

能 量 放 大 器

加速器驱动反应堆获得干净核能的新思路

郁 忠 强

(中国科学院高能物理研究所)

不久前,西欧核子中心主任、诺贝尔奖金获得者鲁比亚(C. Rubbia)领导的一个小组从高能物理实验中常用的量能器概念出发,提出了一个提供干净核能的新概念:利用高能强流质子加速器(能量 0.8—1.5 GeV,平均流强 $\sim 7\text{mA}$)产生的高能质子束,在物质中形成核级联过程而产生大量的中子,天然钍(^{232}Th)俘获中子而转变为裂变元素 ^{233}U , ^{233}U 又裂变产生中子维持链式反应。他们将这个装置称为能量放大器。装置启动后,裂变元素在天然钍中的比例很快可以达到相对稳定,形成一个长期稳定的能量产出。装置运行于次临界状态和相当低的中子通量下($\sim 10^{14}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)以确保增值过程的稳定持续和设备无临界危险。其废料中长寿的锕系元素极少,大大简化了核废料的处置难题,而且不产生武器级的核燃料,避免了核扩散的担忧。

鲁比亚等人提出的这个新概念引起了许多物理学家的浓厚兴趣。初步的蒙特卡罗模拟结果表明能量放大器的工作是可行的,但尚有待进一步的理论探讨和实验证实。

核能反应堆

从发达国家经济发展的历史可以看到,在某种程度上,一个国家的经济发展依赖于足够的能源供应,高速的经济发展必然伴随着能源消费的高速增长。历史上人类经历了以生物质为主和以煤为主的第一代和第二代能源时期之后,二十世纪进入了以石油为主的第三代能源时期。然而人们清楚地知道,地球上的石油资源是有限的。根据目前地质勘探的评估,地球上全部石油储藏量大约在 $3-4\times 10^{11}$ 吨。按全世界54亿人计,平均每人的占有量仅仅55—75吨。随着经济的发展,人口的增长和石油年消费量的增长,专家们估计,按目前的石油消费速率,人类大约会在2070年时面临石油枯竭的危险。

核能受到越来越多国家的重视。自六十年代以后,许多国家纷纷建立核电站解决能源短缺问题。目前全世界已有400余座核电反应堆在运行中,提供了大约400GW的电功率,占全世界全部电力供应的17%。核电有可能成为二十一世纪的主要能源,也就是人类发展史上第四代能源。

然而,在发展核能的同时,也带来了一系列的问题。首先是核电反应堆的安全问题,这包括反应堆的临界安全和放射性剂量安全。随着反应堆技术的发展和剂量监测的成熟,只要严格按照操作规程和剂量监测的规定,安全是可以得到保证的。其次是核燃料生产和核扩散的忧虑。最为严重的是核废料的处理问题。

四十余年的民用和军用核能和核材料生产留下了大量的废料。按性质分,核废料中主要是一些长寿的锕系元素,如 ^{237}Np (半衰期为 2.1×10^6 年)、 ^{243}Am (半衰期为 7.7×10^3 年)、 ^{243}Cm (半衰期为 9.3×10^3 年)等等;长寿的裂变产物,如 ^{99}Tc 、 ^{129}I 等,和寿命不太长但放射剂量很大的裂变产物,如 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 等;还有大量的被激活的反应堆结构材料。

典型的输出功率为1GW的热反应堆一年约用30吨铀燃料(^{235}U 的浓缩度为 $\sim 3\%$)。运行一年后,剩余的燃料中约有0.3吨的Pu,1吨的裂变产物(包括 ~ 21 公斤的Np、Am、Cm等锕系元素),还剩余28.7吨的铀(^{235}U 的含量降至 $\sim 1\%$),同时还有12.5吨的激活材料。这些剩余燃料放置二年后,还有极强的放射性。经过处理后,中等放射性废料约占1000立方米的体积,高放射性废料约占3立方米,而结构材料约占12立方米,它们的总放射性仍高达 3×10^7 居里。处理这么大量的废料,不仅需要大量的投资,而且还带来严重的环境问题。一般说,经过一百年后,这些废料的总放射性可降低至十分之一,一千年后降至十万分之一,其余的放射性将在一百万年内慢慢衰变掉。

核废料的转化和核燃料的增值

人们很自然地想到,能不能将核废料中的长寿命锕系元素和裂变产物转化成裂变元素或短寿命的其它元素。近年来世界各国科学家提出了许多方案,大多数方案都是基于利用快中子。因为典型的核废料就是在热中子通量为 $\sim 10^{14}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的反应堆中产生的,大部分中子俘获截面高的核已经被转化成俘获截面较小的核。在高通量的快中子反应堆中,有利于废料中的长寿命锕系元素和裂变产物的转化,因为它们有较高的裂变截面和俘获截面之比。几乎所有的建议都将废料的转化和核燃料的增值或提供能源结合起来。建

议的装置有快中子增值反应堆、专用的铀系元素燃烧炉和加速器(加速器的粒子束可以是质子,也可以是氘核或电子)驱动的次临界装置。

Los Alamos 实验室的 Bowman 等人提出的一个建议曾受到人们的关注。他们建议建造一台高能强流质子加速器(质子能量达 1—1.6GeV, 平均流强达 150 mA), 输出的质子打一个金属靶(例如 Pb-Bi 靶)产生大量的散裂中子, 经慢化后慢中子通量高达 $\sim 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 核废料在如此高的热中子通量下被有效地转化。例如核废料中的长寿命铀系元素 ^{237}Np 可以以较大的几率相继吸收两个中子而裂变。核废料中的长寿命裂变产物, 如 ^{99}Tc 和 ^{129}I 也可以在中子通量下转化成稳定同位素。较短寿命的 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 等裂变产物也可以转化成其它半衰期更短的同位素。该装置将是一台很安全的次临界装置, 加速器的束流一旦中止, 链式反应将停止。另外, 它在转化核废料的同时, 又能得到核燃料的增值和提供核能。原则上讲 Bowman 等人的建议是可行的, 但技术上和工艺上有较大的难度。按目前的加速器技术, 要建造一台能量为 1—1.6GeV, 平均流强达 150mA 的质子加速器不是一件容易的事。另外, 中子通量为 $10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级的反应堆工艺技术也是一个新的课题。

到目前为止, 核废料的转化仅仅停留在方案的讨论和初步研究阶段, 还没有建成一台大规模的废料转化装置。从技术上讲仍然存在着相当的难度有待人们去解决。

量能器

在高能物理实验中, 经常采用量能器测量高能粒子的能量和位置。典型的量能器是由多层重金属(如铅、铁)和多层取样探测器(如闪烁体、丝室)相间叠成的夹心式结构。当高能粒子通过它的时候, 能量将沉积在探测器的介质层中, 而产生的次级带电粒子由夹层中的探测器测量, 由此可以确定入射高能粒子的能量。实验上发现, 量能器测量到的质子能量沉积和相同能量的电子相比时有些丢失。原因是质子和物质的相互作用不同于电子, 高能电子和物质的相互作用主要是电磁簇射过程, 而高能质子和物质的相互作用主要是核级联过程, 会产生次级中子。由于探测器对中子不灵敏, 引起测量中能量沉积的丢失。物理学家们提出, 在量能器的介质层中采用包含一定成分的裂变物质材料(例如铀), 由于裂变的发生而对于入射的高能质子的能量沉积有“补偿”作用。实验测量结果, 却发现了过补偿作用。这是很多年前就知道的实验事实, 但很少人去注意在量能器中产生的热量。我们可以把这种能量的过补偿看作是一种能量的放大作用, 放大作用主要来自裂变材料的增值和裂变。如果加速器获得流强足够大的高能质子束, 在重核靶中产生大量中子, 然后通过 ^{232}Th 转化为 ^{233}U , 即 ^{232}Th 俘获

中子成 ^{233}Th , ^{233}Th 按 22 分钟的半衰期衰变为 ^{233}Pa , 并发出 β 射线, ^{233}Pa 按 27 天的半衰期继续衰变成 ^{233}U , 并发出 β 射线。 ^{233}U 可吸收中子而裂变放出能量。量能器设计成可以得到尽可能高的过补偿, 达到高的能量增益, 然后将量能器中的热能转化成电功率提供使用。鲁比亚等人将这种装置称为能量放大器, 如图 1 所示。

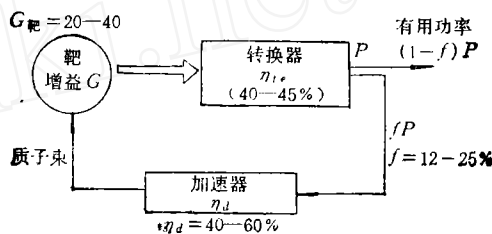


图 1

鲁比亚等人提出的建议中, 采用天然钍作核燃料。大家知道, 钍本身不是裂变材料, 钍在自然界中的丰度比铀高, 而且它是纯的同位素, 几乎 100% 是 ^{232}Th , 它可以俘获中子转化成裂变同位素 ^{233}U 。在一般的核反应堆中, 用天然钍作为反应堆的装料, 要达到自持的增值链式反应是很困难的。一个 ^{232}Th 核必须相继俘获两个中子才能得到一次 ^{233}U 的裂变, 而一次 ^{233}U 裂变产生的次级中子数 $\eta = 2.29$ 。原则上说, $\eta \geq 2$ 就可能达到自持链式反应。但实际装置中必须考虑中子的泄漏和其它材料的俘获, 所以 ^{232}Th - ^{233}U 的自持链式反应是无法维持的。显然, 采用天然钍作反应堆的装料必须由外面提供中子。这就要求引入加速器作为中子源, 以驱动和维持 ^{232}Th - ^{233}U 的不断增值和裂变过程。

由钍作为核燃料, 和通常的铀相比, 最大的优点是不易产生长寿命的铀系元素废料。从能量放大器的角度看, 在获得足够的能量增益下, 装置运行于次临界状态, 中子通量尽可能低, 不仅保证运行的安全性, 而且不容易产生长寿命的铀系元素废料, 大大减轻了废料处置的困难。

Bowman 等人建议的核废料转化, 是在 $10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 中子通量下使长寿命的铀系元素(如 ^{237}Np 等)俘获中子后转化成裂变元素, 而鲁比亚等人的新思路是从量能器的概念出发在尽可能低的中子通量下 ($\sim 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 使 ^{232}Th 转化成 ^{233}U , 并且尽可能少地产生长寿命铀系元素废料, 从根本上解决核废料的难题。这是两个不同的概念。

蒙特卡罗模拟研究

能量放大器的原理是否正确, 能不能得到能量的增益, 装置的性能和指标如何, 都必须进行仔细的研究。在高能物理中已广泛采用蒙特卡罗模拟方法对各种物理问题进行研究, 对于高能质子在量能器中的行

为有比较成熟的蒙特卡洛程序提供使用。另外,目前已经有了相当完备的核数据库。这就给能量放大器的蒙特卡洛模拟研究提供了很好的条件。我们可以量能器的概念作为出发点,按以下两种配置进行蒙特卡洛模拟,对能量放大器的原理、设计思想和性能指标作比较全面的研究。

1. 不用分离靶的水冷能量放大器。采用加压水作为慢化剂和冷却剂,要求质子加速器的能量为 $T = 1$ GeV,平均流强为 $I = 7$ mA,束功率达 $P_b = 7$ MW,燃料为天然钍,作为小的球状或圆柱状。钍本身就作为质子束的靶,产生散裂中子。这样可以最有效地利用中子,达到高的增殖和裂变。

2. 分离靶的气冷能量放大器。加速器要求同上,中子产生靶采用重金属(Pb-Bi混合),石墨作慢化剂,高温高压气体(如氦或氦和二氧化碳的混合气)作冷却剂。由于气体可工作于较高的温度,可以获得较高的热电转换效率。

燃料和慢化剂的配置使装置内链式反应不能自持,必须由加速器质子束驱动。质子束一旦阻挡,链式反应就停止。装置处于次临界状态,为了保证任何情况下不出现临界,要求中子通量维持在 $10^{14} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级。天然钍作燃料,一次装料约5吨,密封于装置内,整个装置运行一定时间后将达到稳定的 ^{232}Th - ^{233}U 增殖和 ^{233}U 的裂变。 ^{233}U 的成分保持不变($\sim 1.2\%$), ^{233}U 不断增值,不断燃烧。

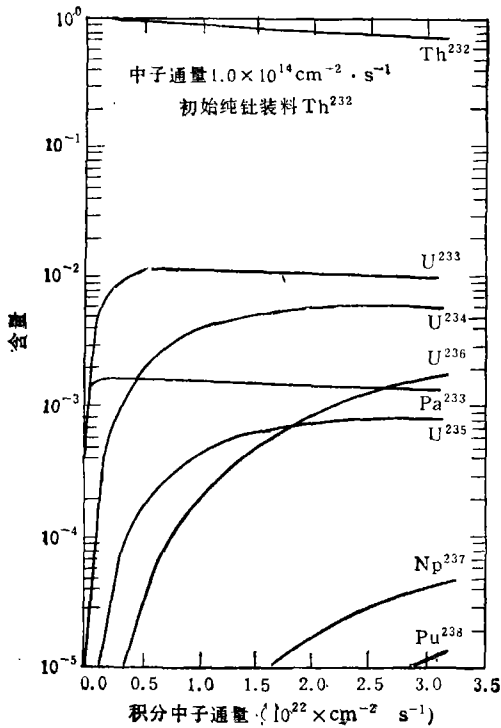


图 2

靶物质和燃料在一个密封舱内,冷却剂仅将热量带走。连续运行数年后(譬如说2—4年),根据裂变产物的积累程度,决定停止运行,重新装料。

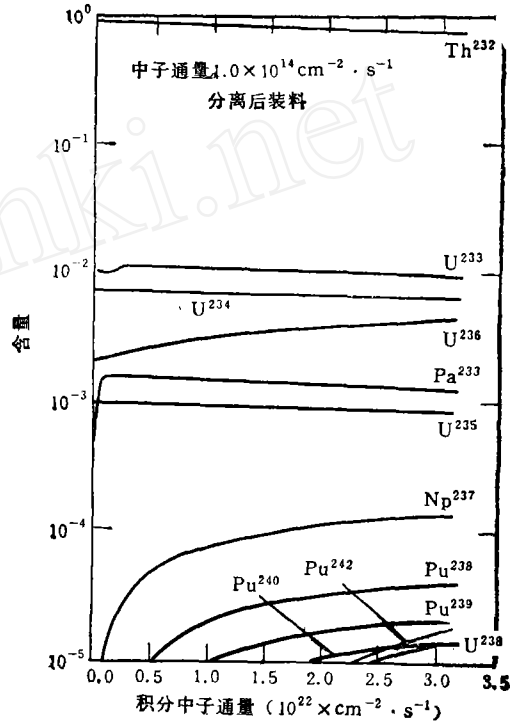


图 3

模拟研究结果指出,7MW的束功率将产生280MW的热能,能量放大器的增益可达到 $G \sim 40$ 。假定热电转换效率为 $\sim 30-40\%$,大约能获得100MW的电能。假设加速器的效率为35%,即加速器需要的电功率为 ~ 20 MW。这样整个装置的能量收益为 ~ 80 MW。

图2给出了在中子通量为 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,装料中的Th, U, Np, Pu等同位素含量随积分中子辐照通量的变化。从图中看出,经过一定时间后, ^{233}U 的含量保持一定的常数(约1.0—1.2%),而产生的长寿命锕系元素 ^{237}Np 较少。经过四年运行后(相当于积分中子辐照通量约为 $8.8 \times 10^{22} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ^{237}Np 在装料中的含量小于 10^{-3} ,即0.5kg。生成的 ^{239}Pu 小于0.05kg。和通常的核能反应堆相比较,废料中的长寿命锕系元素少得多。废料经过化学分离,将裂变产物分离出去,剩下的废料中包含有一定量的 ^{233}U 和 ^{235}U ,这可以用作第二次装料,这样可以缩短第二次装料启动后达到稳定运行的时间。从图3中可以看出,第二次装料后产生的长寿命锕系元素 ^{237}Np 在废料中的含量将略有增加,但四年后仍小于0.5kg。生成的 ^{239}Pu 仍小于0.05kg。

高能质子加速器

能量放大器中的加速器用作外来的中子源,在确定加速器的指标时,最主要的是考虑束流打击靶物质时有效地获得尽可能多的次级中子。实验上已经清楚地知道,次级中子产生的多少强烈地依赖于入射束的能量和性质。一般选择质子束,打击重金属靶,中子产额在几百 MeV 以上很宽的能量范围内正比于质子束的能量。假设加速器的质子能量 $T = 0.8\text{GeV}$,质子束的平均流强为 I ,则束功率为 $P_b = TI$ 。假定要求输出的热功率为 P ,该能量放大器的能量增益为 $G = P/P_b = P/TI$, $I = P/GT$ 。典型的参数为: $G = 40$, $P = 250\text{MW}$,则要求平均流强 $I = 7.18\text{mA}$,束功率达 $P_b = 6.25\text{MW}$ 。这样要求的加速器指标十分接近研究用的加速器,和目前已经运行的类似加速器的指标十分接近。在目前的加速器工艺技术条件下,实现这样的指标没有什么原则性的困难。可能的选择有两种加速器结构,直线加速器或同步回旋加速器。

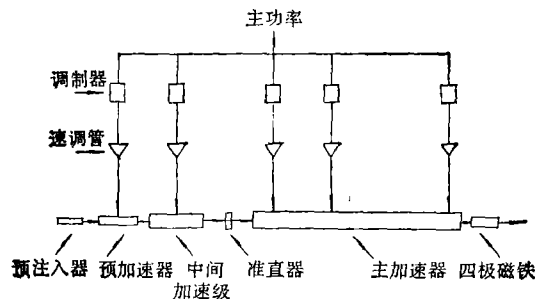


图 4

可能的直线加速器的原理框图如图 4 所示。它包括质子源、预注入器、预加速器、中间加速级、主加速器和束流输运系统组成。预加速器可以是高频四级加速器 (RFQ),将质子预加速至 2MeV 。中间加速级可采用漂移管直线加速结构,将质子加速至大约 25MeV 的

能量,经过准直后进入主加速器。主加速器可以采用常规加速腔或超导加速腔。常规加速腔平均能量增益可以达到每米 1.5MeV ,所以对 $0.8\text{—}1.5\text{GeV}$ 的质子直线加速器是相当长的结构,总长度超过 1公里 。采用超导腔结构平均能量增益可达到每米 $\sim 6\text{MeV}$,加速器的总长度只是普通加速腔结构的三分之一。但超导腔的结构带来了设备和运行的复杂性。超导腔结构是目前先进的工艺技术,需要更多的开发和研究。

同步回旋加速器和直线加速器相比有明显的优点:体积小,结构简单、价格便宜。能量低于 1GeV ,平均流强小于 10mA 时,合理的选择是固定场交变梯度回旋加速器 (FFAG)。它的加速器电流的限制主要是低能时的横向空间电荷效应。原理框图见图 5。它的低能加速部分和上述直线加速器方案相同。质子源和预注入器以后是由 RFQ 组成的预加速器,将质子束加速至 2MeV ,然后采用漂移管结构组成的中间加速级将质子加速至 $\sim 25\text{MeV}$,在经过第三个加速级将质子能量加速至固定场交变梯度回旋加速器注入所要求的能量值。固定场交变梯度回旋加速器是由几个扇形强聚焦磁铁单元组成。质子在磁铁隙中的真空盒内回旋。扇形磁铁的数量决定于要求的能量,对 0.8GeV 的能量,大约需 $8\text{—}10$ 块扇形磁铁。在扇形磁铁之间的空间用来插入高频加速腔和注入、引出通道。高频运行在一个固定的频率,质子束是连续束流,在真空盒内被同步加速。束流有效的引出是最重要的关键技术,因为束流过多的损失将引起加速器和周围设备产生强的放射性,给辐射防护和维修将带来很大的困难。

提供商品能源的可能性

基于能量放大器提供核能源的新概念刚刚提出,目前还处于初步的研究阶段。要给这种方法以明确的评估是十分困难的。一方面有待于进一步的研究和发展工作,另一方面也涉及到许多复杂的因素。然而,从

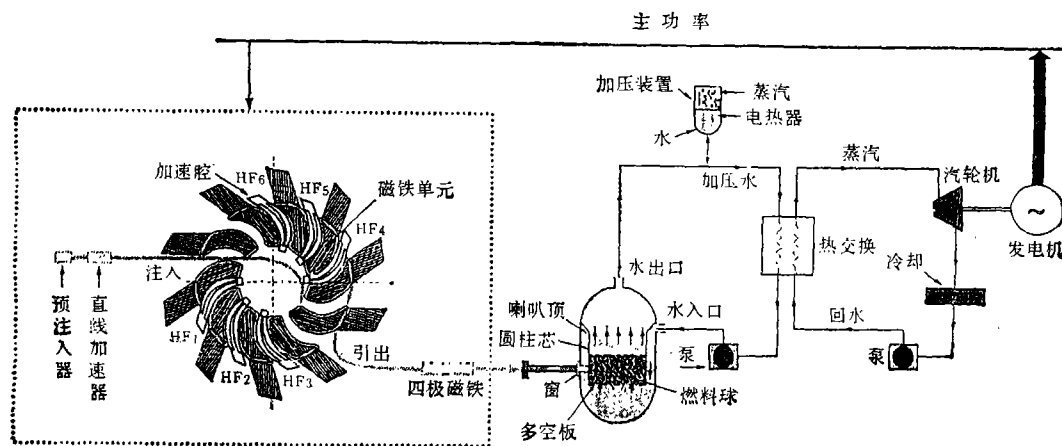


图 5

$B^0-\bar{B}^0$ 混合的时间关联性的实验观测

张 良 生

一、CP 破坏与 $B^0-\bar{B}^0$ 混合

在微观世界里,用“波函数”来描述微观客体的状态,它通常是位置和时间等的函数,波函数的平方表示粒子该时刻在给定位置具有的几率.把波函数中的位置矢量变号,称空间反演(P),它相当于把参考系从右手坐标系变成左手坐标系或反之.空间反演的结果,得到波函数的一个量子数:宇称(P的本征值).连续两次空间反演,波函数就变成原样,所以,宇称只能取两个值:要么+1要么-1.人们原设想,空间反演(采用右手坐标系或左手坐标系)是人为的事,波函数本身的宇称不应该受影响,也就是说宇称是不变的.李政道和杨振宁发现,当时人们认为不同的两个粒子 θ 和 τ 实际是同一个粒子(K介子),但它有时弱衰变到宇称为+1的末态,有时弱衰变到宇称为-1的末态.有没有可能是在衰变过程中宇称改变了?果然,发现以前关于宇称守恒的结论并没有经实验证实过.他们大胆地提出:宇称在弱作用下或并不守恒.紧接着吴健雄领导的小组证实了这个假设.兰道、萨拉姆、李政道和杨振宁等人又设想,如果空间反演的同时再把粒子变成反粒子(即CP变换,C是电荷共轭变换,或称粒子反粒子变换),CP本征值是否守恒?几年后的实验证明,弱作用下CP本征值也不守恒(即CP破坏).

由此可见,K介子是一个很值得注意的粒子.人们还注意到, K^0 与 $\bar{K}^0$ 许多性质虽很相近,却又互为反粒子.由于CP破坏, K^0 与 $\bar{K}^0$ 可以互相转变,通常称为混合.实验中观测到了这种混合,而且观测到

其原理和已有的知识和经验还是可以进行一些讨论,探讨能量放大器作为商品能源的可能性.

对能源的价格估算本身是一件十分复杂的事情,它涉及到许多方面.除了生产能源所需的实际价格外,还和一个国家的能源政策、环境政策、废料的处置等有着密切的关系.

和通常的核电站相比,能量放大器用天然钍作燃料,不象通常的核电站中用的铀燃料必须经过化学工厂的浓缩,相对讲比较便宜.整个系统的结构和安全方面的要求都比较简单.系统所涉及的技术都是比较成熟的.随着技术的发展,特别是加速器技术的发展,经济指标将得到改进.由热转换为电的所有设备都是成熟的工业设备.

K^0 与 $\bar{K}^0$ 数量的比值会随时间周期性地变化(即混合的时间关联性或称“振荡”),就像两支本征频率相近的音叉接近时,通过空气耦合产生“拍”的现象一样.有人曾假设,或许是引力作用导致了它们的混合与振荡,但实验证明不太可能是由于引力.李政道进一步假定,自然界或许还存在着毫弱作用或超弱作用.

B是含有b夸克的强子,包括 $B_1^0=(\bar{b}u)$, $B_2^0=(\bar{b}d)$,和 $\bar{B}_1^0=(b\bar{u})$, $\bar{B}_2^0=(b\bar{d})$. $B^0-\bar{B}^0$ 系统与 $K^0-\bar{K}^0$ 复合系是非常相似的.所以,有必要对 $B^0-\bar{B}^0$ 系统作类似于 $K^0-\bar{K}^0$ 复合系的测量,以便从新的角度进一步了解混合现象的原因.为此,B物理也就成了近年来高能物理研究的热点之一. ARGUS 和 CLEO 组首先用实验证实, B^0 与 $\bar{B}^0$ 的确有混合. ALEPH 和 DELPHI 组进一步得到了 $B^0-\bar{B}^0$ 混合的时间关联性测量的首次结果.

薛定谔方程是描述微观客体行为的方程式之一. B^0 与 $\bar{B}^0$ 都不是薛定谔方程的本征解,本征解是 B_1 与 B_2 . B_1 与 B_2 各有确定的质量与寿命; B^0 与 $\bar{B}^0$ 分别是 B_1 与 B_2 的线性组合.若CPT(CP变换的同时让时间T也反号)守恒,则 B^0 与 $\bar{B}^0$ 的质量是相等的,而 B_1 与 B_2 的质量可以不同,它们的质量差表示成 Δm .假定在起始时刻($t=0$)产生的纯粹是 B^0 ,由于一部分 B^0 通过上述过程转变为 $\bar{B}^0$,到t时刻仍是 B^0 的几率为: $P(t)=0.5\exp(-\Gamma t/\hbar)[1+\cos(\Delta m \cdot t/\hbar)]$.对时间作积分,可得由 B^0 变成 $\bar{B}^0$ 的总几率正比于 $[(\Delta m/\Gamma)^2/(1+(\Delta m/\Gamma)^2)]$,其中 Γ 为衰变宽度: $\Gamma=(\Gamma_{B_1}+\Gamma_{B_2})/2$.从纯粹的 B_2^0 变到 B_1^0 与 $\bar{B}_2^0$ 各占一半,约需 2.2τ , τ 是 B_2^0 的本征寿命,在LEP能量下,

总的说来,能量放大器组成干净核能源的优点是明显的.自然界有丰富的钍资源,污染小,废料处理简单,无核武器扩散的危险性,采用目前比较成熟的技术可以建比较小的单元,几个同样的单元就可构成一个发电站.这种系统特别适于发展中国家对能源的迫切需求.

能量放大器的新概念目前还只是理论上的探索和研究,不久将在西欧核子中心作原理性的实验验证.从长远的能源观点出发,这无疑是一个很重要的研究和发展课题,它涉及到高能物理、加速器技术和反应堆工艺等各个领域的综合性应用发展工作.一旦成功,它将有广阔的前景,很可能会影响未来能源工业的发展方向.