

弱电统一理论和宇称不守恒

过雅南

1956年李、杨发现宇称不守恒时，他们考察了前人的实验，发现只有在强相互作用和电磁相互作用中验证了宇称是守恒的，而在弱相互作用中还没有验证过。于是他们根据 θ - τ 谜等线索提出了在弱相互作用中宇称不守恒的假设，这很快被吴健雄的实验所证实，使人类的认识向前跨进了一大步。60年代末期，温伯格和萨拉姆提出了弱电统一理论。按照他们的理论，除了传递电磁相互作用的光子和传递弱相互作用 W^\pm 外，还存在一种传递弱相互作用的中性玻色子 Z^0 。通过 Z^0 传递弱相互作用的过程被称为中性流，在中微子实验中寻找中性流是验证弱电统一理论的一个重要实验(见《高能物理》1987年第三期)。这里我们要介绍另一种方法——寻找电磁相互作用中的宇称不守恒，以验证中性流的存在和弱电统一理论的正确。

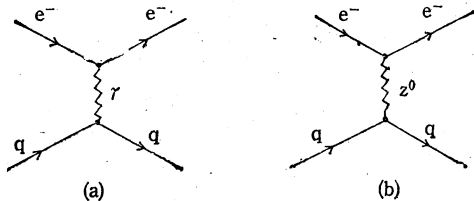


图1 电子-核相互作用可以通过 γ 光子传递(a)，也可以通过 Z^0 传递(b)

大家知道，在电磁相互作用中宇称是守恒的。这已在原子光谱的选择和核反应中反复地被验证。按照弱电统一理论，原来通过 γ 光子传递的相互作用过程，例如电子在核上的散射(图1(a)) $e + A \rightarrow e' + X$ 也可能通过 Z^0 来传递相互作用(图1(b))，也就是说原来认为是纯电磁相互作用的过程中可能混入通过 Z^0 传递的弱相互作用。这两个过程的末态相同，它们可能互相干涉导致宇称不守恒现象。

这里似乎有个矛盾，如果说电磁相互作用中混有弱相互作用并导致宇称不守恒，那么为什么说电磁相互作用中的宇称守恒问题已经验证过了呢？这不是正好说明电磁相互作用中没有混入弱作用吗？我们说“经过实验验证”都是有一定条件的，是在一定的精度范围内而言的。光子的静止质量为零，而 Z^0 的静

止质量约90GeV。在原子物理的能量标度下，电磁相互作用中混入的弱相互作用是极少的，在当时的实验条件下很难检测出来。为了要检测出电磁相互作用中混入的宇称不守恒，而且要与理论定量地比较，必须提高相互作用能量，同时要排除各种可能的系统误差，并提高实验的统计精度。下面介绍一个验证电磁相互作用中混有 Z^0 传递的弱作用并导致宇称不守恒的重要实验——极化电子在氦核上的非弹性散射。

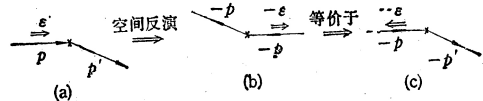


图2 纵向极化电子散射过程(a)及其空间反演

设想把一束纵向极化(自旋沿 P 方向)的电子打到靶核上，并在 θ 角处放一个探测器探测散射的电子。这个过程示于图2(a)。对这一过程作一空间反演，入射电子的动量 P 和散射电子的动量 P' 方向反转，而极化矢量 ϵ 是轴矢量，在空间反演下不变(图2(b))。这个过程等价于图2(c)，也就是说入射束方向和探测器的方向不变，但入射电子的极化方向变得与入射动量反平行。如果宇称不守恒，自旋沿入射方向的散射截面 σ_+ 与自旋反平行的散射截面 σ_- 可能不同。在这个实验中要测量的就是散射截面的不对称性

$$A = (\sigma_+ - \sigma_-) / (\sigma_+ + \sigma_-)$$

按照理论，在这个实验的能区，不对称性 $A \lesssim 10^{-4} Q^2$ ， Q^2 是电子散射的四动量交换的平方。

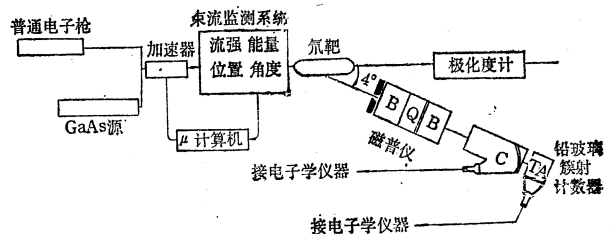


图3 纵向极化电子散射实验装置示意图

极化电子在氦核上非弹性散射实验是1978—1979年在SLAC进行的。整个实验装置示意图见图3。由砷化镓极化电子枪发出的纵向极化电子被2厘长的直

线加速器加速到 16.2 到 22.2 GeV (远高于原子光谱中的 eV 能量级), 打到一个不极化的液氙靶上. 散射的电子由位于 4° 处的一个磁谱仪作动量分析, 最后由一个契伦科夫计数器探测记录. 束流下游还有一个极化度计测量入射电子的极化度 P_e .

这个实验中的关键部件是一个高强度的极化电子枪, 它的极化方向应能迅速反转而不影响其他参数. 具体地说, 它有一块 GaAs 晶体放在普通电子枪热阴极处. 这个 GaAs 晶体经过饱和氧的表面处理, 其导带具有负的电子亲和力. 当一束适当能量的圆偏振光照到 GaAs 上, 就可以把电子从价带抽运到导带而逸出 GaAs, 并且具有跟圆偏振光相同的螺旋性. 为了实验上的需要, 染料激光器发出的 710nm 的光束经过一个方解石棱镜变成线偏振光的. 一个 Pockels 盒再把线偏振光变成圆偏振光, 打到 GaAs 晶体上. 只要把加到 Pockels 盒上的高压极性反转, 就可以反转光子的螺旋性, 这样就反转了电子的螺旋性. 用这种方法可以迅速地改变电子的螺旋性也就是改变电子纵向极化度, 甚至可以使上一个束流脉冲跟下一个脉冲有相反的螺旋性. 随机地快速改变电子的螺旋性可以消除实验中参数的漂移或周期性变化对测量的影响. 极化电子枪的脉冲束流可达几百 mA, 极化度 $|P_e| = 0.37$. 电子经过 2 哩直线加速器加速, 极化度改变很小. 再经过束流输运系统打到液氙靶上. 束流的位置、角度、流强和能量的微小改变都可能影响产额的测量, 特别是当这些变化跟电子极化度的反转相关时就会得出假的不对称性. 所以在束流输运线上加了一系列精密束流监测系统, 对每个脉冲进行监测. 它们测量位置可以精确到 $10\mu\text{m}$, 角度 $0.3\mu\text{rad}$, 能量 0.01%, 束流强度 0.02%. 由一台微计算机把位置和能量信息反馈回去以稳定这些参数. 根据这些参数的测量及其对产额的影响, 可以算出它们对系统误差的贡献. 最主要的贡献是束流能量 E_0 . E_0 变化 $< 10^{-6}$, 对 A/Q^2 的贡献为 -0.26×10^{-3} .

对这一类精密的验证性实验, 在正式取数前要做一系列的检验, 以排除可能存在的系统误差. 这个实验做了四种检验.

1. 用不极化的电子束. 预期 A_{exp} 应为 0. 实际测到 $A_{\text{exp}}/0.37 = (-2.5 \pm 2.2) \times 10^{-3}$. 各个产额值围绕 0 分布并跟预期的统计误差相一致. 由此可知, 用这套装置测量不对称性可达到约 10^{-3} 的水平.

2. 用极化束. 方解石棱镜转动一个角度 ϕ_P 将使电子极化度按 $\cos(2\phi_P)$ 改变, 不对称性 A_{exp} 也应按 $\cos(2\phi_P)$ 变化. 在 $\phi_P = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 三个位置上作了测量 ($E_0 = 19.4\text{GeV}$). 结果见图 4. 在 $\phi_P = 45^\circ$ 时 A_{exp} 跟预期的零值一致, 表明其它系统误差也很少. 实验中用了两种计数器, 契伦科夫计数

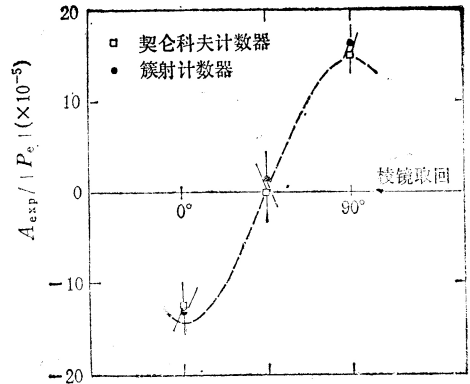


图 4 观测到的实验不对称性与棱镜取向的关系

器和全吸收计数器, 这两种探测器对各种本底的响应是不同的. 但它们得出的结果符合得很好, 这充分证明了本底很小.

3. 改变束流能量 E_0 . 实验上的不对称性

$$A_{\text{exp}} = |P_e| A \cos\left(\frac{E_0(\text{GeV})}{3.237} \pi\right).$$

在 $E_0 = 16.18, 17.80, 19.42$ 和 22.2GeV 时做了测量. 其结果示于图 5 中. 虚线是根据 $E_0 = 19.42\text{GeV}$ 时的数据算出的预期值. 在 $E_0 = 17.8\text{GeV}$ 处, θ_{prec}

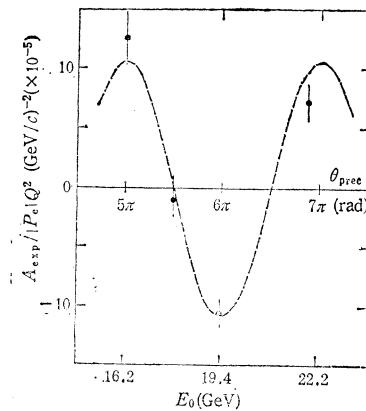


图 5 观测到的实验不对称性与束流能量的关系

$= 5.5\pi$, 电子束成为横向极化的. 理论上预期此时不对称性应为零. 实验结果与预期的相符.

4. 在用极化束进行的测量中取相同螺旋性的数据, 但随机地加以 \pm 号, 以产生伪不对称性. 它的预期值为零, 实验上也

证实了.

以上的检验证明了实验系统是可靠的, 系统误差是很小的. 实验上所观测到的不对称性确实是由于电子的螺旋性造成的.

极化电子在氙核上的非弹性散射实验通过谨慎精巧的实验设计和运行, 排除了各种可能的系统误差, 发现了散射中的微弱的宇称不守恒现象, 证实了在电磁相互作用中混有中性弱流, 并且定量地求出了 $\sin\theta_w$, 跟其它中性流实验结果一致, 从另一个角度验证了弱电统一理论.