或引起火灾——就像1986年发生在切尔诺贝利的事故。反应堆中包含有数吨的铀或钚燃料,并且在运行一段时间后还要产生许多放射性废燃料,其中一些对人危害极大。当事故发生时,危险的是这种放射性物质的扩散范围又远又广。在三哩岛,这些物质的扩散受到了控制;但在切尔诺贝利却没有。

为什么是聚变？

第三,就是废料问题。一座发电量为10亿瓦的标准核电站每年会产生约 300米^3 低、中水平的放射性废料,30吨的高放射性废料。与同样产能的火力电站产生的废料(其中一些也具有相当的毒性)相比,这样的数量微不足道。然而,其中一些核废物的放射性即便不会保持数百万年,也会持续数十万年,这才是难以应付的问题。低、中水平的放射性废物可以近地表掩埋,其放射性会在短短几十年内衰减到安全等级。而高放射性废物则需要特殊处理,以保证它在数万年内不会被人类和其他生物所接触。仅仅想象一下如何做这件事就是一种苛求,因此只有少数国家通过在地下深处建造永久储存库来处理这个问题,储存库被装满时就会被密封。其他国家则把废料存储在守卫森严的地表设施中。每年,世界上所有的反应堆总共要产生 $10\,000\text{米}^3$ 的高放射性废料。

在喧闹的战后世界,随着一些国家开展用裂变获取核能的商业化竞争,一些科学家则意识到,尝试用核聚变来获取能量应当是一个更好的主意。支持核聚变的论点是极富吸引力的。首先,燃料是存在的:聚变消耗的是氢,或者更准确地说是氢的两种同位素,氘和氚。氘原子仅仅是一个氘原子核(一个质子和一个中子)加一个核外电子;而氚的原子核内则有两个中子。如果使氘和氚聚合,你会得到氦和一个中子。



一个氘(D)与一个氚(T)以足够大的速度碰撞就会发生聚变,产生氦(${}^4_2\text{He}$)、一个中子(${}_0^1\text{n}$)和许多能量。

氘很容易从水中提取。海水的每 6 700 个氢原子中就有一个是氘原子。这看上去似乎并不多,但是考虑到全世界海洋中水的数量,其中有足够支持世界数十亿年能源需求的氘。氘更富于变化,因为它是一个不稳定的原子核,半衰期为 12 年,所以必须人工制造。最简单的方法是用锂,一种常在一些电池中使用的金属。当锂被中子轰击时,会分裂成氦和氘。任何中子源都能引发这一反应,而由于聚变反应堆本身就能产生大量中子,人们认为其中一部分中子可以用来制造氘燃料,以供消耗。锂可以从易于开采的矿物中提取,足够支撑全世界数百年的用电需求。当这部分矿产耗尽时,海洋中还存在足够数百万年使用的锂。

当你了解一座聚变反应堆到底需要多少燃料时,就能够理解这似乎远远过量的燃料供应。1 座 10 亿瓦的火力电站每天需要用 100 节火车车皮装载的 10 000 吨煤。相反,产出同样能量的核电站每天仅需消耗 1 千克的氘-氘燃料。通过聚变,一台笔记本电脑电池里的锂和 45 升水里的氘产生的电能,完全可以满足一个普通英国消费者 30 年的需求。

聚变是一个核反应过程,所以有人会担心它的安全性。聚变存在一些安全问题,但是与裂变反应堆相比,则是小巫见大巫。维持聚变反应是十分困难的,如果聚变反应堆的控制中存在任何故障,反应马上就会自然停止。反应过程就算失控也不会持续很长时间,因为聚变反应堆中的燃料很少。裂变反应堆的核芯存有够用数年的燃料,与之不同,聚变反应堆里每次都只有约 10 张邮票那么重的燃料,仅能维持几秒钟的反应。保存在反应堆外的燃料不存在任何反应的风险:只有在反应堆中被加热到超过 1 亿摄氏度时,它才会开始“燃烧”。

氘是一种放射性气体,所以对人类有害。但由于氘是现场产生的,所以一座聚变核电站无须保持大量备用存储。在那些小概率事

为什么是聚变？

件中,比如说恐怖分子炸毁核电站或是用飞机撞击核电站,或者是核电站受到地震和海啸(就像日本福岛核电站)袭击,也无须疏散附近居民。无论如何,氦是氢的一种,一种曾用于气球和飞艇上浮的气体;它在地球上的自然运动趋向是笔直向上的。

聚变反应堆确实会产生一些放射性废物,但与裂变相比,其数量仍然是微不足道的。聚变燃烧后的“灰烬”是氦,是被用来填充派对气球、放飞飞艇以及冷却核磁共振仪器的惰性气体。在经过反应过程中产生的高能中微子数十年的轰击之后,聚变堆结构中的金属和其他物质也会具有温和的放射性。所以当拆除一座核电站时,需要将它埋在浅矿坑中埋上数十年,但时间一到就可以安全地对这些材料进行回收利用。聚变不会产生需要数千年来降解的高放射性废料。

聚变好得似乎难以置信,对于20世纪40年代晚期和50年代早期的聚变研究先驱们来说,尽管他们尚未弄清全部细节,但是显然,相对于裂变,聚变会是具有巨大优势的能源。聚变的早期支持者中存在一种理想主义观点,他们几乎全部集中在英国、美国和苏联。所有物理学家都被曼哈顿计划释放的能量所震惊,许多人感到了对原子弹所引发灾难的一种责任感。聚变提供了一条和平利用核技术的途径,能让所有人受益。早期有关聚变的大量工作都是在武器实验室中进行的,因为那里是核物理学家们所在的地方。但是,后来他们中的许多人离开了实验室,到军事单位以外的地方继续从事聚变研究。

那时,这些持技术乐观主义观点的早期先驱们认为,他们能在10年内掌控聚变,然后转而研究商用电站,与裂变研发的时间表相同。他们知道,自己必须把氢加热到非常热,至少1亿摄氏度。在这种温度下,固体、液体甚至气体都无法存在,所以他们必须处理的是