

中微子的螺旋度反转

2011年5月出版的 *Physics Today* 杂志上刊登了一篇庆祝著名物理学家 Maurice Goldhaber 百岁生日的文章, 该文的作者是 Maurice Goldhaber 本人(前美国布鲁克海文国家实验室主任)和他的儿子 Alfred Scharff Goldhaber(美国纽约大学石溪分校杨振宁理论物理研究所教授)。在文章中, Goldhaber 父子阐明了粒子的螺旋度和手征性的基本概念, 并指出实验上直接和间接观测有质量中微子的螺旋度反转的可能性及实际困难。Maurice Goldhaber 出生于 1911 年 4 月 18 日, 师从于 1935 年诺贝尔物理学奖得主 James Chadwick, 对核物理和粒子物理的发展做出过重大贡献, 其中包括 1958 年对电子中微子的螺旋度的测量。



图 1 Maurice Goldhaber(1934 年)

1957 年, 实验证明弱相互作用中宇称不守恒, 这迅速引起人们对粒子的螺旋度(helicity)和手征性(chirality)这两个物理学中的基本概念的普遍关注。简单来讲, 螺旋度是指粒子的自旋在其动量方向上的投影, 它适用于自旋不为零的玻色子和费米子; 而手征性仅适用于费米子, 后者通常用四分量的 Dirac 旋量场来表示。如果将左手场和右手场定义为手征算符 γ_5 的本征态, 其本征值分别为 -1 和 $+1$, 那么手征性即为费米子场在左手场和右手场的投影。手征性之所以重要, 是因为绝大多数弱相互作用过程只涉及参与相互作用的轻子和夸克的左手场分量。

对于自旋为 $1/2$ 的中微子, 我们一般将螺旋度和手征性的本征值归一化为 ± 1 。若中微子的质量为零, 螺旋度和手征性对中微子来说是相同的, 而对反中微子是相反的。无质量的中微子是完全极化的, 即任何惯性参考系中的观测者都会看到中微子的螺旋度为 -1 , 反中微子的螺旋度为 $+1$ 。1958 年, Maurice Goldhaber 及其合作者在布鲁克海文国家实验室设计了一个精妙的实验来直接测量中微子的螺旋度, 其结果为 -1 , 这为粒子物理标准模型中的手征相互作用理论奠定了坚实的实验基础。

然而自 1998 年以来的中微子振荡实验显示, 三代中微子具有非简并的静止质量, 也就是说至少有两种中微子的质量不为零。目前正在进行的大亚湾反应堆中微子实验, 就是通过观测来自核反应堆的反电子中微子的振荡现象来确定最小的中微子混合角。如果我们转换到有质量中微子的静止参考系中, 那么螺旋度是没有定义的。对于一个螺旋度为负

的有质量的中微子, 其运动的速度必然小于光速, 因此我们总可以找到一个比中微子的运动速度还快的惯性参考系。在这个参考系内, 中微子的相对运动速度反向, 而自旋方向不变, 其螺旋度就会由负反转为正。下面我们讨论用三种不同的方法来直接或间接观测有质量中微子的螺旋度反转:

第一种办法是用高速运行的电子从后面追上运动的中微子来直接探测中微子的螺旋度反转。假设中微子具有较低的能量 $E=100\text{keV}$, 并取其静止质量为 $m=10^{-2}\text{eV}$, 那么相应的 Lorentz 因子 $\gamma=E/m=1/\sqrt{1-\beta^2}\approx 10^7$ 非常大, 或者说中微子的速度很高 $v=\beta c\approx c(1-10^{-14})$, 其中 c 为真空中的光速。要想追上中微子, 电子必须被加速到能量约为 10TeV , 这远远超出了当前所提出的电子加速器的能量范围。即使将来的电子加速器能够达到如此高的能量, 实际上也存在一个很大的困难, 即电子和中微子运动方向的夹角必须小于 10^{-7} 弧度, 否则电子速度在中微子速度方向上的分量会太小而导致不能追上中微子。因为如此小的夹角使得满足条件的电子的相空间异常小, 所以追上中微子的可能性也会极小。若中微子与电子的运动方向有很明显的夹角, 则中微子的速度在电子运动方向上的分量很小, 这样电子岂不是更容易追上中微子? 在这种情况下, 当电子追上中微子的时候, 在电子的静止参考系中, 我们会观察到中微子的横向运动速度是十分接近光速的, 所以中微子的螺旋度仍为负。此时, 观测到中微子螺旋度为正的的概率是 $1/\gamma$, 这里 γ 为中微子在电子的静止参考系中的 Lorentz 因子。再退一步讲, 若中微子的螺旋度已由负反转为正, 对于 Dirac 中微子来讲, 螺旋度为正的中微子几乎不参与弱相互作用。中微子若是 Majorana 粒子, 即粒子是其自身的反粒子, 螺旋度为正的中微子也参与弱相互作用, 但是其与电子的反应截面会随着质心能减小而迅速减小。当电子从后面追上中微子时, 它们之间的相对速度会非常小, 这导致探测中微子的螺旋度反转变得十分困难。

第二种办法是探测弱相互作用中产生的螺旋度为正的中微子分量。我们知道, 带电流弱相互作用只涉及左手费米子场。对于无质量的粒子, 特定的手征态对应着特定的螺旋度。然而对于有质量的粒子, 特定的手征态却是不同螺旋度的态的线性叠加。举例来说, 我们考虑一个原子核俘获一个内层电子后释放出一个中微子。虽然只有左手电子场参与相互作用, 但是电子可以看作是静止的, 其螺旋度是没有定义的。因此, 反应产生的中微子必然具有很小的螺旋度为正的。我们可以用另外一个原子核来俘获这个中微子, 其中的螺旋度为正的。中微子若是 Dirac 粒子, 其右手场是不与原子核相互作用的。中微子若是 Majorana 粒子, 其右手场像反中微子一样参与弱相互作用, 因此整个过程好比是探测中微子一反中微子振荡。换句话说, 我们想要探测这样的中微子束流中极小的螺旋度为正的。实际上, Raymond Davis 曾在 1955 年做过在核反应堆中微子束流中寻找中微子

的实验;仅一年后 Clyde Cowan 和 Frederick Reines 发现核反应堆中产生的是反中微子. 当然, Davis 的实验远没有达到能够探测中微子-反中微子振荡的精度.

第三种办法是观测原子核的无中微子双 β 衰变来间接寻找中微子的螺旋度反转. 只有当中微子是 Majorana 粒子且其质量不为零时才有可能产生无中微子双 β 衰变,即在质量数为 A 、电荷数为 Z 的原子核内部,两个中子衰变到两个质子并释放出两个电子,如图 2 所示. 与 β 衰变不同的是,这类衰变过程的末态粒子中没有中微子,由动量守恒可知,两个虚的中微子具有相同的螺旋度. 通常真空中产生或湮灭的中微子-反中微子对具有相反的螺旋度. 因此,无中微子双 β 衰变的发生就是中微子螺旋度反转的有力证据. 值得注意的是,如果存在破坏轻子数的相互作用,即使中微子是 Dirac 粒子,无中微子双 β 衰变也有可能通过交换很重的新粒子而发生.

综上所述,因为中微子振荡实验证明,中微子是有质量的,所以原则上可以观测到中微子的螺旋度反转现象. 然而通常情况下的中微子总是以高速运动,实验上直接观测其螺

旋度反转就非常困难. 如果不存在超出标准模型的破坏轻子数的相互作用,那么中微子的螺旋度反转是可以通过观测无中微子双 β 衰变来间接验证的.

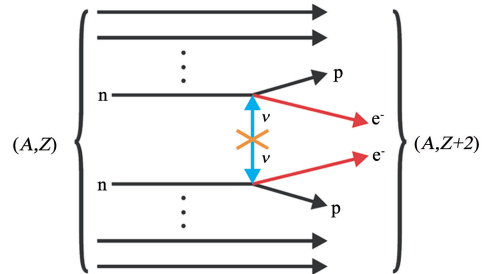


图 2 原子核的无中微子双 β 衰变示意图

(德国马普物理研究所 周顺 编译自 Alfred Scharff Goldhaber, Maurice Goldhaber. *Physics today*, 2011, 5: 40, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)