

反应堆中微子

占亮

(中国科学院高能物理研究所 100049)

在1930年，泡利(W. Pauli)提出中微子假说之后，反应堆中微子的研究在粒子物理学的发展中起到了重要的推动作用。1956年，莱因斯(F. Reines)和柯温(C. Cowan)首次探测到反应堆发出的中微子，从实验上确认了中微子的存在，证实了泡利提出的中微子假说。2002年，日本的KamLAND实验首次测量到了反应堆中微子振荡，验证了太阳中微子振荡模式。2012年，中国的大亚湾中微子实验首次发现了第三种中微子振荡，证实了振荡参数 θ_{13} 大于零。作为下一代中微子实验，中国的江门中微子实验(JUNO)将利用反应堆中微子测量中微子的质量顺序。大亚湾实验取得举世瞩目的成果，使我国在此领域站到了国际前沿，JUNO实验与大亚湾实验一脉相承，将在未来一二十年内取得更多成果，使我国继续占有领先地位。

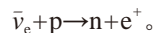
20世纪初，物理学家们发现，原子核发生贝塔衰变时，发出的电子能量并不是单一能量，而是一个连续能谱，这引起了人们对能量和动量守恒定律的怀疑。1930年，泡利根据这个现象提出了中微子假说，认为是贝塔衰变过程中发出的一个新粒子——中微子带走了一部分能量，并预期了中微子的性质。一个重要性质，就是中微子只参与非常微弱的弱相互作用，与物质极难发生反应，这也是在贝塔衰变实验中并未观测到中微子存在的原因。连泡利本人也说：“我做了一件很可怕的事情，我预言了一个无法探测的粒子存在。”

在物理学发展的过程中，理论物理学家们提出的假说，必须经过实验验证才能广为人们所接受，即使很难探测，中微子的存在也必须得到验证。由于中微子与物质极难发生反应，被称为宇宙的“隐身人”，要探测中微子，需要很强的中微子源发出大量的中微子，并且要用很大的探测器。1951年，莱因斯想在靠近原子弹爆炸的地方放置一个探测器来寻找中微子，

后来放弃了这个想法。1952年，莱因斯和柯温决定采用较温和的中微子源：反应堆，1953年，他们在汉福特(Hanford)反应堆做了初步的实验，信号不显著。1956年，他们用一个一吨多重改进了的探测器在新建成的萨瓦纳河(Savannah River)反应堆进行实验，终于首次直接测量到反应堆发出的中微子信号，这是人类首次从实验上证实了中微子的存在，经过26年，泡利的“中微子假说”终于被验证。由于对中微子直接探测的贡献，莱因斯荣获1995年诺贝尔物理学奖，而此时柯温已经去世多年。

反应堆和原子弹类似，都是利用原子核裂变释放能量，反应堆的燃料主要是浓缩到2%~4.5%的铀235，其他成分为铀238。反应堆在运行过程中，铀235持续发生裂变，同时产生中子，中子被铀238俘获后又会产生两种可裂变原子核：钚239和钚241，这四种原子核是反应堆产生能量和中微子的主要核素。这四种核素平均每次裂变会释放出200MeV能量，裂变产物大部分为不稳定的放射性同位素，平均会发生六次贝塔衰变变成稳定的核素，并相应释放出6个中微子。一个热功率为1GW的反应堆，每秒钟释放出的中微子数目约为 2×10^{20} 个，这些中微子为纯净的反电子中微子，能量约为几个MeV。

莱因斯和柯温直接探测反应堆中微子，利用的是反电子中微子($\bar{\nu}_e$)和质子(p)发生的反贝塔反应，生成一个中子(n)和一个正电子(e^+)：



在以后的反应堆中微子实验中，几乎都是利用这个反应来探测中微子。反应堆中微子实验通常采用液体闪烁体(液闪)探测器，即作为中微子反应的靶物质，也作为粒子的探测介质。在液闪中，正电子会立即形成一个快信号，而中子则需要经过一段时间(~ 200 微秒)慢化而被原子核俘获，俘获后形成不稳定核素

会释放出伽玛光子 (γ) 而形成慢信号, 快慢信号的时间符合测量能够大大降低实验本底。

在粒子物理的标准模型中, 一共有三种味道的中微子, 即电子中微子 (ν_e)、缪子中微子 (ν_μ) 和陶子中微子 (ν_τ), 分别与电子、缪子和陶子三种轻子对应。1957年, 庞蒂科夫 (B. Pontecorvo) 提出, 假如中微子有质量, 那么可以在飞行过程中由一种中微子变成另一种中微子。1968年, 美国布鲁克海文实验室的戴维斯 (R. Davis) 在美国 Homestake 金矿中, 用一个 600 吨四氯乙烯探测器, 观测到了来自太阳的中微子, 他发现测量到的中微子个数只有预期的三分之一, 称为“太阳中微子失踪之谜”。1985 到 1994 年间, 日本的神冈 (Kamiokande) 实验测量到了大气中微子的丢失, 被称为“大气中微子反常”。对这些现象, 其中一个可能的解释是中微子振荡, 即中微子转变成了另外一种中微子而没有测量到, 造成中微子丢失的现象。对于能量为 E (MeV) 的中微子, 在飞行一段距离 L (m) 被探测后发现仍然是同一种中微子的几率为:

$$P_{\text{sur}} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27 \Delta m^2 L}{E},$$

这个几率通常被称为中微子存活几率, 其中 θ 为两种中微子的混合角, 决定了中微子振荡幅度的大小; Δm^2 是两种中微子的质量平方差, 决定了中微子振荡发生所需要的飞行距离。中微子振荡的研究非常重要。在粒子物理标准模型中, 中微子是没有质量的, 不会发生振荡现象, 而太阳中微子丢失和大气中微子丢失现象分别表明中微子可能存在振荡, 从而具有质量, 这是唯一超出标准模型的实验现象。

太阳中微子丢失现象表明中微子质量平方差可能范围为 $10^{-5} \sim 10^{-10} \text{ eV}^2$, 而大气中微子丢失现象表明质量平方差可能范围是 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$ 。为了验证中微子丢失现象, 法国的 CHOOZ 实验利用反应堆中微子来测量振荡几率。反应堆中微子的能量平均值约为 3 MeV, CHOOZ 探测器距离反应堆的距离, 也就是所探测中微子的飞行距离约为 1 km。如果大气中微子丢失是由于缪中微子振荡到电子中微子 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$), 那么 CHOOZ 实验应该观测到明显的反应堆发出的电子中微子的丢失。CHOOZ 实验利用的两个反应堆总功

率为 8.5GW, 探测器靶物质重为 5 吨, 另外为了压低宇宙线本底, 探测器放置在地底下 100 多米处。实验采用了掺钆 (Gd) 液闪, 与普通液闪相比, 中子俘获释放的能量由 2.2 MeV 提高到了 8MeV, 俘获时间由 200 微秒缩短到了 30 微秒, 这大大提高了本底的排除能力。但是往有机物液闪中掺入无机金属钆会导致液闪性能下降而终止。CHOOZ 实验只运行了一年就因为液闪性能下降而终止。CHOOZ 实验在 1999 年发布最终结果, 观测到了约 3000 个中微子候选事例, 与预期中微子事例和能谱相比, 并没有看到中微子振荡的现象。大概在同一时间进行的还有美国的 Palo Verde 实验, 实验利用三个反应堆, 总功率为 11.6GW, 基线长度为 750 ~ 890 m, 使用了一个靶物质为 11.3 吨掺钆液闪的探测器。Palo Verde 实验在 1999 年发布结果, 同样没有发现反应堆中微子的振荡。这两个实验表明在 1 km 处反应堆中微子振荡模式跟大气中微子振荡模式不是同一回事。

1998 年神冈实验升级后的超级神冈实验精确测得了缪中微子数目随飞行距离的变化关系, 证实了大气中微子振荡。2001 年, 加拿大 SNO 实验测量到了太阳中微子实验在探测器内发生的三个过程, 发现电子中微子确实丢失了, 但是三种中微子的总量并没有变化, 说明是电子中微子振荡成了其他中微子。这两个实验因证实中微子振荡现象, 而获得了 2015 年的诺贝尔奖。2002 年, 日本的 KamLAND 实验利用反应堆中微子来验证太阳中微子的振荡模式。实验位于神冈实验的旧址, 距离日本本土和韩国的核电站反应堆的平均距离为 180 km。由于距离太远导致中微子流强衰减 (正比于距离的平方分之一) 严重, 为了探测足够多的中微子, 实验采用了 1000 吨液闪的大型探测器。2002 年 12 月, KamLAND 首次公布了测量结果, 观测到 54 个中微子事例, 而预期无振荡的事例数为 87 个, 验证了太阳中微子的振荡模式。2003 年日本 K2K 实验和 2006 年美国 MINOS 实验也用加速器证实了大气中微子振荡模式, 至此中微子振荡现象被大量实验证据所确立。

考虑到三种中微子互相振荡, 决定中微子振荡几率的共有 6 个振荡参数, 他们是: 中微子混合角 θ_{12} 、

θ_{23} 和 θ_{13} ；两个独立的质量平方差 $\Delta m_{21}^2=m_2^2-m_1^2$ 和 $\Delta m_{31}^2=m_3^2-m_1^2$ (或者 Δm_{32}^2)，还有一个电荷宇称 (CP) 破坏相角 (δ_{CP})。由太阳中微子振荡模式测量到了 θ_{12} 和 Δm_{21}^2 ，由大气中微子振荡模式测量到了 θ_{22} 和 $|\Delta m_{31}^2|$ ，2012 年由大亚湾中微子实验测量到了最后一个混合角 θ_{13} ，未知的参数只剩下 CP 破坏相角。另外中微子的质量顺序仍然未知，有两种可能： $m_1 < m_2 < m_3$ 或者 $m_3 < m_1 < m_2$ 。

在大亚湾实验之前，测量最后一个混合角 θ_{13} 成为前沿热点，而之前的 CHOOZ 实验和 Palo Verde 实验并未发现反应堆中微子的振荡，只给出上限值 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.17$ ，一些理论模型预期 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的值在 0.001 ~ 0.1 之间。精确测量 θ_{13} 的值具有重大的科学意义：它是中微子 6 个最基本的振荡参数之一，必须精确测量以完整理解中微子混合的规律，是构建大一理论的基础； θ_{13} 的值决定了振荡参数中 CP 破坏相角 δ_{CP} 能否被测量，指导着下一代中微子实验的发展方向；精确的测量 θ_{13} 的值使我们能够寻找和鉴别超出粒子物理标准模型的新物理。鉴于精确测量 θ_{13} 的重要物理意义，美国物理学会在其 2004 年中微子研究报告中将用反应堆实验测量 θ_{13} 列为未来实验的第一优先。先后有 7 个国家提出了 8 个方案，计划用反应堆精确测量 θ_{13} ，最终有 3 个方案得以实施，分别是中国的大亚湾实验、法国的 Double CHOOZ 和韩国的 RENO，表 1 是这 3 个实验基本参数的对比。

从表 1 中可以看出，大亚湾中微子实验有得天独厚的优势，反应堆的总功率为 17.4GW，为世界上第二大核反应堆群，更重要的是附近有山，可以用很低的成本建立地下实验室，以提供足够的屏蔽，对于低能量、低事例率、高精度的中微子实验来说，减少宇宙射线和天然放射性本底是最重要的前提。大亚湾实

验方案上有多模块测量、探测器可移动、水池屏蔽、采用反射板等一系列独创设计，测量 θ_{13} 的灵敏度达到 0.01，而 Double CHOOZ 和 RENO 只有 0.02 ~ 0.03。图 1 是大亚湾实验的布局图，我们一共有 8 个全同的探测器模块，在大亚湾反应堆和岭澳反应堆几百米远的两个实验厅 (EH1 和 EH2) 各放置两个近点探测器，测量中微子还未发生振荡 (振荡很小) 时候的中微子流强，在大概 1.8 km 的远点实验厅 (EH3) 放置 4 个探测器测量中微子振荡之后的流强，这样通过远近点相对测量的办法可以抵消反应堆流强的计算误差。另外，使用多个全同的探测器可以降低探测器的相对误差，我们在近点两个实验大厅都放置两个探测器，它们之间互相校验，可以验证探测器的相对误差。现实中，不可能做出百分百完全一样的探测器，它们之间的微小差别就是探测器的相对误差，我们设计的相对误差小于 0.38%，但是最终探测器建造出来后，发现实际相对误差小于 0.2%，远优于设计目标。

大亚湾实验的探测器包括 3 种类型：中微子探测器 (AD)、水切伦科夫探测器 (WP) 和阻性板探测器 (RPC)。中微子探测器高 5 m、直径 5 m，总重量

表 1 3 个反应堆实验参数对比

实验	大亚湾	Double CHOOZ	RENO
功率 /GW	17.4	8.4	17.3
靶质量 (近 / 远) / 吨	80/80	10/10	20/20
基线 /m	400/1800	150/1050	150/1500
岩石覆盖 (近 / 远) MWE	300/1000	60/300	230/675
$\sin^2 2\theta_{13}$ 灵敏度	0.01	0.03	0.03

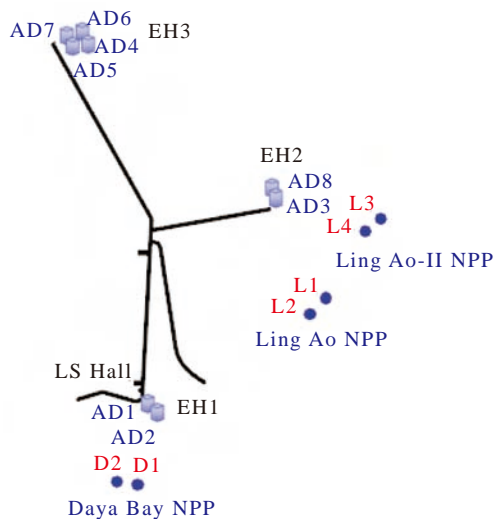


图 1 大亚湾实验的布局图。6 个圆点表示 6 个反应堆，包括大亚湾反应堆 D1 和 D2，岭澳和岭澳二期 L1、L2、L3 和 L4。一共 8 个全同的探测器，用 AD1 到 AD8 表示，分别布置在 3 个通过隧道互相连接的地下实验大厅 EH1、EH2 和 EH3，大亚湾近点 EH1 距离反应堆约 360 m，岭澳近点 EH2 距离反应堆约为 500 m，远点 EH3 距离大亚湾约 1900 m，距离岭澳约 1600 m

约 110 吨，包括 3 层同心圆结构。最内层是 20 吨的掺钆液闪，作为反应堆中微子的靶物质，装在高 3 m、直径 3 m 的内有机玻璃罐内。中间层是 21 吨的普通液闪，装在一个高 4 m、直径 4 m 的外有机玻璃罐内，用来收集中微子信号泄露的能量，以提高中微子的探测效率。最外层是 37 吨重的矿物油，装在一个高 5 m、直径 5 m 的不锈钢罐内，用来屏蔽钢罐、光电倍增管等材料内的天然放射源本底。在矿物油内，钢罐的桶壁内侧一共安装了 8 圈每圈 24 个 8 英寸的光电倍增管，用来收集液闪内产生的光信号。在外有机玻璃罐的顶部和底部装有光学反射板，用来把飞到顶部和底部的光子反射到桶壁，以利于光电倍增管收集，提高光的收集效率。整个中微子探测器被浸放在一个大水池内，四周至少保证 2.5 m 厚的水用来阻挡岩石中的天然放射性本底进入中微子探测器。水池内安装了光电倍增管，可以作为水切伦科夫探测器，用来探测穿过水池的宇宙线缪子。在水池之上，覆盖着 RPC 阵列，同样用于探测宇宙线缪子，和水切伦科夫探测器一起对排除宇宙线缪子做双重保险。

除了 3 个反应堆实验测量 θ_{13} 之外，还有两个加速器实验也在同时进行：日本的 T2K 实验和美国的 MINOS 实验。2011 年 6 月，T2K 实验发表结果，给出了 θ_{13} 不为零的迹象，但是置信度只有 2.5 倍标准偏差 (σ)，紧接着 Double Chooz 和 MINOS 也给出了类似的结果，但是置信度更低，只有 1.7σ 。粒子物理中一般 3σ 以下的结果称为“迹象”， 3σ 以上称为“证据”， 5σ 以上才可确定为“发现”。

为了加快实验进度，赢得国际竞争，大亚湾国际合作组经过研究后决定先以 6 个探测器运行取数，EH2 和 EH3 各少装一个探测器。大亚湾近点实验厅 EH1 于 2011 年 8 月 15 日开始运行取数，EH2 和 EH3 在几个月后陆续取数。2011 年 12 月 24 日，3 个实验厅开始同时进行正式的物理取数，用于测量 θ_{13} ，经过 55 天的取数，6 个探测器一共探测到近 10 万个中微子事例。2012 年 3 月 8 日，大亚湾向全世界公布结果，以 5.2σ 的置信度发现了 θ_{13} 不为零，并且 θ_{13} 的值比预期的大很多。图 2 表示了大亚湾实验 6 个探测器中观测到的中微子数目与预期数目的比值，横坐标是

基线长度，也就是中微子的飞行距离，纵坐标显示的比值如果为 1 表示测量到的中微子数目与预期值一样，意味着没有中微子振荡。从图中可以看到近点 EH1 和 EH2 的 3 个探测器测量到的比值非常接近于 1，说明振荡很小，而远点 EH3 的比值明显比 1 小，证明存在振荡，振荡幅度约为 6%，我们通过参数拟合最终测量出 θ_{13} 的值： $\sin^2 2\theta_{13}=0.092\pm 0.017$ 。

大亚湾成果震惊了国际粒子物理界，被美国 *Science* 杂志评为 2012 年的十大科学突破，并于 2015 年摘获科学界第一巨奖“基础物理学突破奖”。大亚湾实验发现 θ_{13} 对中微子研究产生巨大影响，较大的 θ_{13} 表明今后大概一二十年内我们可以建造下一代中微子实验，来决定中微子的质量等级和测量 CP 破坏相角，因此国际上下一代中微子实验计划加速启动，包括中国的江门中微子实验 (JUNO)。

2012 年底，大亚湾实验利用更多的实验数据更新了 θ_{13} 测量结果， θ_{13} 非零进一步确认，置信度达到了 7.7σ 。2013 年利用更多实验数据，采用了新的分析方法，不仅测量中微子数目，同时也测量中微子的能谱形状，给出了 θ_{13} 更精确的测量，置信度超过 10σ ，并且首次测量了相关的质量平方差。除了振荡参数的测量，大亚湾利用收集到的世界上最大样本的中微子事例，进行了中微子产额和能谱的研究，发现了在 4 ~ 6 MeV 之间测量的中微子事例数约超出预期值的 10%，这个

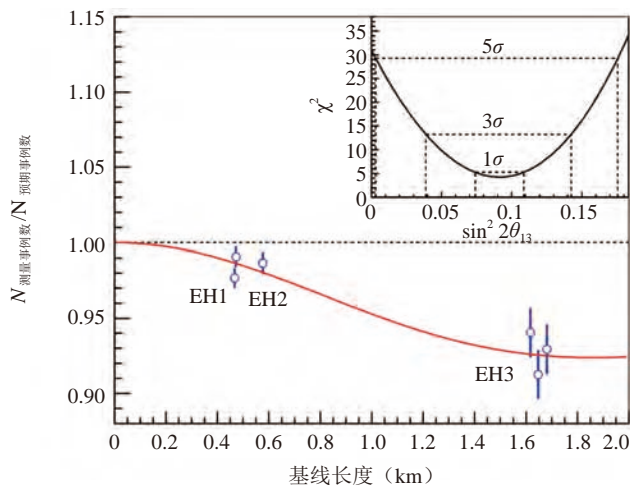


图 2 大亚湾实验 6 个探测器测量到的中微子数目与预期值的比值，比值小于 1 说明发生了振荡，右上角显示了 θ_{13} 不为零的置信度，超过 5σ

现象表明当前的反应堆中微子谱形预期模型有问题，成为下一个研究的热点。另外两个反应堆中微子实验 Double CHOOZ 实验和 RENO 实验也发表了 θ_{13} 的测量结果，但是精度无法与大亚湾实验相比。大亚湾中微子实验将持续运行到至少 2017 年，最终 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量精度能达到 3%，将在几十年内保持世界上最精确的测量。

在大亚湾实验精确测量 θ_{13} 之后，中微子物理里面两个悬而未决的问题成为了下一步的研究热点，它们是中微子的质量等级和 CP 破坏相角。下一代中微子实验计划加速提出，包括美国的 LBNE/DUNE 实验利用加速器中微子测量质量等级和 CP 相角、美国在南极洲的实验 PINGU 利用大气中微子测量质量等级、日本的超超级神冈实验 (HyperK) 利用大气中微子和加速器中微子测量质量等级和 CP 相角、印度的 INO 实验利用大气中微子测量质量等级，中国科学家提出江门中微子实验 (JUNO) 利用反应堆中微子测量质量等级。JUNO 实验的物理可行性我们早在 2008 年有过研究，在 2012 年大亚湾发现较大 θ_{13} 后，JUNO 实验的可行性大大提高，2013 年得以正式立项，并且成立了国际合作组，包括国内外 55 个研究单位的约 400 名研究人员。

JUNO 实验将利用一个巨大的探测器，探测反应堆发出的中微子，精确测量中微子的能谱，首要科学目标是决定中微子的质量等级以及精确测量中微子振荡参数。研究发现原来的大亚湾反应堆的位置分布不适合进行 JUNO 实验，因此实验最终选址在江门市，距离阳江核电站和台山核电站的距离几乎相等，通过物理研究发现距离两者 53 km 是最佳位置。按计划，阳江核电站将建成 6 个 2.9GW 的反应堆，台山核电站将建成 4 个 4.6GW 的反应堆，总功率将达到 35.8GW。由于距离反应堆 53 km 比较远，中微子流强衰减严重，需要一个巨大的探测器才能收集到足够多的中微子事例。JUNO 探测器与大亚湾探测器相比，其靶质量要大一千倍。探测器基本构造如图 3 所示，中心有机玻璃罐内装有 2 万吨液闪，作为探测中微子的靶物质，通过 6 年取数，大概能探测到 10 万个中微子；有机玻璃罐外是一个直

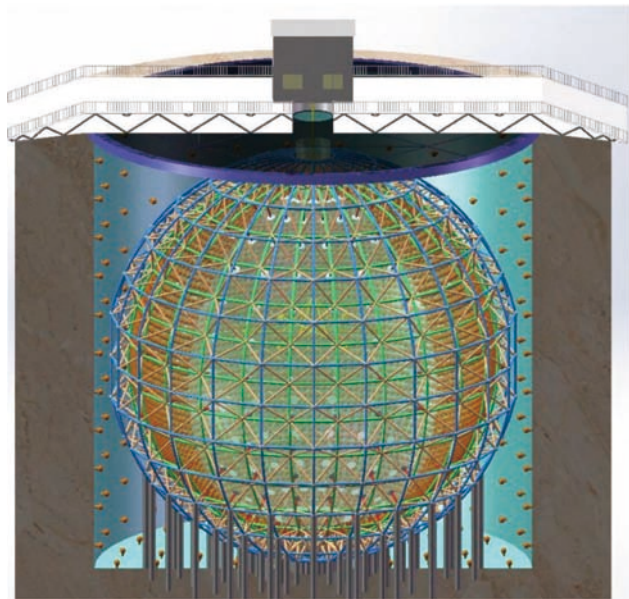


图 3 JUNO 实验探测器示意图，中心是一个装有 2 万吨液闪的有机玻璃罐，之外是直径 40 m 的不锈钢网架，网架内侧安装 17000 多个光电倍增管探测中微子信号

径 40 m 的不锈钢网架，内侧安装 17000 多个 20 英寸的光电倍增管，用来收集液闪中发出的光信号；整个球形结构被浸放在一个巨大的水池内，水池内安装了光电倍增管，构成水切伦科夫探测器，用来探测宇宙线缪子；水池上方覆盖由塑料闪烁体构成的宇宙线缪子探测器。为了阻挡宇宙线本底，整个实验大厅将建于地下 700 m 处。

JUNO 实验预期 2020 年建成取数，通过 6 年取数，测定中微子质量等级的灵敏度将达到 3 ~ 4 倍标准偏差，还将测量中微子振荡参数 $\sin^2 \theta_{12}$ 、 Δm_{21}^2 和 Δm_{31}^2 ，从目前 4% ~ 10% 的精度提高到好于 1%。除了研究反应堆中微子之外，JUNO 探测器作为未来最大的液闪探测器，在研究很多其他物理问题上具有独一无二的优势，可以研究地球中微子、超新星中微子、太阳中微子和惰性中微子。

反应堆中微子除了研究三代中微子振荡，还可以用来研究惰性中微子。所谓惰性中微子指的是可能存在的第四种中微子，不参加弱相互作用但是可以与三代中微子之间发生振荡，导致观测到的中微子数目减少。国际上有一系列的实验正在计划中，包括 PROSPECT、STEREO、SOLID 等，这些实验距离反

加速器中微子

何 苗

(中国科学院高能物理研究所 100049)

加速器是研究微观世界的重要工具。缪中微子与陶中微子均是通过质子加速后打靶产生介子衰变被首次发现。加速器产生的中微子束流,具有能量高、流强大、方向性好等特点,因此非常适用于进行中微子的研究。国际上短基线加速器实验被应用于研究中微子与物质的相互作用,以及寻找新型中微子等。而长基线实验则主要用于研究中微子振荡和测量振荡参数。下一代加速器中微子实验将致力于提高中微子流强和探测器体积及性能,从而研究中微子质量顺序和轻子 CP 破坏等重要的物理问题。

粒子加速器与中微子

高能粒子加速器是研究微观物质世界的重要工具。从 20 世纪 30 年代开始,科学家们就开始设计和建造各种粒子加速装置,把几乎静止的粒子加速成为高能量的“炮弹”并轰击静止的“靶”物质,观测原子核被击碎后产生的各种新粒子或新物理现象。之后又发展起来了对撞机的技术,将两束粒子分别加速之后再让它们迎头撞击,使得相同加速器功率下的质心系能量大大提高。2012 年,位于法国和瑞士边界的欧洲核子中心,正是利用周长达到 27 千米的环形质子对撞机发现了被称为“上帝粒子”的希格斯粒子,填补了粒子物理标准模型的最后一个缺口。而 1988 年建成的北京正负电子对撞机及其后续的升级改造,也对粲夸克和陶轻子的研究做出了重要贡献。

加速器在中微子的领域大显身手始于 20 世纪 60 年代。1956 年,莱因斯(F. Reines)与柯温(C. L. Cowan)在反应堆旁边首次观测到了电子型(反)中微子。之后,中微子是否存在不同的种类成为一

个重要研究方向。1962 年,美国科学家施瓦茨(M. Schwartz)、莱德曼(L. Lederman)和斯坦伯格(J. Steinberger)领导的研究小组利用布鲁克海文实验室的交变梯度同步加速器产生 15GeV 的质子束流。束流轰击铍靶产生介子,并进一步衰变产生中微子。研究人员在中微子与物质发生相互作用的产物中找到了缪子,而不是电子。由于轻子数守恒,这意味着存在一种新型的中微子——缪中微子。这一重要发现以及产生中微子束流的方法为以上三位科学家共赢得了 1988 年诺贝尔物理学奖。2000 年,美国费米实验室的万亿电子伏特加速器(Tevatron)将质子加速到更高的能量(800 GeV),并在其打靶的产物中找到了第三种中微子——陶中微子,成为标准模型中的重要成员。

加速器产生的中微子束流,具有能量高、流强大、方向性好等特点,因此非常适用于进行中微子的研究。传统的用于产生中微子束流的装置,由质子束流、靶、聚焦管道、衰变通道、垃圾站五部分组成(如图 1 所示)。其中质子束流正是来自于加速器。质子撞击的“靶”

应堆非常近,通常为几米到十几米,可以测量对应于质量平方差 $\Delta m^2 \approx 1 \text{ eV}^2$ 的地方是否有新的中微子振荡。

科学家们利用反应堆中微子第一次从实验中证实了中微子的存在,揭开了中微子实验研究的序幕。在之后的几十年间,科学家们利用反应堆中微子验证了太阳中微子的振荡模式,测量了振荡参数 $\sin^2 \theta_{12}$ 、

Δm^2_{21} , 发现了 θ_{13} 非零并且精确测量了这最后一个最小的中微子混合角。在未来的一二十年间,科学家们将利用反应堆中微子决定中微子的质量等级,并且进一步精确测量 6 个振荡参数中的 4 个: $\sin^2 \theta_{12}$ 、 Δm^2_{21} 、 $\sin^2 \theta_{13}$ 和 Δm^2_{31} , 以完善三代中微子振荡理论模型。除此之外,还将验证是否有惰性中微子存在。