

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 稳定线,其他区域内的核素将发生 衰变而成为另一种核素。一般讲,处于偏离 稳定线 3~5 个中子以上的核素称为远离 稳定线(或远离 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 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 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)

现代物理知识

弱相互作用的强度和标准模型的检验

实验上已确定电弱相互作用具有矢量 - 轴矢量 ($V - A$) 的数学形式。理论表明, 矢量分量应该守恒, 即所谓的 CVC (Conserved Vector Current) 或矢量流守恒假设。这意味着, 复杂核衰变的 G_V 值与 u 夸克衰变为 d 夸克的 G_V 值是相同的。因此选择适当的核素, 找到只有矢量分量的衰变就可在夸克层次上对 G_V 值做出高精度的测定。

根据角动量守恒原理, 从 0^+ 态到 0^+ 态的跃迁应该是纯矢量分量的跃迁。假如从 0^+ 态到 0^+ 态的跃迁所涉及的两个核态是“同位旋相似态”, 则核结构的波函数简单、可计算。这类衰变称为超容许 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁。对 ^{10}C 、 ^{14}O 、 $^{26\text{m}}\text{Al}$ 、 ^{34}Cl 、 $^{38\text{m}}\text{K}$ 、 ^{42}Sc 、 ^{46}V 、 ^{50}Mn 和 ^{54}Co 九个超容许 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁已做过精确测量, 其强度测量误差小于 1%。这些数据已被用来检验 CVC 假设, 并提供了最精确的 G_V 值。这是利用低能核物理检验基础物理的一个特别成功的例子。

标准模型中的夸克在弱相互作用过程中可出现混合。例如, u 夸克在衰变后不是变成一个纯 d 夸克, 而是 d 夸克、 s 夸克和 b 夸克的混合。三代夸克间的混合由卡毕波 - 小林 - 增田 (Cabibbo Kobayashi Maskawa, CKM) 夸克混合矩阵所决定。CKM 矩阵顶行最大的矩阵元与 u 夸克和 d 夸克的混合有关。该矩阵元的最精确值是通过超容许 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁的 G_V 值与 μ 子衰变特性来确定的。虽然精确的超容许 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁数据的一致性强烈支持 CVC 假设, 但 CKM 矩阵的幺正性检验却偏离单位矩阵两个标准偏差以上。在三代基本粒子标准模型的基本检验中所发现的这个问题, 引起了许多理论推测。假如 CKM 矩阵的幺正性所存在的这个问题被证实, 将会给标准模型以极大的冲击。

在这些检验中, 最大误差不是来自实验误差, 而是来自必须对衰变强度实验数据所做的小修正的误差。这项小修正即核电荷和辐射修正。为此需对这项小修正, 特别是电荷修正, 进行仔细审查。这需要将实验测量扩展到较重的核的非同位旋相似态之间的弱衰变分支。这些跃迁通常是被禁阻的, 而电荷修正使得这些跃迁能够发生。在 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁的精确测量数据中, 只有很少几个属于跃迁到 0^+ 激发态的分支, 因此还不能得出结论。而利用放射性核束, 可得到强度足够、能产生 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁的

^{62}Ga 、 ^{66}As 、 ^{70}Br 和 ^{74}Rb 等较重的放射性核素。用这些核素进行测量有两个优点: 一是电荷修正理论计算结果表明, 这些重核的电荷修正值较大; 二是这些重核的衰变能较大, 可得到几个能达到测量水平的 0^+ 激发态。因此用原子序数 Z 较高的核素进行测量, 能进一步减小电荷修正引起的系统偏差。

然而, 这些测量还要求对重的 $N = Z$ 超容许发射体的寿命、弱分支比和能量有精确的测定。寿命和弱分支比的测量不仅要求有足够的产额, 而且要求利用高分辨质量分离器分离出十分干净的放射源。用新开发的潘宁阱质谱技术直接测量母核和子核的质量可实现衰变能的精确测量。这种质谱技术只需少量离子, 即可进行高精度质量测量。因此, 将放射性核束产生的短寿命核素注入潘宁阱质谱仪中便可完成测量。

标准模型延伸的极限

衰变所发射的不同粒子间的角关联公式早在几十年前就已经给出。通过观测可能对总角关联有贡献的各项, 可以测定电弱相互作用的 $V - A$ 结构。这种形式的电弱相互作用并不是标准模型的理论预言, 而是实验事实。因此, 非常精确的角关联测量能够揭示 $V - A$ 以外的贡献。这些核素一般处于 $N = Z$ 线附近。在此区域, 可选择特殊类型的跃迁, 如纯费米 (F) 跃迁、混合的费米/伽莫夫 - 泰勒 (G-T) 跃迁或纯 G-T 跃迁。它们分别适合于探索标准模型以外的各种特定物理规律, 如标量相互作用、右手流及张量相互作用等。为提取这些不同的观测量, 要求对以下一个或几个量进行测定: 粒子和中微子的动量、能量, 以及核和粒子初态和终态的极化状态。中微子的能量和动量不是直接观测量, 一般通过反冲核的能量和动量导出。

利用放射性核束提供的高强度和高纯度放射源可以大大推进这项研究。例如, 利用主要通过费米跃迁衰变的 ^{32}Ar 和 ^{56}Ca 的高强度的辐射源, 通过延迟质子的多普勒展宽能量分布的测量, 可进行电子 - 中微子角关联测定。所得结果可给出弱相互作用是否有标量分量及标准模型是否需要扩展的信息。在标准模型中, 衰变的半轻子奇异性守恒的过程是由强子和轻子流之间交换带电矢量玻色子来描述的。在点状相互作用的极限内, 这种相互作用对应于原子核衰变的矢量和轴矢量耦合。理论中排除所有其他可能的洛伦兹不变量 (标量、赝标量和

张量),这些奇特的相互作用将提供有关新物理的信号,如存在新的带电标量玻色子等。至今已精确测量了一些稀有气体,如通过测量 ^{32}Ar 的纯费米衰变来寻找标量玻色子的贡献,和测量 ^6He 纯G-T衰变来寻找张量类型的贡献等。与矢量和轴矢量相互作用相比,这些奇特相互作用幅度的上限为10%。

正在进行的其他实验,如对极化核发射 α 粒子极化度的测量,利用放射性核束的源强增加,提高测量精度。源强增加还可改变测量中的几何条件,有利于减少系统误差。这些测量对标准模型是否需要扩展给出了重要的约束条件,而比较直接的高能物理方法反而对这些观测量并不灵敏。

近年来正在发展的激光原子阱技术,可用来制备高纯度(同位素纯)、高强度、高极化度及厚度几乎为零的放射性同位素源。这项技术的成功会极大地推动本领域的发展。激光原子阱有多种形式,但在捕获放射性原子方面最成功的是磁-光学阱。这种原子阱利用1个弱的静磁场及6个沿三轴相对传播的极化激光束对特定同位素进行三维约束。放射性原子可通过低能放射性核束中性化和慢化而获得,它们被原子阱捕获后,即成为高精度测量所需的理想放射源。当前,原子阱只能有效地捕获碱金属元素,Na、K和Fr等元素已被捕获近 10^5 个原子,但这仍远低于密度为每立方厘米 10^{10} 个原子的稳定原子情况,不过已可用于大范围的 α 衰变角关联的初步测量。目前计划利用此方法的实验方案有: $^{38\text{m}}\text{K}$ 衰变中标量相互作用的探索;极化 ^{37}K 和 ^{21}Na 的衰变中右手流的探索;极化 ^{82}Rb 衰变中时间反演不变性和张量流的探索等等。所有这些实验将会得益于达到相当强度的放射性核束。

还有一些其他元素也可用于角关联测量,不过这些元素不易被磁-光学阱所捕获,可用离子阱作为其约束装置。离子阱对待捕获的同位素原子结构不敏感,故可用于任何种类的原子。其主要缺点是约束电磁场会扰动被研究的带电粒子的轨道,但可用于改进实验测量的几何条件,由于粒子的运动方向被限定,即使探测器距离源稍远也不会损失探测效率,而且还可减少散射次数。

还有一些实验也会得益于放射性核束流强和纯度的提高。例如,高强度的 ^{14}O 束流非常有利于测量 α 谱的形状及衰变到 ^{14}N 的分支比,这些结果可用于检验 α 衰变理论。从 α 衰变测得的G-T强度

分布数据和用其他技术(如强子探针)测得的数据有很大分歧,理论上已出现各种解释。丰质子轻核素由于有较大的衰变能,可用于对G-T强度分布做出更可靠的测定,以解开这一谜团。这不仅有利于检验核结构理论而且对星体核合成的研究和中微子探测器的刻度都会产生影响。特别是,如能得到每秒100~1000个 ^{32}Ar 、 ^{33}Ar 、 ^{36}Ca 、和 ^{37}Ca 原子的束流,这类课题在 α 衰变理论与星体核合成研究方面将会取得极其重要的成果。

宇称和时间反映不守恒的精确测量

近年来,研究原子中宇称不守恒的实验已成为检验电弱相互作用的新方法。核与围绕它的电子间的相互作用主要是电磁相互作用,但电子与核之间也可通过交换 Z^0 玻色子而发生相互作用, Z^0 玻色子的交换将引起原子能级间的微弱宇称混合。近来已对 ^{133}Cs 测出了这种极其微小的效应,精度达到0.5%。它非常强烈地依赖于核的电荷数,因此重原子能提供较灵敏的检验。碱金属原子的结构特别简单,最适于此类实验测量。预计最重的碱金属Fr原子的宇称不守恒效应要比已测到的精度最高的Cs原子的宇称不守恒效应高18倍。但Fr没有稳定同位素,只有利用放射性核束才能得到用于此项实验的较强的Fr同位素源。通过对相同元素的几个同位素的宇称不守恒效应的系统测量,可以大大消除原子结构不确定性带来的误差。因此,最好是利用置于激光阱中的一系列Fr同位素做这项实验。保守的估计表明,如要达到与其他方法相当的1%的实验精度,激光阱需捕获 10^8 个原子。因此,要求Fr同位素核束的强度为每秒 10^{11} 个。国际上目前正在建造的装置中,最高的将达到每秒 10^{10} ~ 10^{11} 的范围,在不远的将来有望进行这项难度极大的实验。

低能物理学中利用原子系统检验电弱相互作用的另一项课题是测量核单极矩。核单极矩是宇称不守恒的核子-核子弱相互作用产生的一种电磁矩。此种电磁矩效应是约束在核中的,因此只有轨道穿过核的电子才能受到核单极矩的作用。如前所述,核子和运动在核附近的电子之间直接交换 Z^0 玻色子,将在电子云中引起微小但能观测到的宇称混合。电子云与核单极矩的电磁相互作用将产生依赖于总角动量的原子宇称不守恒的信号。最近对 ^{133}Cs 的高精度宇称不守恒测量,已看到一些迹象。为证实这项成果,还需要做进一步的实验。同时,还要探索

另外的方法,以深入地了解核子-核子弱相互作用。

上述原子宇称不守恒和核单极矩的实验都只与宇称破缺相关,而与时间反演破缺无关。但在标准模型中,这两项对称性都是破缺的。这两项破缺的组合可造成电子(或其他尚未观察到的基本粒子)的电荷出现不均匀的分布。一个有磁偶极矩的核,当宇称变换或时间反演变换时,得到的物理客体相同(转动 180° 可以还原),即磁偶极矩遵从时间反演和宇称守恒。而一个核除有一个磁偶极矩外,如果还有一个由在核的一侧小区域内的附加电荷造成的附加的电偶极矩,那么,当宇称变换或时间反演变换时,得到的物理客体不同(通过简单转动不能还原)。因此,附加电偶极矩的出现,使时间反演和宇称守恒遭到破坏。标准模型给出的电子的电偶极矩不大于 $10^{-37} e \text{ cm}$,比现在实验所给出的极限值小100亿倍。而许多其他的模型却能给出较大的电子的电偶极矩。如实验中能观测到电子的电偶极矩大于 $10^{-37} e \text{ cm}$,就可肯定标准模型还不完善,还有新物理因素需要包括进来。某些模型预言电子的电偶极矩大约在 $10^{-28} \sim 10^{-31} e \text{ cm}$ 范围内,比现在的实验极限值小1~4个数量级,因此进一步实验必须至少达到这个灵敏度。

将一个具有自旋的粒子放在电场中,根据粒子自旋方向与电场电力线方向平行与反平行状态的能量差,可探测电子的电偶极矩。在中性原子中,价电子也受外电场作用。如选择一个极重原子的 $1/2$ 角动量态,相对论效应能极大加强价电子所受到的外电场极大地加强。对Tl(铊)元素的原子,此加强效应为580倍,对Fr原子为1150倍,此倍数超过以前实验用过的任何其他原子。所有探索电子电偶极矩的实验,实际上都与外电场中的原子钟研究有关。当电场方向相对于原子自旋方向倒向时,钟频发生的变化即电子电偶极矩的信号。这些实验精度的改进很大程度上依赖于原子钟技术的改进。新一代原子钟利用激光阱和冷却技术可使精度提高几个数量级,电子电偶极矩的实验精度也会因此相应提高,原因主要是激光阱中的测量时间可大大加长。此外,由于可利用慢原子以及可控制阱中原子内外自由度,因此在压低系统效应方面远优于目前的实验。

Fr原子易被捕获,实验上已成功捕获三种Fr同位素,它比以前用过的其他原子灵敏度更高。利用稳定同位素,被捕获和冷却的极限是 10^9 个原子。

由于Fr没有稳定同位素,还不能到此极限。Fr的这个缺点在强流放射性核束出现后可以克服,目前将放射源中的原子捕获到Fr阱中的效率是0.3%,经改进,预计会提高一个量级。利用捕获的Fr原子观测电子电偶极矩,可使灵敏度提高到 $10^{-30} e \text{ cm}$ 或更好。可以说,有了强流放射性核束,就可做出比现在灵敏度高上千倍的实验结果,可用它判断标准模型是否有问题、是否要考虑其他物理因素。

原子核也具有电偶极矩。近年来的理论计算表明,八极形变(梨形)可能使核电偶极矩加强,比现有最好的实验结果还大2000倍。利用捕获的具有强八极形变的 ^{225}Ra 核可测量核电偶极矩,大大提高核电偶极矩极限值的测量精度。为此,需要放射性核束产生强度足够的Ra放射源。

利用放射性核束还可进行其他基本相互作用的研究。如果核束是极化的,可用来研究核子-核子的弱相互作用,这是弱相互作用研究中最薄弱的部分。通过核能级的宇称混合可观测此种相互作用。为此,可寻找一个具有简单壳结构的核,它有两个紧挨着的总角动量相同而宇称不同的能级。如果这两个能级间有相互作用,则会发生宇称混合;如果其中一个能级的跃迁因其角动量或宇称的关系被减弱(禁阻跃迁),却因宇称混合而得到加强,则可检验基本对称性。此法在低能核物理中已较多采用,而放射性核束将提供更多的可进行这类研究的核素。

利用稳定极化束引起的转移反应,已使一些核素,如 ^{14}N 、 ^{18}F 、 ^{19}F 及 ^{21}Ne 等,产生极化,从而进行相关实验。在大部分情况下,此法得到的极化度及源强很有限。采用极化的放射性核束,可得到强度足够的上述核素,并将这些核素激发到有关能级上,然后观测该能级沿极化轴衰变的角分布。此法的最大优点是可以研究一对镜像核,如 ^{19}F 和 ^{19}Ne 之间的跃迁。利用它们核波函数的对称性,可使中子和质子相干或相消运动的两个分量明确地分开。

总之,放射性核束装置为检验标准模型和基本对称性的实验提供了新的机遇,开展这方面的研究工作有重要物理意义,也有望做出新的物理成果。

(北京中国原子能科学研究院 102413)

上标 m 代表 ^{26}Al 的寿命较长的激发态或称同质异能态。

镜像核指两个核中,一个核的中子数与质子数分别等于另一个核的质子数与中子数。