

# 惯性约束核聚变

刘红

(中国工程物理研究院研究生部 100088)

“每个研究理论问题的人……不可抗拒地被迫接受近代自然科学的成果”。我们正处在一个知识爆炸、高新技术迅猛发展的时代,2001年2月26日到3月6日,在北京展览馆举办的“八六三计划50周年成就展”,向人们展示了中国在新世纪所拥有的高科技与新技术。1986年为了迎接世界新技术革命和高技术竞争的挑战,王大珩、王淦昌、杨嘉墀、陈芳允4位科学家,提出加快发展我国高技术的建议,邓小平同志高瞻远瞩,果断决策,于同年3月亲自批准启动了我国高技术研究发展计划,即863计划,中国的高技术研究发展由此掀开了崭新的篇章。863计划实施15年以来,在生物技术、航天技术、信息技术、激光技术、自动化技术、能源技术、材料技术、海洋技术等领域,在超导、信息安全等专项取得了令人瞩目的进展与成就,智能机器人“青青”、组织重组“人耳”老鼠、克隆羊“滔滔”、高温超导磁悬浮实验车“世纪号”等等成了展览会上的名星,小朋友们牵挂的宠物。一个新技术、一个高科技给人们带来多少生活的信心和喜悦。高技术“惯性约束核聚变”军民两用项目,更是受到国家领导人的高度重视。

## 一、惯性约束核聚变的简介

惯性约束核聚变(Inertial Confinement Fusion,简称ICF),研究的目标是在21世纪实现干净的聚变能源和军事应用,在实现高增益聚变反应堆之前,在中期应用上,也可以利用实验室微聚变设施进行国防

和科学方面的重要研究。

ICF是不同于磁约束的另一种可控热核聚变,它的基本思想是:利用激光或离子束作驱动源,脉冲式地提供高强度能量,均匀地作用于装填氘氚(DT)燃料的微型球状靶丸外壳表面,形成高温高压等离子体,利用反冲压力,使靶的外壳极快地向心运动,压缩氘氚主燃料层到每立方厘米的几百克质量的极高密度,并使局部氘氚区域形成高温高密度热斑,达到点火条件,驱动脉冲宽度为纳秒级,在高温高密度热核燃料来不及飞散之前,进行充分热核燃烧,放出大量聚变能。

能源是社会和经济发展的基础。开发新能源是本世纪世界范围内的重大课题。我国是一个能源相对匮乏的发展中国家,新能源的开发尤为迫切。863能源项目就有快堆、高温气冷堆、混合堆、燃煤磁流体发电等,中央领导对能源技术的研究与发展十分关心,多次亲临现场检查,听取汇报,帮助解决一些困难和问题,极大地鼓舞了科技人员的积极性与创造性。

随着科学技术和社会生产力的不断发展,能源的位置显得越来越重要,人类也在不断地扩大能源的利用范围。远古时代,人类只能利用人畜的肌肉力量作为动力,用钻木取火的方法产生热量。后来,除了利用风力、水力等自然动力外,还开发了煤、石油、天然气等化石燃料。20世纪50年代初期,人类

目前微波能量在传输过程中的抗干扰能力仍较弱,而且容易对己方电子系统造成损伤。但是,微波束武器在现代战争中具有独特的作用已为人们所共知。

## 四、次声波武器

频率底于20赫兹的机械波称为次声波。次声波会对生物体产生影响,某些频率的强次声波能引起人的疲劳痛苦,甚至导致死亡。次声波武器通常由次声发生器、动力装置和控制系统3个主要部分组成。

次声杀伤的物理原理是利用和人体器官固有频率相近的次声波与人体器官发生共振,从而导致人体器官的变形和移位,甚至破裂,达到损伤人体的目的。特别是次声波武器在杀伤敌方战斗人员的同时,并不破坏武器和装备,这就可以取为己用。

为了把次声波作为一种致命的武器使用,必须使其能够高强、定向、聚束传播,然而,由于次声波的波长很大,容易发生衍射现象,要使其定向聚束传播很难实现。因此,要把次声波武器用于实战,还需军事科学家做出很大的努力。

进入了利用原子核能的新时代,核电站显示了巨大的威力,只要燃烧极少的燃料就可获得巨大的能量,一座 50 万千瓦的火电站,每年耗煤 150 万吨,而规模相当的核电站每年只需 0.6 吨核燃料。核能在总能源结构中占的比重越来越大,今后还会有较大的发展。但是,这种核电站是以原子核的裂变反应(重核裂变为轻核)为基础的,产生的放射性废物处理比较困难,而且主要核燃料铀的储量相对其他元素来说并不丰富,开采和提炼又十分困难。因此,只有原子核的聚变能才是人类未来最理想的新能源。首先,它的物理基础是轻原子核发生聚变核反应(由轻核聚在一起变成重核并放出能量),主要原料来源于海水,可谓取之不尽,用之不竭。其次,反应后无污染,没有裂变,没有三废,不需要后处理。它具有许多其他能源无可比拟的优点。

## 二、惯性约束核聚变的基本原理

惯性约束对我们来说并不陌生。在地球上首先从热核聚变获得能量的就是惯性约束法——这就是大名鼎鼎的氢弹!

氢弹是靠原子弹引爆的,原子弹起爆要有一个临界值,不可能作得很小,它在瞬时释放巨大的能量,因此它是不可控的核反应。

但如果我们不用原子弹,而用别的高功率物质(如激光、电子束、离子束)来点燃很少量(例如  $10^{-6}$  克)的热核燃料——氘氚燃料靶丸,使它在惯性约束的情况下达到点火条件,这时放出的聚变能就在我们能加以利用的水平之内。

在惯性约束聚变中,点火条件要求高温、高密度和一定的尺度,采用激光驱动也需要增压手段,其大致过程是:激光首先从四面八方均匀加热球形靶丸表面,在靶表面形成一层高温稀薄等离子体,然后激光通过这层稀薄等离子体时,以逆韧致和某些等离子体的反常吸收过程被吸收。被吸收的激光能量迅速加热电子,温度可达到 3—5 千万度。高温电子通过电子热传导,又将大部分能量输运到临近吸收区的烧蚀层密度高的区域,形成一个高温烧蚀阵面(温度急剧变化的一个空间界面),并在此产生高的烧蚀压,这是一个增压过程。它将激光压力提高近千倍。烧蚀压驱动烧蚀阵面附近的物质,一方面将一部分高温高密度等离子体物质向外朝低密度的等离子体区喷射,另一方面由于作用与反作用的关系,将剩余的冷物质压缩并向中心加速运动,产生聚心冲击波,压缩氘氚燃料,这就是惯性约束的含义。这个过程

就称为“内爆”,通过球形内爆和内爆过程的聚心效应,使氘氚燃料的压力再增加几百万倍,达到点火时要求达到的燃料压力。

近年来又提出激光聚变点火的一种新方式——“快点火”。它的特点是将氘氚燃料靶丸的压缩和点火分开进行:第一步,由通常的多束激光对称辐照靶丸获得高密度,而后由单束超强激光加热芯部实现点火。和传统的“热斑点火”比较,快点火在压缩方面具有很多优越性:大量节省驱动能量,降低了对驱动均匀性的要求,并且可以达到更高的能量增益。

## 三、惯性约束核聚变的困难和展望

50 年的核聚变研究经历了马鞍型的发展过程。50 年代初,主要是美、苏、英 3 国各自开始了规模较大的受控磁约束核聚变的研究,一是为能源,二是为军事目的。经过一段摸底,确认受控磁约束核聚变难度很大,不可能在短期内实现“点火”,也不具有原先想象中的巨大军事意义之后,在 1958 年第二次和平利用原子能会议上,受控核聚变研究解密了,60 年代末,托卡马克装置获得重要进展,从此世界范围内再次出现了新的高潮,90 年代,取得很大进展。

产生热核反应的条件是让氘氚核彼此靠得足够近。这样要克服两个核之间的静电斥力,如果速度不够快就冲不上去。当然,根据量子力学的“隧道效应”,原子核即使爬不到势垒山顶也有一定的可能性穿越势垒而发生聚变反应,等离子体温度必须足够高,对于氘氚核间的聚变反应,温度在 5 千万度至 1 亿度。这是多么苛刻的条件!而太阳表面才只有 6000 度,要想从中提取能量还必须充分地约束,达到高密度并具有一定的约束时间,要求反应核的数密度与约束时间乘积大于一定的数值,现在世界各国均未能达到,这是困难之一。其二,点火之后尚需使输出的能量超过输入的能量,获得净聚变能,如果用来驱动的激光能量远大于核聚变释放的能量,这还不能算实现了具有能量增益的聚变反应,这是困难之二。

我国 ICF 进展如何?自 1964 年我国科学家王淦昌先生在国际上独立提出激光驱动聚变的建议之后,中、美、日、法、英、俄等国开始进行激光驱动 ICF 的研究,30 多年来,ICF 研究已在世界范围内取得了重要进展,有望在近 10 年内实现点火。我国相继建立了神光 和神光 系列激光装置,进行了 ICF 靶物理的研究,1993 年我国 ICF 研究进入 863 计划,形成千人会战的局面。陶祖聪研究员和贺贤士院士等

著名科学家多年来孜孜不倦地努力,冲破了发达国家对我国资料的封锁,发扬两弹精神,克服重重困难,多方合作,在驱动器(高功率、高能量激光器)、靶物理理论和实验、精密诊断设备以及靶的制造5个方面协调研究,取得了重要进展。惯性约束核聚变的研究是一门综合性强、技术要求高、难度大的尖端科学技术,需要扎实的基础研究做后盾,要经过几代人不懈的努力。正如王淦昌先生生前所说:“希望更多的热爱祖国的年轻人投入到这个为全人类造福的宏伟事业中来,我自己可能看不到可控核聚变的实现了,现在的年轻人一定能够看到,一定会在这方面做出惊人的成绩。”

资料显示,到不了本世纪中叶,地球上的石油、煤、天然气等资源将会枯竭。由于人类向大自然索取过多,我们赖以生存的这个星球的土壤、森林、港湾和海洋遭受侵蚀的速度明显加快,从而降低了地球的承载能力,改变了地球的大气品质。在地球环境日趋恶劣的情况下,惯性约束核聚变的最终突破,将还人类一个干净、高效的生存空间。

ICF研究进展是健康的,没有发现物理上和技

术上的重大障碍。但要充分重视深化靶物理的研究,充分掌握各个主要环节的物理规律,如激光与等离子体的非线性相互作用,流体力学不稳定性等。在此基础上实现点火和高增益目标,科学可行性证明之后,下一步是工程可行性的论证,主要是研制能用于惯性核聚变能源的驱动器,建成核聚变发电站。一座100万千瓦的聚变电站,每年使用的氘和锂(氘的原料)只有0.6吨,用一辆小型卡车就可完成运输,这样一个电站的燃料价格每年小于100万美元,而聚变产物是中子和无毒无害的气体氦,在释放氦气时,自然泄漏到地球的大气层中。在聚变堆中,中子与锂反应造氘,它又可作为新靶的燃料。

能源问题的最终解决,将给人们的生活带来彻底的改变,试想用电瓶车代替燃油车,不仅省了能源而且根除了空气污染。由于电力充足,可以抽水植树种草,根治沙尘暴,改善生态环境。由于环境的改变,人们的思想观念,包括就业观念、消费观念、审美观念和时间观念等,也将随着生活质量的提高发生显著的变化。

---

## 科学研究不是为了得奖

整本书都讲的是“得奖”,却在最后设一个“不是为了得奖”的标题,其原委用我们自己的话来说,恐怕一时也说不出个所以然来。好在我们发现了一段朴实优美而又极具感召力的文字,尽管寥寥数语,却言简意赅,说出了我们想说又不知该怎样说的话。这段话,出自1958年和1980年两次得到诺贝尔化学奖的英国生物化学家桑格(Frederick Sanger)给中国学生及科技工作者的信。现摘录如下,借作点睛之笔:

“有时候我问自己:‘要获得诺贝尔奖,什么是我必须做的?’我的答案是‘我不知道,我从没试过’。但我知道有一种方法是得不了奖的,有的人投身于科学研究的主要目的是为了得奖,而且一直千方百计地考虑如何才能得奖,这样的人是不会成功的。要想真正在科学领域有所成就,你必须对它有兴趣,你必须做好进行艰苦的工作和遇到挫折时不会太泄

气的思想准备。”

“在这个国家,如果你在大众报纸上阅读到一些有关科学的文章,也许你会有这样一种感觉:科学很像奥林匹克运动或一场足球赛,所有的科学家彼此之间互相竞争,看看到底谁能首先做出发现和获奖。事实不是这样的,科学家为了人类利益一起工作,就像一支队伍,他们不仅仅为了‘看看谁是最聪明的’而竞争。我所取得的任何一点进步都是紧密建立在其他实验室别人的前期工作、建立在与别的科学家有益的讨论和建议的基础之上的,而我的一些工作成绩也为其他人的发现做出了贡献。当然,有很多明显的对抗存在,但这不是有益的,也常常是不严肃的。”

(摘自“诺贝尔奖百年鉴”丛书《睿智神工:基本粒子探测》(黄艳华、江向东著,卞毓麟主编,上海科技教育出版社2001年9月出版))