

重离子惯性约束核聚变的研究近况

Progress in the Research of HIDIF

戴光曦

(《原子核物理评论》, 编委、研究员、博士生导师 烟台 264005)

一、概述

自 1977 年在布洛克海文国立实验室召开世界首次重离子聚变(惯性约束聚变)研讨会^[1]以来,这一重要课题已引起各国和我国学术界的重视^[2],先后已召开过十次国际大型会议进行交流探讨。由于德国建立了世界上最先进的重离子加速器和电子冷却束流存贮环,所以国际上研究的重点已从美国移到德国。德国重离子研究所(GSI)的玻克教授^[3](Prof. R. Bock)成为该项目首席科学顾问之一。

惯性约束聚变的实现方案有两种:一种是用强流、中能重离子束流;另一种是激光炮束。总的说来,由于起动经费较低,所以搞激光的人多,而搞重离子的人少。在我国重离子加速器建成后,发展重离子惯性约束聚变的研究也有了相应基础。

惯性约束聚变的竞争对手是电磁约束聚变。以稀薄氦气(例如压强仅为标准大气压的 10^{-5})放电形成等离子体,在电磁约束下作猛烈压缩并维持数秒钟以使劳逊判据得以满足,即可使聚变反应开始。该装置的典型代表是托克马克装置。我国目前在这一领域已有了较大的进展。

与磁约束比较,惯性约束最大的优点是驱动部分与聚变反应堆部分在空间上是分离的。由于两部分功能截然不同,所以在空间上分开、互不干扰就很重要。例如聚变反应堆内壁采用锂合金液体壁,即泻流细管簇围绕的壁,用它便于冷却、便于中子被锂吸收和再生氦的取回操作。而且两者分开,维修人员也可更加靠近设备,便于操作。此外,惯性约束的聚变反应空间很集中,而磁约束的则是分散的。这个优点对靶室设计也是很有利的。本文将着重介绍近年来重离子惯性约束聚变的进展。

封三图 1 是重离子惯性约束聚变装置示意图。一台中等能量的重离子强流直线加速器,可加速单电荷的铍或铀等重离子达到单核子能为 48MeV,或者总能量为 10GeV,这是中能范围;现在这一技术已经实现。但是惯性约束需要束流达到

1~400毫安级!尤其在加速器的前半段,由于处于高密度低速状态下,离子间互相排斥而离散,所以要求边加速边聚焦。这就要研制“射频电四极子聚焦”器件,即 RFQ 结构。当束流达到满能量后可进入大型束流存贮环。通过 18 个存贮环,可进一步对束流时间位相进行合并重组,以提高束流强度在惯性约束中的总体效率。当存贮环内多圈灌满时,可达到每环存有 12 个时间宽度 0.25 微秒的束团;它等价于 1/4 兆焦耳能量。最后将束流送入一个强聚焦透镜,把它聚焦到 2 毫米左右,轰击靶丸以点燃氦核燃料。目前离子束的能量淀积率可以达到每克 10 万焦耳,这可使温度升高到 10 电子伏(1 电子伏相当于 1.16 万度),对金属靶丸的压力可达到几十万巴到 100 万巴(1 巴 = 0.987 标准大气压),以达到聚变所需要的条件。

二、高强度束流和 RFQ 结构

在 1982 年提出的 HIBLL 方案(即“重离子打靶丸”方案),其束流指标为:10GeV、100mA、 $^{209}\text{Be}^{1+}$ 束流、束流脉冲宽度 20ns(毫微秒)、重覆频率 20 次/秒^[4]。所以是一种加速低电离、重核、高强度、中能范围并有良好聚焦的束流。从这一要求来看,加速器用于直线型较佳,但必须十分关注残余气体对束流中性化和再电离。现在已有了更现实的配置方案。但强流时在加速过程中束流团内的自排斥致使发射现象很严重。因此除了要用多离子源和两两并束(即树枝状)的方法之外,现在的 HIDIF 方案(“重离子驱动惯性约束聚变”方案^[5,6])采用了电场四极子加速并聚焦的 RFQ 结构。尤其在并束前两条束流线十分靠近时,须将原有的 RFQ 改进为特制双束的 RFQ 结构,以使束流总能保持在径向和轴向聚焦。双束的 RFQ 结构是由两组四极子电极组成。这两组加速出的已调制的束流团,其间的相位差 180 度。共用一套共振结构,使最后两组束流团依次交替并合,合成后束团间的时距可减少一半。显然,此后的加速频率就是原来的 2 倍。RFQ 器件由 4 根(例如长

1 米) 平行紫铜导体棍并围绕束流中心线放置来组成, 从断面上看 4 根导体断面电极围着靶心 (中心轴线), 其极面以轴心为对称中心, 呈双曲线型。束流从中心穿过, 受到支撑固定这 4 根平行导体的环形端子上的电场的加速, 同时也受到电四极场的聚焦作用。相邻两只环形端子的距离为 10 厘米, 前一只与上下两根平行导体相接, 后一端子与左右平行导体相联。这些环形端子同时也保证了 4 根电极的精确定位。这些导体电极等均安装在柱形大圆筒内 (内壁镀紫铜), 安装误差不大于 1/200 毫米。这时从离子源到主加速出口总的 HIDIF 加速器的系统配置依次为: 16 套离子源, 16 套 RFQ1(开始汇束成一条管线); 随后的管线中有 8 套切束器、8 套双束 RFQ1、8 套 RFQ2(汇束器 2); 4 套双束 RFQ2, 4 套维德罗意型 (R. Wideroe) 加速器 1(汇束器 3); 2 套维德罗意型加速器 2; 最后总汇束器是阿尔瓦茨型 (L. W. Alvarez) 主加速器。束流出口要接存贮环。最后束流的单核子能量为 48MeV/u, 对²⁰⁹Bt⁺束来说为 10GeV。由于并束 4 次, 其依次使用的加速频率从 12.5MHz 升到 200MHz.; 各级并束时的单核子能量依次为: 60keV/u、200keV/u、2MeV/u 和 10MeV/u。最终将达到满加速的 48MeV/u。其主要指标见表 1。

三、等离子强聚焦单透镜

在毗邻于美国旧金山的利沃莫尔实验室中的国家激光点燃设施 (NIF) 可能将在 2005 年 (比原定推迟 1 年) 首次点燃聚变靶丸。他们采用的是钨玻璃激光器, 每个脉冲能量 2MJ(兆焦)。要求有一定的重覆照射率, 这对于激光束驱动源来说是比较难的。而重离子惯性束由于同时具有很高的能量淀积率和重覆照射率 (每秒可轰打 20 个靶丸), 所以它可作为驱动聚变堆的最佳的候选方案。

从固体中重离子束和激光束的能量淀积过程比较来看, 重离子束可深深穿进材料内部, 而激光束则被浅薄层吸收, 并被表层的等离子体大量反射出去。重离子被停阻在材料中, 在其射程尾部出现高密度能量淀积的布喇格峰。与重离子的射程轨迹方向相垂直的方向, 是该材料内产生激波的发射方向。但在射程终点, 激波方向与束流入射方向一致。对于激光束, 激波方向总是与光束方向相同, 而且产生的等离子体垂直于表面扩展, 这正是激光打靶时出现销融靶壳联同激波向心内爆的物理基础。

在图 1 中已展示, 束流打靶前要置放一台聚焦透镜。目前已发展出一种比磁四极透镜更有效的等离子体透镜, 封三图 2 显示了正进行测试的该透镜的原理图。用它来对中能重离子聚焦可使焦点束斑直径小于 0.5 毫米。

表 1 HIDIF 方案中设备的参数指标^[7]

	A	B
离子能量(GeV)	10	10
驱动总能量(MJ)	3	4.5
直线加速器束流(mA)	400	400
存贮环数	12	18
存贮束流团数	144	216
存贮束流团的时段(ns)	250	250
离子种类(望远镜式)	3	3
最后脉冲时段(ns)	6	6
峰值功率(TW)	750	1100
总峰值电流(kA)	75	94
聚焦束斑半径(mm)	1.7	1.7
最后束流管道数	48	72
束流转换为X光器件数	2	8

(注: A 与 B 的主要差别是重离子束变成 X 光的转换器数目不同)

在一只绝缘的柱筒形容器中充以 1 到 10 毫巴的惰性气体, 而阴极和阳极金属高压电环则位于柱筒两端。当电容器和快速开关开通, 使气体放电时, 可形成一个柱形状的等离子体。此等离子体具有稳定均匀的强电流密度分布。电流产生一辐向磁场 B_θ 。这时将 10GeV 重离子束射入并穿过放电区, 就会被磁场引向筒轴方向, 形成聚焦。该透镜每次放电所贮存的电能是 1~1.5 万千焦耳, 放电持续时间为几微秒。与常规的四极透镜相比较, 等离子体透镜聚焦在含轴平面上是等同的, 聚焦效果好, 即使对很高能量的离子束也有极短的焦距。例如在 GSI 的 SIS 上的等离子体透镜比磁四极透镜的聚焦斑点小 2~4 倍, 这就可使束流在介质中单位面积上的淀积能量增加一个量级。环状等离子体磁场 B_θ 将平行束流在轴上聚成一个小的焦点。图中显示出, 未聚焦的离子束和在等离子体透镜焦平面上聚焦的离子束的束斑。可将直径 12mm 的平行束聚束成 380 微米的斑点, 此时放电峰值电流可达到 40 万安培。这是 GSI 于 1997 年取得的结果。由于聚焦将决定点燃的成败, 所以在 HIDIF 方案中要求束斑半径必须为 1.7 毫米。

四、惯性约束原理, 直接打靶与间接用二次 X 射线打靶

惯性约束就是无需额外的约束, 只依靠靶丸金属壳内装的氘氚混合体的质量惯性, 且全处于静止不动状态。在重离子束从四面八方同时直接轰打靶丸壳的瞬间, 仅几十毫微秒, 便可使靶壳获得几十万度高温和上百万大气压的向心压力, 使氘氚物质来不及逃逸而被向心内爆挤压达到可观的约束时间, 使劳逊判据得以满足, 从而引发核聚变。换句话

说,靠内爆来实现微氢弹爆炸,这就是惯性约束聚变的实质。

但是实际情况很可能因为球面上的向心压力不均匀而使氘氚物质被挤出。如,在重离子束轰打下,两邻束的缝隙间会出现压力偏低的情况,导致氘氚物质从这缝隙挤出逃逸。这时若增加打靶路数,可能有助于该问题的解决。这也正是激光惯性约束科学家对重离子惯性约束原理提出的一项重要质疑。针对此,现在提出了HIDIF方案。在封三图3中,显示了一只聚变靶丸在重离子转换为X光的辐射下被驱动点燃的装置原理。左右两个能量转换器,使重离子的动能转变成软X射线辐射能。在转能器中,用密集强重离子束流轰打并使之伫阻在一个固体转换靶(采用海棉状Be镀金属)中,其焦斑半径1.7mm,在6ns内可淀积3MJ能量,达到5~10keV的温度,从而产生很强的软X射线辐射。再用这X射线来加热、压缩和点燃聚变靶丸。图中部的黑球是聚变反应的核燃料,黄色的汽化壳消熔产生的蒸汽压将产生激波来压缩和加热靶内核燃料,直到压缩到原体积的1/1000时(即靶丸半径被压缩到1/10时),靶丸将被点燃,聚变核反应也随即发

生。计算表明,软X射线流给靶丸提供了一个空间均匀的辐照源。只要内爆炸时球对称的精度在1%以内,点火就将获得成功。为了有效地利用转能器产生的辐射,整个系统必须封闭在一个谐振腔中,腔内壁镀金,以使X射线聚焦在靶丸表面上。

参考文献

- [1] L. W. Smith ed. Proceeding of the Heavy ion Fusion Workshop(1977) BNL-50769 UC-21, New York
- [2] 戴光曦. 重离子束引发可控聚变反应. 重离子物理(戴光曦等著). 原子能出版社, 1980, 283~324
- [3] R. Bock GSF 84-17 Report 1984
- [4] 戴光曦. 重离子束聚变装置. 核物理动态. 中国科学院近代物理所出版社, 1985, 2(4): 2
- [5] R. Bock, in Large Facilities in Physics, World Scient. Publ. (1995); R. Bock, Ion Beam Inertia fusion, in Atomic Physics Methods in Modern Research (K. Jungmann et al., eds) Springer Heidelberg, 1997, p. 211-230
- [6] GSF Nachrichten GSF 3/99 18, GSF 1/97 11 and GSF 6/96 17
- [7] I. Hoffmann and G. Plass Overview of the HIDIF Scenario in 1995-1998 HIDIF ed by R. W. Hasse, p39, (2000)
(责任编辑 蔡德诚)

科技动态

“飞行骆驼”——有“驼峰”的飞机

据英《新科学家》2000年6月10日报道:大型喷气式客机的机身很长,起飞时就需要更长的跑道,在很多机场上,这种特别长的客机操纵起来,尤其是在拐弯时是非常不方便的;为了缩短机场跑道,便于操纵,波音飞机公司设计了一种机身既短又能多载乘客的大型喷气式客机。这种飞机的外型从侧面看有点像骆驼的两个驼峰。这两个“驼峰”实际上是在飞机的背上附加的两个乘客坐舱,

成为有双层乘客坐舱的骆驼式机身,因此,机身虽然短了,但乘客坐位反而更多。

在机身的两个“驼峰”之间的“腰部”有一个斜坡,是连接前后舱的走廊,因此不需要太平门。波音公司的人员称,这种有驼峰外形的机身出乎意外地能降低飞行中的阻力,因而增加了巡航速度,也补偿了“驼峰”增加的重量所造成的速度损失。
(刘先曙)

环保型口香糖

据英《新科学家》2000年6月10日报道:口香糖也称泡泡糖,它虽受人青睐,但它也可能粘掉你的假牙。最大的毛病是吐出的“渣滓”污染环境,粘在地板上、地毯和人行道上后,极难清除。

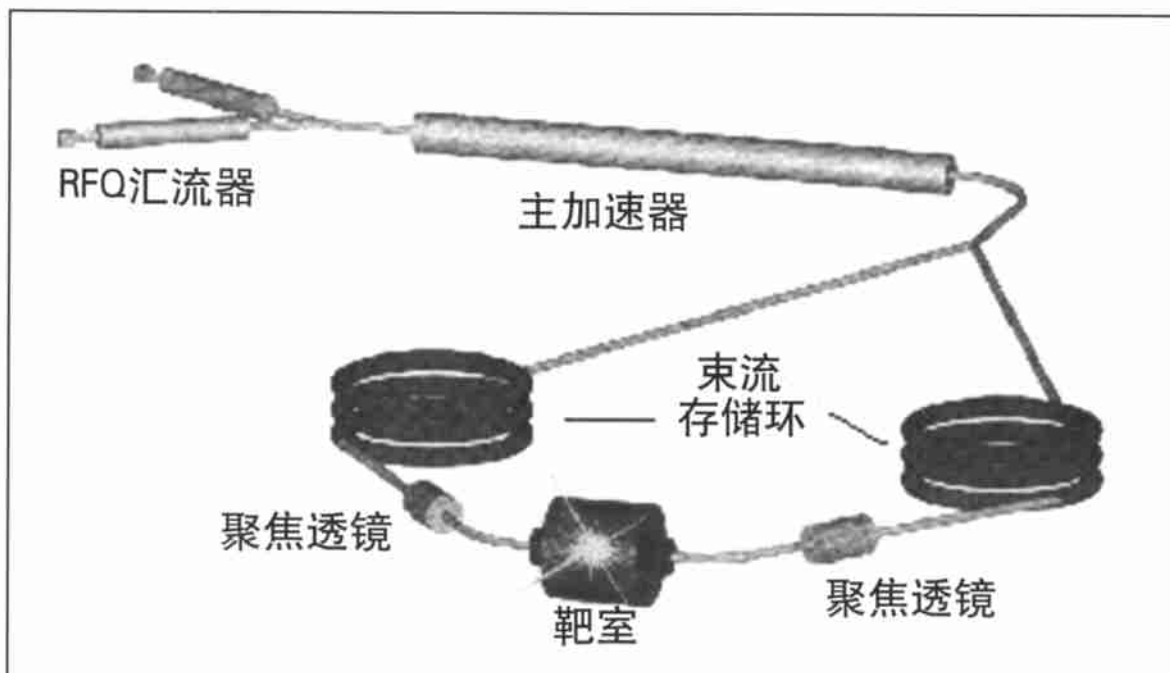
传统的口香糖之所以有粘性,问题出在所用的软树脂上面,它的好处是能使口香糖在咀嚼时变软,但它是一

种非常有粘性的软化剂。而新的口香糖用谷物中的蛋白质和一种叫乙二醇的增塑剂作软化剂。当把这种混合物软化剂加热到40℃并揉成团时,增塑剂就密封在变性的蛋白质基体内。结果,就觉得口香糖很软,但却没有粘性。

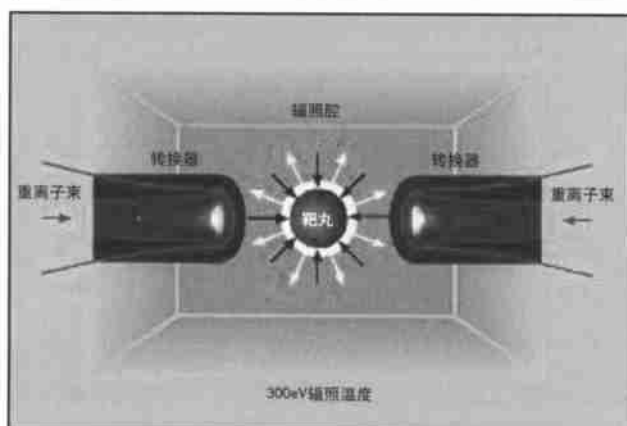
(刘先曙)

重离子惯性约束核聚变

(见戴光曦文)



▲ 图1 重离子惯性约束聚变装置



◀ 图3 聚焦靶丸被驱动点燃的装置原理

▼ 图2 聚焦透镜测试原理图

