

$B^0-\bar{B}^0$ 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 $B_s^0 = (b\bar{s})$, $B_d^0 = (\bar{b}d)$, 和 $\bar{B}_s^0 = (b s)$, $\bar{B}_d^0 = (b\bar{d})$. $B^0-\bar{B}^0$ 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_s^0 变到 B_s^0 与 \bar{B}_s^0 各占一半,约需 2.2τ , τ 是 B_s^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.

2.2 τ 相当于 6 毫米的飞行距离。

二、事例与本底

1990 年以来, LEP 运行于 Z^0 能区 (Z^0 峰顶或上下 2GeV)。被加速到 45.6GeV 的正负电子束对撞产生 Z^0 , Z^0 又以很大的分支比衰变成 b, \bar{b} 夸克对; 它们从对撞点背对背飞出, 又通过一个碎裂和强子化过程使 \bar{b} 变成 B^0 , b 变成 \bar{B}^0 ; 然后, B^0 与 \bar{B}^0 又分别衰变, 这就是我们感兴趣的事例。

所以, 如果发现一个事例, 在对撞点的一边是 B^0 , 另一边是 \bar{B}^0 , 就认为 B^0 和 \bar{B}^0 都没有变, 这是一个“非混合”事例; 而如果对撞点的两边同时都是 B^0 (或同时都是 \bar{B}^0), 就说明其中必有一个 B^0 (或 \bar{B}^0) 转变成了对方, 这个事例就称“混合”事例。

在理论物理和高能物理中, 常常要计算粒子之间的相互作用, 此时往往会面对一大堆令人望而生畏的数学式。当然, 其中有些可以互相消掉, 有些可以合并, 但最后还是剩下很多项, 为此费曼对这些数学式作了精心的研究, 发现其中每一项都可以用一个图来表示, 每个图都有明确的物理意义。他还总结了几条简要的规则, 根据这些规则可以按不同的精度要求画出相应的图, 并写出对应的相互作用表达式, 算得所需结果(角分布等), 从而使本来非常繁杂的计算变得易于入手而又条例清楚。这真可以说是科学与艺术的巧妙结合。由于规则简洁明了, 所以人们正在研究用电子计算机来画图(少则几个几十个, 多则几百几千个), 再用电子计算机进一步算出结果。

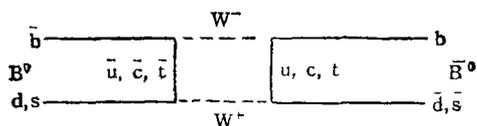


图 1 在标准模型框架内, 描述 B^0 - \bar{B}^0 混合的费曼图之一

图 1 表示在标准模型的框架内, 描述 B^0 - \bar{B}^0 混合的费曼图之一。不同的线代表不同的粒子(标在线的旁边), 几条线的交点称“顶点”(图中有四个顶点), 两端都是顶点的线称内线(有四条内线), 有一端悬空的称外线(四条外线), 只有外线对应的粒子才可能在实验中观测到; 每个顶点都有对应的相互作用表达式, 整个图代表的就是所有顶点对应的式子的乘积。图中左边 \bar{b} 与 s (或 d) 构成 B^0 , 经过图一所示的作用过程, 到右边就变成了 B^0 (或反过来)。

正负电子束对撞产生 Z^0 , Z^0 衰变产生的 \bar{b} 夸克, 如果带有色荷“红”, 并与夸克海中带“反红”的 s 相遇, 就可构成 B^0 (d 则构成 B_d^0); 与带其它色荷的相遇则不能构成强子, 只能各自表现为夸克海中的“涨落”。如果对撞产生的红色 \bar{b} 与某个绿色夸克靠近, 就相当于带有净色荷“反兰”, 与此同时如果从对撞点相反方

向飞出的“反红”色 b , 与某个“反绿”的反夸克靠近, 就相当于带净色荷“兰”。上述净色荷“兰”与“反兰”之间又可能形成强的色场, 从而可能在色场中间产生一对新的夸克, 结果, B^0 强子就可能由 \bar{b} , 它在夸克海中遇到的那个反夸克及在中间场区产生的某个反夸克组成(总电荷为零, 总色荷为零)。

对于我们感兴趣的事例, 它们最终形成什么粒子, 这些粒子的电荷、质量、动量分布与角分布等, 都是可以从理论上知道的, 也就可以用电子计算机模拟出它们在探测器中的形状与特征。再说, 除了上述我们感兴趣的反应外, 还会有其它反应。因为正负电子束对撞, 并不都产生 Z^0 , 产生的 Z^0 也并不都变成 b, \bar{b} , 比如说, b 夸克可以通过发射 W 粒子变成 c 夸克, Z^0 也可以直接衰变成 c, \bar{c} 夸克对, 然后 c, \bar{c} 夸克各自又通过碎裂和强子化过程变为相应的强子。这些反应与狭义的本底稍有不同, 狭义的本底是指对我们毫无价值的东西, 而上述这些也是真实的信号, 不过我们眼下并不需要它们, 它们反而构成对我们所需信号的干扰, 就好像收听广播的时候, 别的台串进来了一样。这些干扰道的特性也是可以从理论上知道的, 为此, 同样可以对各有关的干扰道作蒙特卡罗模拟, 找出它们与我们感兴趣的反应道的区别, 从而找到合适的选择条件。在实验中把它们筛选掉。

三、初步实验结果

ALEPH 组主要得到了两方面的测量结果: 一是轻子-轻子电荷关联; 二是轻子- D^{*} 电荷关联。选择轻子道的原因, 一是 B^0 (或 \bar{B}^0) 衰变到轻子末态有较大的分支比, 二是轻子在探测器中能比较好地辨认。 B^0 衰变而得的轻子带正电荷, \bar{B}^0 衰变的带负电荷。所以, 如果对撞点两边的轻子带同样电荷, 就意味着这是个“混合”事例, 否则就是“非混合”事例。实验就是测“混合”事例对总事例(“混合”加“非混合”)的比例随 B^0 固有时(转换到 B^0 静止系的时间)的变化。为了增加总事例数, 又收集进所有具有大横动量轻子末态的事例。其原因是 B^0 粒子本身很重, 而其产生的末态轻子又很轻, 所以末态轻子的横动量很大。

B^0 还有较大的分支比衰变到 $D^{*+}\pi^+\pi^+\pi^-$, D^{*+} 又衰变到 \bar{D}^0 和 π^- , 然后 \bar{D}^0 再衰变。由于 D^{*+} 与 \bar{D}^0 的质量差很小, 所以 D^{*+} 衰变出来的 π^- 动量比较低, 便于依据比电离 (dE/dX) 等来加以辨认, 而且其动量分布非常窄, 会在背景上形成一个非常窄的峰, 这就很有利于把信号与背景区别开来, 所以取这个 π^- 的电荷与对撞点另一边末态轻子的电荷相比较。测电荷相同的事例数 (N^{++} 或 N^{--}) 与不同的事例数的差额对于总事例数的比值, 随衰变距离的变化。

图 2 表示轻子- D^{*} 电荷关联的蒙特卡罗模拟结果, 上图表示理想情况; 中图表示已考虑进了顶点位置

分辨和 B^0 的动量分布, 因为 \bar{D}^0 的衰变点可以比 B^0 衰变点辨认得更好, 所以衰变距离往往从对撞点算到 \bar{D}^0 衰变点; 下图表示考虑进了实验中出现的各种情况的模拟结果, 可见由于许多实际原因的影响, 使关联变得不显著, 这个实验是不容易做的. 图 3 是轻子- D^* 电荷关联的实测结果. 蒙特卡罗模拟与实测结果符合得比较好, 证明了混合是与时间相关联的. 由此得:

$$\Delta m_d = \begin{pmatrix} 3.44 & +0.65 & +0.26 \\ & -0.70 & -0.20 \end{pmatrix} \times 10^{-4} eV,$$

$$\tau_{B^0} = 1.44 \pm 0.15 ps$$

$$\Delta m_d / \Gamma = \begin{pmatrix} 0.75 & +0.15 & +0.08 \\ & -0.14 & -0.05 \end{pmatrix}$$

图 4 表示轻子-轻子关联的初步结果, 上图的 1-5 区分别为: B_s^0 贡献的部分、 B_d^0 贡献的部分、 $b \rightarrow c$ 本底和无法区分的事例; 下图则合并表示成与时间相关联(1)和不关联(2)的两部分. 实验结果也证明与时间是关联的. 由此得:

$$\Delta m_d = \begin{pmatrix} 3.5 & +0.5 \\ & -0.4 \end{pmatrix} \pm 0.7 \times 10^{-4} eV,$$

$$\tau_{B_s} = 1.26 ps$$

$$\Delta m_d / \Gamma = 0.76 \pm 0.10 \pm 0.16$$

此实验还在继续进行中.

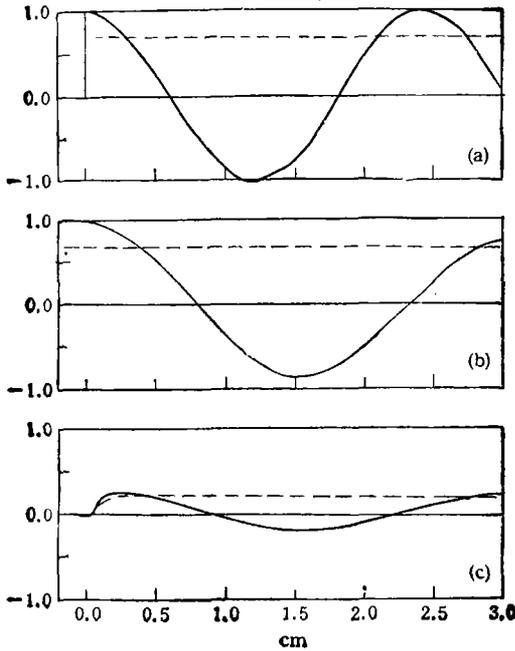


图 2

(a) 理想的 B_s^0 , (b) 计入 D^0 的顶点分辨与 $\beta\gamma$ 值.
(c) 计入轻子误判与本底.

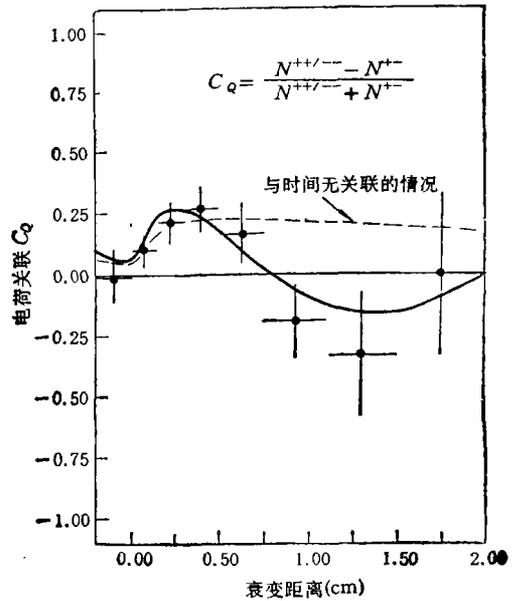


图 3

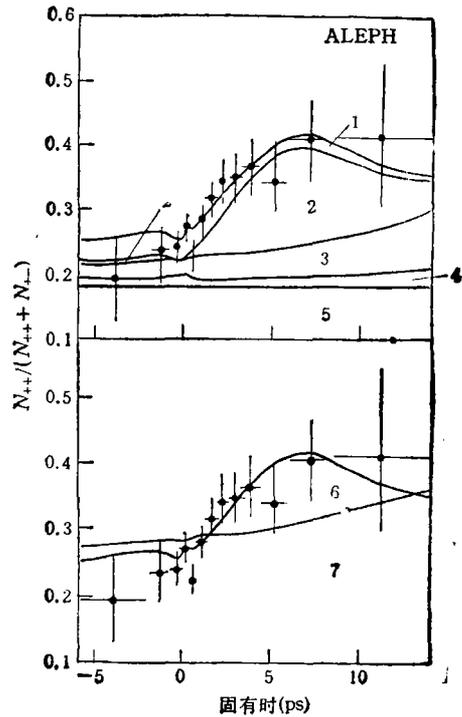


图 4

1. B_s^0 贡献的部分. 2. B_d^0 贡献的部分. 3. $b \rightarrow c$ 的部分.
4. 本底. 5. 无法区分的事例. 6. 与时间有有关联的部分.
7. 与时间不关联的部分.