

医用电子直线加速器驻波加速原理

孙立莹



带电粒子加速器是用人工方法借助不同形态的电场,将各种不同种类的带电粒子加速到更高能量的

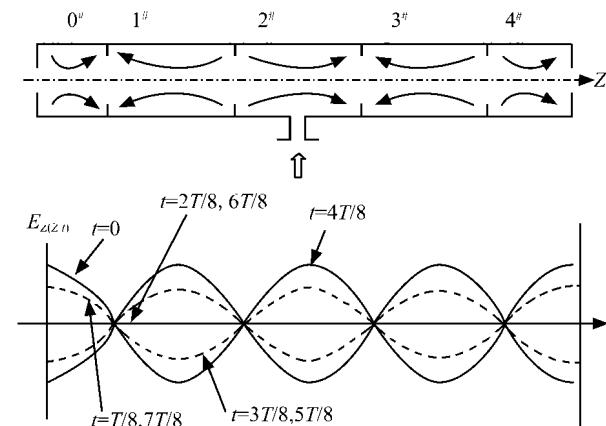
电磁装置。电子直线加速器是利用微波电场加速电子,使其具有直线运动轨道的加速装置。尽管 20 世纪 60 年代后期驻波电子直线加速器发展迅速,但其原理并不新颖。早在 20 世纪 40 年代中期,不少研究小组在研究行波电子直线加速器的同时,就已利用驻波电场加速电子。电子直线加速器有两种可供选择的工作方式,即行波工作方式和驻波工作方式。行波工作方式是在加速管末端接上匹配负载,以吸收多余的能量(这当然是一种浪费);驻波工作方式就是加速管末端不接匹配负载,而接短路面(即反射面),使微波在终端反射,反射的微波沿电子加速的反方向前进,若加速结构的始端也放置短路面,则上述反射功率在始端再次被反射,若加速管长度合适,则反射波和入射波相位一致,合成以后加强了入射波,如此循环,在加速管内形成驻波状态。

美国麻省理工学院的斯莱特等人在 1947~1948 年间就曾指出:当加速管比较短时,驻波加速方式比较有利,即在相同的微波功率、相同的加速结构下,可以使电子获得更高的能量,他们于 1951 年建成一台工作于 π 模的驻波直线加速器,将电子能量加速到 18MeV。

然而,在此后的十二三年间,一直找不到一种既适合驻波加速工作方式,又具有竞争力的驻波加速结构。因为用两金属板短接盘荷波导(是一种能形成轴向电场的管状器件)而构成的驻波结构虽然简单,但分流阻抗低。而且,工作在 $\pi/2$ 模时,有半数腔只起耦合作用,对能量增加没有贡献,加速效率很低;而工作于 π 模时,由于模式分隔窄,腔数不能太多,以及群速度很低不利于稳定工作,因此这种单周期驻波加速结构没有竞争力。

20 世纪 60 年代初,美国洛斯阿拉莫斯实验室为了建造 800MeV 的介子工厂,研究过多种驻波加速结构,后在克拉勃(E. A. Knapp)等人领导下,终

于研制出一种新的驻波加速结构——边耦合驻波加速结构。它是把工作在驻波工作状态 $\pi/2$ 模时只起耦合作用的腔,从束流轴线移到加速腔的边上,耦合腔留下来的空间为加速腔所扩展占有。加速腔通过边孔和耦合腔耦合,相邻两个加速腔相差 180° 。此结构既具有 π 模的效率,又具有 $\pi/2$ 模的工作稳定性,分流阻抗高、工作稳定性好、管件加工要求松(即允许误差可以大一些)。美国瓦里安公司很快将其按比例缩小,把原来适合加速质子的结构改成适合加速电子的结构,于 1968 年先后成功地把边耦合结构投入医用和无损检测用的驻波电子直线加速器,这是一种里程碑式的突破(发现 TM_{01} 模是第一个里程碑)。自此有了磁轴耦合的双周期结构、三周期结构,双腔耦合三周期结构,电轴耦合双周期、三周期结构,交叉式高梯度驻波加速结构等等。



π 模工作的驻波腔链场分布示意图

我们在盘荷波导加速管里激励起一种具有纵向分量的电场(即 TM_{01} 模),两头接上短路面,即成为驻波加速管(如图所示)。从图可知,每一腔内电场大小及方向是随时间交变的,但这种随时间振荡的轴向电场振荡的包络线却是固定的。即电场是位置和时间的函数 $E_z(z, t) = E_z(z) \cos \omega t$, $E_z(z)$ 为电场的包络线,可分解为不同的谐波 $E_z(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos [(2n+1)\pi z/D]$, A_n 表示各次谐波的幅值。不同的驻波结构由于边界条件不同, $E_z(z)$ 形状会有差别。

当 1[#] 腔中的电场随时间逐渐变大,而方向又适合加速电子时,2[#] 腔中的电场方向却是减速的;当

放射性核束在标准模型检验中的应用

周书华

利用放射性核束开展多学科的物理研究,是当前低能核物理研究的一个重要方向。传统的加速器一般只加速稳定的荷电粒子。而自 90 年代开始发展起来的放射性核束装置则可加速不稳定的核素。我国兰州近代物理研究所和中国原子能科学研究院正在建立不同类型的放射性核束装置。这些装置不仅可以用来将核反应与核结构等低能核物理中的传统问题扩展到更远离稳定线的区域,而且在标准模型和基本对称性的检验中,也发挥了独特作用。

标准模型以三代基本粒子和四种基本相互作用作为描述粒子物理乃至整个物质世界的基础,获得了极大成功,尤其是标准模型所预言的各种基本粒子(除希格斯粒子还在寻找外)都已在实验中被找到。但是,标准模型还明显地不够完备:如需要大量的用实验测量值拟合的参数、不能给出粒子的质量、对四种力没有统一的处理,不能解释现实世界中物质与反物质数量极不对称问题和宇宙膨胀问题等,是否只有三代费米子等问题也受到置疑。

放射性核束可为标准模型的检验提供有利条件,使标准模型更加完善和精确。电弱统一理论是标准模型的基础之一,其发展在很大程度上依赖于大量高精度的核物理实验。低能核物理实验可以严格地确定标准模型中的许多参数,因此是标准模型发展中的重要和灵敏的探针。这些实验不仅能补充高能物理实验的不足,而且由于核素与核的激发能级的多样性,可为研究人员提供更广泛的选择余地。例如可选择适当的核素和核的激发能级,以加强某个衰变道,提高测量精度。

在以核内的中子数为横坐标、质子数为纵坐标的核素图上,稳定的核占据的区域称为 β 稳定线,其他区域内的核素将发生 β 衰变而成为另一种核素。一般讲,处于偏离 β 稳定线 3~5 个中子以上的核素称为远离 β 稳定线(或远离 β 稳定性)的核素。那些适于用来研究相互作用基本性质的核素,往往是远离 β 稳定线的核素;如较重的质子数和中子数相等($N=Z$)的核素,由于其结构特殊(质子-中子对称)、寿命很短,而且其他核效应很小,是重要的研究对象;又如在原子物理实验中,电子能级的激光激发效应随核电荷的增长而快速增长,故选用重元素进行实验更为有利。

利用原子物理实验检验基本相互作用及守恒定律时,在选定核素后,还必须获得足够的强度。放射性核束有可能满足这一要求。

迄今对标准模型的检验有三种类型的实验。

(1) 标准模型各种相互作用的相对强度的测定。弱相互作用的矢量分量 G_V 的高精度测量非常重要,它可对标准模型是否只包括三代基本粒子进行精确检验。这些实验需要用到角动量与宇称为 0^+ 的两个态之间极快的 β 衰变(超容许跃迁)的特殊性质,放射性核束提供了选择这种特殊核素的机会。

(2) 在标准模型中,电弱相互作用可能存在矢量-轴矢量($V-A$)以外的其他数学形式分量的上限的测定。利用放射性核束进行实验,可极大地提高对这一上限值测定的灵敏度。

(3) 利用低能核物理实验的精确测量,检验宇称及时间反演等基本对称性破缺的问题。

$1^{\#}$ 腔中的场值随时间变成减速方向时, $2^{\#}$ 腔中的电场方向正好变得能加速电子。如果让电子在 $1^{\#}$ 腔中电场由负变正的一瞬间(场强是加速方向)注入腔中,电子在前进时,场强不断增强,电子不断获得能量;场强达到高峰时,电子也正好到达腔的中央,其后场强开始下降,但仍处于加速状态;当场强开始由正变负时,电子正好飞出 $1^{\#}$ 腔进入 $2^{\#}$ 腔,这时 $2^{\#}$ 腔中的电场正好由负变正,电子在 $2^{\#}$ 腔中又能不断获得能量得到加速。其余各腔也是如此。这样不断

加速电子的方式,就是驻波加速。

首台商品直线加速器安装于美国斯坦福大学医学院。60 年代中期,放疗进入直线加速器时代。我国首台医用 10MV 直线加速器于 1978 年诞生。电子直线加速器保留了电子感应加速器的优点,克服了其他加速器的缺点,成为目前放疗中的主流设备。到 1993 年底全世界已安装的医用直线加速器超过 3000 台,我国约有 300 台。

(安徽省安庆市第二人民医院放疗科 246004)