

反应堆实验揭示中微子振荡的第三个混合角

大亚湾反应堆中微子实验近日公布了一个大家久久等候的实验结果. 测量到反应堆产生的电子反中微子在传播不同距离后的微小丢失后, 大亚湾国际合作组宣布, 有足够的证据表明, 描述中微子振荡的第三个混合角 θ_{13} 不为零. 不仅如此, θ_{13} 的值出人意料地大, 因此实验家们现在就可以开始研究中微子在形成宇宙物质-反物质不对称现象中扮演的角色¹⁾.

宇宙大爆炸后残留的反物质如此之少, 说明存在某些基本的相互作用破坏了电荷(C)和宇称(P)的对称性. 夸克之间的弱相互作用存在 CP 破坏, 但其程度太小, 不足以解释宇宙中的不对称现象, 而中微子也许能产生足够强的 CP 破坏. 粒子物理的标准模型告诉我们, 如果中微子能够产生 CP 破坏, 所有的三个混合角必须都不为零. 早期的实验已经推断出 θ_{13} 远小于其余两个混合角, 但没有发现其不为零的证据.

中微子以味本征态产生, 具有三种不同的“味道”. 每个味道本征态可以看做是由三种质量本征态叠加而成. 由于质量本征态间的量子相干现象, 一种味道的中微子在传播过程中会发生振荡, 变成别的味道. 中微子振荡已经被大量实验所证实, 这些实验表明, 一定存在三种不同质量的中微子. 味本征态和质量本征态之间的关联可以用三个混合角 θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} 来描述. 太阳中微子和大气中微子实验已经测得 θ_{12} 约为 33° , Δm_{21}^2 为 $8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, θ_{23} 接近 45° , Δm_{32}^2 为 $2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, Δm_{31}^2 约等于 Δm_{32}^2 . θ_{13} 是最后一个未知的混合角, 若它不为零, 则可以通过观察反应堆中微子在几公里外产生的振荡来确定.

大亚湾实验设施分布在边长约 2km 的三角形区域中. 大亚湾核电站的反应堆群和岭澳核电站的反应堆群分别位于三角形的两个顶点. 在距每个顶点约 0.5km 处各有一个实验大厅(近厅), 共摆放了 3 个探测器, 监测反应堆产生的中微子流强. 第三个顶点附近建立了另一个实验大厅(远厅), 放置了 3 个探测器, 距反应堆 1.5—1.9km, 这是中微子出现最大丢失的距离. 三个实验大厅都深埋于地下, 以减小宇宙线对中微子信号的污染.

能量为 E 的中微子从反应堆产生并传播距离 L 后, 由于发生振荡而丢失的几率为:

$$P_{\text{react}} = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta m_{31}^2 L / 4\hbar c E),$$

其中 θ_{13} 是唯一未知的参数, 可以通过远近点探测器测到的中微子数之比得到.

大亚湾实验面临的主要问题是振荡的振幅 $\sin^2 2\theta_{13}$ 是否足够大, 以致于能通过测量到的远近点差别得到. 最近的 Double Chooz 实验给出了 $\sin^2 2\theta_{13}$ 不为零的迹象, 并给出了一个上限值 0.16. 而大亚湾实验计划用三年的时间使它的测量灵敏度达到 0.01.

令人高兴的是, $\sin^2 2\theta_{13}$ 比大亚湾的设计精度大了一个量级. 这样, 在今年 3 月, 仅仅分析了手中的两个月数据之

后, 大亚湾实验的发言人王贻芳(北京中国科学院高能物理研究所)就能够通过视频直播, 向全世界报告 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.017$, 对应 θ_{13} 约为 9° . 这个意想不到的结果以 5.2 倍标准偏差的置信度排除了 θ_{13} 为零的可能性.

利用 6 个探测器运行 55 天观测到的中微子事例, 与没有振荡情况下的预期值相比, 就能得到 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的最佳拟合值. 图 1 描述了大亚湾实验测量到中微子事例随传播距离的丢失, 并与最佳拟合值进行了比较. 图中的加权平均距离考虑到了不同反应堆的功率水平及中微子流量会随传播距离成平方反比地减少.

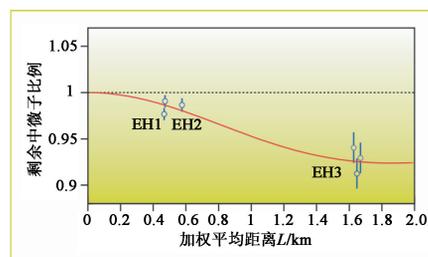


图 1 各探测器中观察到的中微子流量与没有振荡情况下的预测中微子流量之比. 横轴表示实验大厅(EH)到反应堆的加权平均距离. 红线表示对中微子振荡的最佳拟合结果

θ_{13} 的测量精度现在主要受统计误差的限制. 史蒂芬·卡特尔(布鲁克海汶国家实验室)说:“加上正在安装的两个探测器, 运行三年的时间, 可以将现有的测量精度 20% 提高到 4%.”精确测量的 θ_{13} 对粒子物理和宇宙学都具有重要意义.

θ_{13} 非零是解释 CP 破坏的必要但不充分条件. 既然三个不为零的混合角同时存在, 就可以通过测量另一个独立的相位角 e^{ph} 来了解 CP 破坏的程度. 未来的长基线加速器中微子实验正是为了达到这一目标而设计的.

事实上, 通过中微子的 CP 破坏来解释宇宙中反物质的缺失并非易事, 因为中微子的质量太小, 不到 1eV(作为对比, 电子的质量为 0.5MeV). 因此, 一些理论家预言存在某种质量极大而寿命很短的中微子, 与现今观察到的中微子形成跷跷板, 一端越轻, 另一端越重, 而轻重中微子质量的几何平均值接近夸克和带电轻子的质量. 因而, 大亚湾实验结果与宇宙学的直接关联性在于: 与跷跷板机制中的重中微子(衰变)有关的 CP 破坏效应, 其程度应该相当于与我们熟知的轻中微子(振荡)有关的 CP 破坏效应.

(中国科学院高能物理研究所 何苗 编译自 Bertram Schwarzschild. *Physics Today*, 2012, (5): 13, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

1) 如果 θ_{13} 太小, 那么用现有实验手段无法测量中微子振荡中 CP 破坏的大小. ——译者注

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权, 与 *Physics Today* 合作的项目