

大亚湾实验发现新的中微子振荡

曹俊

2012年3月8日,大亚湾反应堆中微子实验发言人王贻芳在北京宣布:大亚湾实验以5.2倍标准偏差的置信度(>99.9999%)测得中微子混合角 θ_{13} 不为零,首次实验发现了中微子的第三种振荡模式。这次发现具有极为重要的科学意义,引起了巨大反响。

中微子极难探测,曾被称为“鬼”粒子,可是它像一只看不见的手,在最微观的世界和最宏观的宇宙中起着重要作用。这次发现不仅使我们更加理解基本的粒子物理规律,而且带来了一个好消息,用我们现有的技术手段,就可以开始研究宇宙中的反物质消失之谜,这是让物理学家感到兴奋的原因之一。

1. 中微子研究的里程碑

中微子共有三种,分别是电子中微子(ν_e)、 μ 中微子(ν_μ)、 τ 中微子(ν_τ)。它们与对应的三种带电轻子 e 、 μ 、 τ 以及六种夸克一起构成了物质世界的基本单元图1。

1930年,为了解释放射性 β 衰变中能量似乎不守恒,奥地利物理学家泡利提出可能存一种看不见摸不着的粒子,是它偷走了 β 衰变释放的能量。由于这个粒子曾与查德威克发现的中子混淆,后来被费

米正式命名为“中微子”。中微子是不带电、质量非常轻、几乎不与物质相互作用的粒子,因此极难探测。26年后,美国人柯万和莱因斯终于在核反应堆旁探测到了中微子。莱因斯获得了1995年的诺贝尔奖。他们探测到的是由核反应堆释放的反电子中微子。1962年,美国的莱德曼、施瓦茨和斯坦伯格在布鲁克海文实验室用加速器发现了第二种中微子—— μ 中微子,获得了1988年的诺贝尔奖。1989年,欧洲核子研究中心通过 Z^0 衰变截面的测量,证明存在且只存在三种中微子。最后一种中微子—— τ 中微子直到2000年才被美国费米实验室的DONUT实验发现。

1958年,戈德哈伯、格罗津斯和森亚在布鲁克海文实验室证明中微子是左旋的。李政道和杨振宁1956年提出弱相互作用中宇称不守恒,旋即被吴健雄的实验所证实。后来人们认识到,宇称不守恒本质上源于只存在左旋中微子,不存在右旋中微子,因此不可能发生涉及它的左右镜像过程。李杨随即提出中微子的二分量理论,认为中微子没有质量,后来被粒子物理的标准模型所继承。如果中微子有质量,其速度就不是光速,就有可能选择参考系,使左旋变成右旋,而我们并没有发现过右旋中微子。因此,一直到发现中微子振荡,我们一直

认为中微子是没有质量的。

二战后逃到苏联的意大利人庞蒂科夫在1957年提出,如果中微子有微小的质量,而且存在不同种类的中微子,有可能会出中微子振荡现象,即从一种中微子变成另外一种中微子。

1968年,布鲁克海文实验室的戴维斯在美国霍姆斯特克(Homestake)的一个废旧金矿中观测到了来自太阳的中微子,他发现测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”(图2)。中微子振荡是一个



图1 构成物质世界的12种基本粒子,其中3种为中微子



图2 戴维斯发现“太阳中微子失踪”

很自然的解释，然而仔细的研究发现，这个解释存在很多矛盾的地方，不同实验结果也不自洽。1978年，美国理论物理学家沃夫斯坦注意到电子中微子在物质中会受到电子的散射，将改变中微子的振荡效应。1986年，苏联的理论物理学家米赫耶夫和斯米尔诺夫将这个想法用于解释太阳中微子问题。后来人们才意识到，太阳中微子并不是在从太阳飞到地球的过程中发生振荡（真空振荡），而是在太阳内部的物质场内发生的，这样原来矛盾的地方就得以解释。

1998年日本的超级神冈实验以确凿的证据发现了大气中微子振荡（图3）。2001年，加拿大的SNO实验同时探测太阳中微子在探测器内发生的三种过程，发现电子中微子确实丢失了，但中微子的总数并没有变。2002年日本的KamLAND实验用反应堆中微子证实了太阳中微子振荡。2003年日本的K2K实验和2006年美国的MINOS实验也用加速器证实了大气中微子振荡。至此，中微子振荡现象被实验证据所确立。中微子振荡间接说明中微子有质量，这是目前发现的唯一超出粒子物理标准模

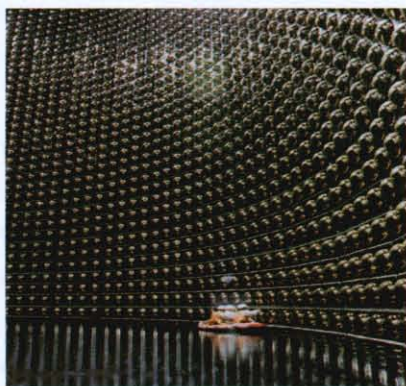


图3 日本的超级神冈中微子探测器内部

型的实验现象。

描述三种中微子的振荡需要六个参数。太阳中微子与大气中微子实验测出了其中的四个。剩下两个未知参数，一个是混合角 θ_{13} ，一个是CP破坏相角，它们不仅是自然界最基本的参数，也与宇宙起源中的反物质消失之谜有关。当宇宙大爆炸发生时，根据粒子物理规律，正反物质应该成对产生，是一样多的。可是我们现在的宇宙中，并没有发现大量反物质存在的迹象。那么反物质哪里去了？中微子存在振荡现象，同时意味着可能存在另一种不守恒，即电荷-宇称不守恒，就是上文说到的CP破坏（电荷用C表示，宇称用P表示）。李政道和杨振宁发现了宇称不守恒后，人们发现电荷和宇称乘起来一般来说却是守恒的，但也有很少的例外，称为CP破坏。如果存在大的CP破坏，那么在宇宙早期，反物质就有可能衰变得更快，导致现在的宇宙中只剩下了正物质。不过CP破坏很难测，现在还没有发现中微子的CP破坏现象。如果 θ_{13} 很大，那么我们就可以设计实验，去测量CP破坏的大小，破解反物质消失之谜。如果 θ_{13} 很小，则不能靠现有的技术测量到CP破坏。因此，在确立中微子振荡现象后，中微子研究的当务之急就是测量 θ_{13} 。

利用反应堆中微子可以测量 θ_{13} 。1998年法国CHOOZ实验和1999年美国Palo Verde实验发现它比另外两个混合角小得多，只给出了上限值。加速器中微子实验由于涉及参数比较多，不能精确测量 θ_{13} ，但是也能确定 θ_{13} 是否

非零。由于该测量的重要意义，自2003年起，先后有七个国家提出了八个方案，计划用反应堆精确测量 θ_{13} ，其中大亚湾实验规模最大，精度最高。最终有三个方案得以实施，分别是中国的大亚湾实验，法国的Double Chooz实验，和韩国的RENO实验。由于起初普遍认为 θ_{13} 将会很小，国际社会认为需要测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 到0.01的灵敏度，才能对中微子的未来发展起指导作用。只有大亚湾实验的测量精度达到了这个要求，Double Chooz和RENO实验的灵敏度只有0.02~0.03左右。2011年6月，日本的加速器实验T2K发表结果，他们观测到了6个电子中微子事例，预期本底为1.5个，表明 θ_{13} 可能会很大。由于日本大地震震坏了他们的加速器，短期内无法得到更可靠的结果。紧接着11月Double Chooz也表示看到了 θ_{13} 很大的迹象，但置信度还不如T2K实验。

2012年3月，大亚湾实验发表结果，发现了 θ_{13} 不为零的证据，其大小约为9度，虽然比另外两个混合角小得多，但比最初预计的大得多。这个大的 θ_{13} 混合角，促使我们可以重新思考中微子研究的路线图，在未来的几年或十几年中，在中微子质量等级、CP破坏相角，以及幺正性检验等方面，必将取得丰硕的成果。

2. 中微子振荡

中微子振荡是一种量子相干现象。中微子本身不能被探测，它

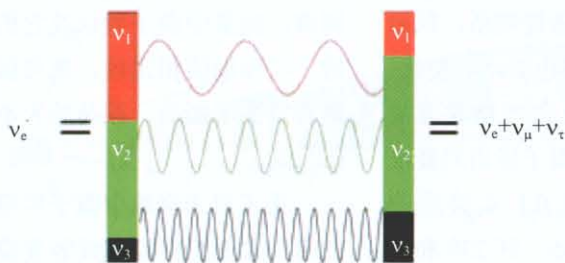


图4 中微子有一个特殊的性质,即它在以光速飞行的过程中会从一种类型转变成另一种类型,这种现象通常称为中微子振荡

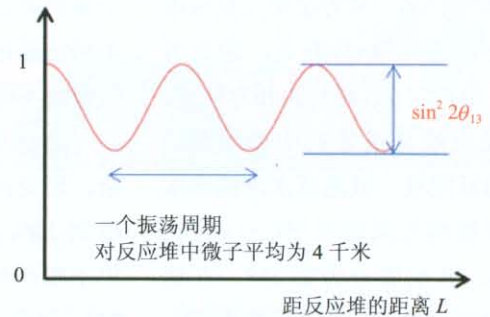


图5

的产生和探测必须通过弱相互作用,因此,产生时和被探测时都是味本征态,即电子中微子、 μ 中微子、或者 τ 中微子。中微子有质量,但是味本征态没有理由与质量本征态正好重合。这样产生出来的一个味本征态可以看作是三个不同质量本征态的线性叠加。在中微子以非常接近光速传播时,不同质量本征态的固有频率不同。飞行一段距离后,由于量子相干的结果,将会出现其他味本征态的分量,这样,一种中微子就有一部分变成了其他种类的中微子(图4)。微观的量子干涉现象能够在宏观上表现出来,主要得益于中微子的质量非常轻,与光速的差别一般小于十的负十几次到二十几次方。这样不同质量的中微子飞行速度相差无几,在长距离飞行后仍然能保持相干性。

三种味本征态由三种质量本征态组合,可以由一个 3×3 的混合矩阵表达,称为PMNS矩阵。为了使物理意义更清楚,可以将混合矩阵参数化为

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & e^{-i\delta} \sin\theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} \sin\theta_{13} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

其中第一项 θ_{23} 主要与大气中微子振荡相关,第三项 θ_{12} 主要与太阳中微子振荡相关,中间一项 θ_{13} 和 δ_{CP} 主要与反应堆中微子和长基线加速器中微子振荡相关。加上三种中微子之间的质量平方差(其中两个是独立的),这样共需要六个参数来描述中微子振荡。

在大亚湾反应堆中微子实验以前,6个振荡参数中由太阳中微子、大气中微子、反应堆和加速器实验已测得确切数值的有三个半: $\sin^2 2\theta_{12}$, $\sin^2 2\theta_{23}$, Δm_{21}^2 和 $|\Delta m_{32}^2|$;未知的包括 $\sin^2 2\theta_{13}$, δ_{CP} 和 $|\Delta m_{31}^2|$ 的符号(又称质量等级)。根据多个中微子实验数据拟合得到的振荡参数为(68%置信水平):

$$\begin{aligned} \Delta m_{21}^2 &= 7.58(1.00_{-0.034}^{+0.029}) \times 10^{-5} \text{eV}^2, \\ \sin^2 \theta_{12} &= 0.306(1.00_{-0.059}^{+0.049}) \\ |\Delta m_{32}^2| &= 2.35(1.00_{-0.038}^{+0.051}) \times 10^{-3} \text{eV}^2, \\ \sin^2 \theta_{23} &= 0.42(1.00_{-0.07}^{+0.19}) \end{aligned}$$

由于两个质量平方差相差30倍,中微子振荡经常可以近似地只考虑两代中微子的混合。例如对能量为 E (MeV)的反应堆中微子,飞行距离 L (米)后,仍然是同类

中微子的几率是

$$P_{sur} \approx 1 - \underbrace{\sin^2 2\theta_{13}}_{\text{振幅大小}} \cdot \underbrace{\sin^2(1.27 \cdot \Delta m_{31}^2 \cdot \frac{L}{E})}_{\text{振荡频率}}$$

上述几率也叫存活几率。相反地, $(1-P_{sur})$ 就是它转变为其他种类中微子的几率。大亚湾实验探测到的反应堆中微子的平均能量约为4 MeV,根据已知的 $|\Delta m_{32}^2|$,由存活几率可以算出振荡的极大值在2千米左右。在这个距离上,丢失的反应堆中微子约一半转化为反 μ 中微子,一半转化为反 τ 中微子。反应堆中微子的振荡示意图如图5,纵轴代表存活几率,它随距离呈余弦振荡。

3. 反应堆产生中微子

测量 θ_{13} 可以用长基线加速器实验来测量,一般是用高能质子打靶,产生出 π 介子, π 介子在飞行中衰变成 μ 中微子,然后在几百到几千千米外去探测中微子振荡,或者测量 μ 中微子的减少,或者测量电子中微子或 τ 中微子的出现。但是振荡几率与 θ_{13} 、质量等级、CP破坏相角三个参数,以及中微子穿过的地层物质密度有关系,因此物理上不干净,不能唯一地确定

θ_{13} 的大小。另一种方法是用反应堆中微子，它只跟 θ_{13} 有关，因此可以唯一地确定 θ_{13} ，造价也相对便宜。

反应堆是很好的中微子源。商用的反应堆一般是压水堆或沸水堆，核燃料为浓缩到 2% ~ 4% 的铀 235，其他成分为铀 238。在运行过程中，铀 238 可以俘获中子，产生钚 239 和钚 241。反应堆产生的能量和中微子主要由这四种核素裂变提供。这四种核素每次裂变释放的能量都在 200MeV 左右。裂变产物一般为不稳定的放射性同位素，反应堆中微子就是它们的 β 衰变释放的。裂变产物非常复杂，质量数有一个分布，轻的碎片平均质量数为 94，重的为 140。根据核素的 β 稳定线，这些碎片都是中子偏多的，平均需要 6 次 β 衰变才能变成稳定核素，因此每次裂变会释放出 6 个中微子。大亚湾一个反应堆的热功率为 2.9GW，根据每次裂变释放 200MeV 能量和 6 个中微子，可以估计出每秒钟释放 5×10^{20} 个中微子，各向同性地飞离反应堆，因此流强反比于距离平方。

与大部分反应堆中微子实验一样，大亚湾实验通过反 β 衰变反应来探测反应堆中微子。一个反应堆中微子与探测器靶物质中的氢核反应，生成一个正电子和一个中子。反 β 衰变反应的阈值是 1.8MeV。在反应堆释放的中微子中，只有 20% 能量大于阈值而能被探测到。大致说来，在 1 千米处探测器探测到的中微子数为 1 个事例每秒每 GW 每吨。由于四种核素释放的中微子不一样，而核素的成分随着反应堆燃烧而演化，燃料循环初期这

个事例率会比末期高约 10%。采用不同的液体闪烁体做靶物质，氢原子密度不同，事例率也会略有变化。

由于裂变反应的产物非常复杂，理论计算的中微子能谱只能准确到 10%。法国的 ILL 实验用热中子辐照纯的铀 235、钚 239 和钚 241，测量其 β 谱，然后逐段拟合，得到每种核素裂变释放的中微子能谱，经过实验检验，精度可以达到 1.9%。核素随时间的演化可以通过堆芯模拟得到，热功率可测量到 0.5% 的精度，再加上一些小的修正，反应堆中微子的流强现在可以准确计算到 2% ~ 3% 的精度。

4. 大亚湾实验的测量方案

中微子在探测器中发生反 β 衰变反应后，中微子的能量基本上被正电子所带走，因此测量到的正电子能量加上一个常数就是中微子能量。如果中微子发生振荡，那么在一定距离处看到的中微子数就会比预期减少，而且如上面的存活几率所显示的，不同能量的中微子振荡几率不一样，测量到的中微子能谱会发生有规律的变形。测量最灵敏的地点就是振荡极大值所在的 2 千米处。因此，

在距反应堆约 2 千米的地方放置探测器，测量中微子数以及它们的能谱，与预期值相比较，就可以知道是否发生了振荡，振荡的大小就是 $\sin^2 2\theta_{13}$ 。

为了对未来的中微子实验指明方向，大亚湾实验的灵敏度设计为 0.01，即只要 $\sin^2 2\theta_{13} > 0.01$ ，大亚湾实验就可以在 90% 的置信水平上测量出来。对应的误差为 0.6%。这在粒子物理实验中是一个非常高的精度。如果反应堆中微子的流强计算不准，当我们探测到的中微子数偏少一点点时，就无法判断是因为中微子振荡了，还是预期值计算得不准。流强的计算精度为 2% ~ 3%，实验的误差就不可能小于这个值。我们在距反应堆很近，振荡还没有发生的地方也放置探测器，用来监测反应堆的流强，通过远近点的相对测量，将这个误差抵消掉。由于



图 6 大亚湾实验的整体布局

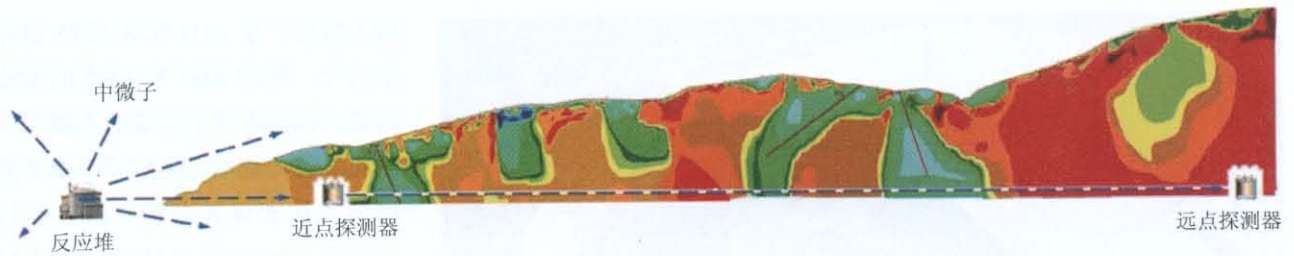


图7 探测器安装位置示意图

大亚湾的反应堆分得比较开，我们设计了两个近点，一个监测大亚湾核电站的两个堆，另一个监测岭澳核电站的四个堆（图6、图7）。

远近相对测量不仅能消除反应堆的误差，也能抵消大部分探测器的误差。比如说，大亚湾实验中作为中微子靶物质的液体闪烁体主要是用烷基苯配制成的，而烷基苯是一种混合物，它含的碳和氢的成分比例不能精确知道。通过化学方法可以测量到0.5%左右。如果我们对远近点的探测器用同样的液体闪烁体，虽然我们不知道具体的碳氢比例，但远近点是一样的，如果远点高估了，近点也会高估同样的大小，远近点一除，这个误差就抵消掉了。原则上，只要远近点的探测器一模一样，即使我们不知道绝对的探测效率，也不会给 θ_{13} 的测量带来误差。

实际上，不可能做出完全一样的探测器，它们之间的差别就是探测器的相对误差。通过模拟计算，我们估计可以做到使它们之间的相对误差小于0.38%。为了能过实验数据证明误差估计，我们设计每个点放多个探测器。其中两个近点各放两个中微子探测器，远点由于距离远，中微子流强随距离平方变得比较小，我们放置了四个探测器。通过比较同一个点的两个探测器探

测到的中微子事例，就可以确定出探测器的误差到底是多少。在获取了三个月的数据后，我们确定出探测器的相对误差仅为0.2%，好于设计指标。

为了加快实验进度，赢得国际竞争，实验的第一阶段并没有安装全部的8个中微子探测器，而只装了6个。其中岭澳近点和远点各少装了一个。实验的布局如图8。6个圆点表示6个反应堆，其中D1和D2是大亚湾核电站的两个堆，L1到L4是岭澳和岭澳二期核电站的4个堆。EH1表示1号实验厅，距大亚湾反应堆360米，安装了两个中微子

探测器AD1和AD2（图9），每个探测器每天约探测到700个中微子。EH2表示2号实验厅，距岭澳的反应堆平均约500米，安装了一个探测器AD3（图10），每天探测到约500个中微子。EH3是远点实验厅，距大亚湾1900米，距岭澳1550米，

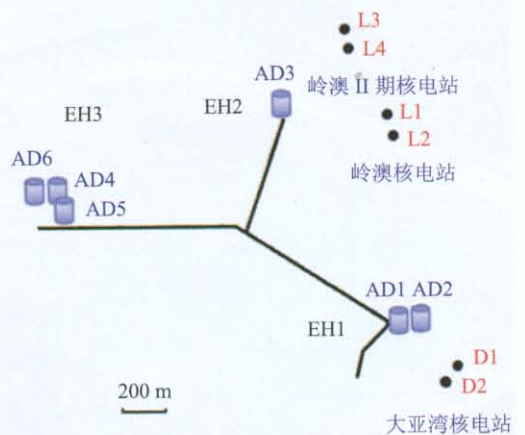


图8 实验布局图

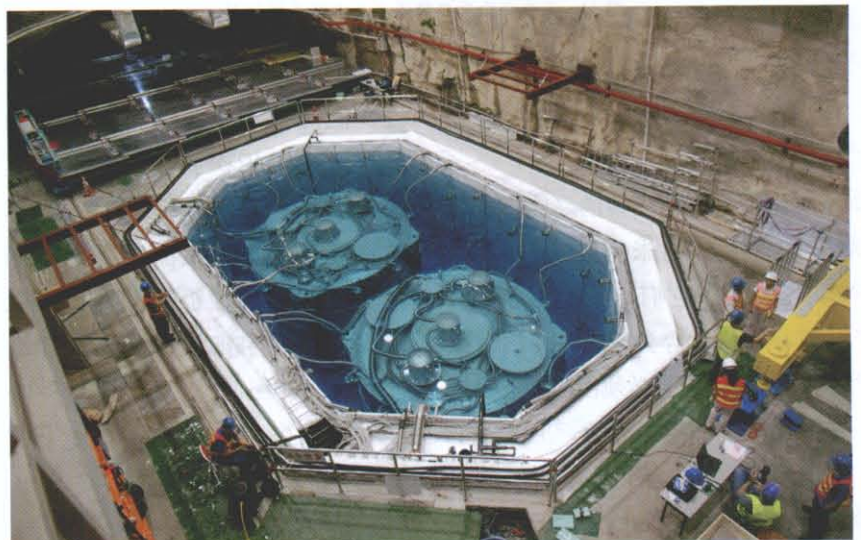


图9 1号实验厅安装了两个中微子探测器

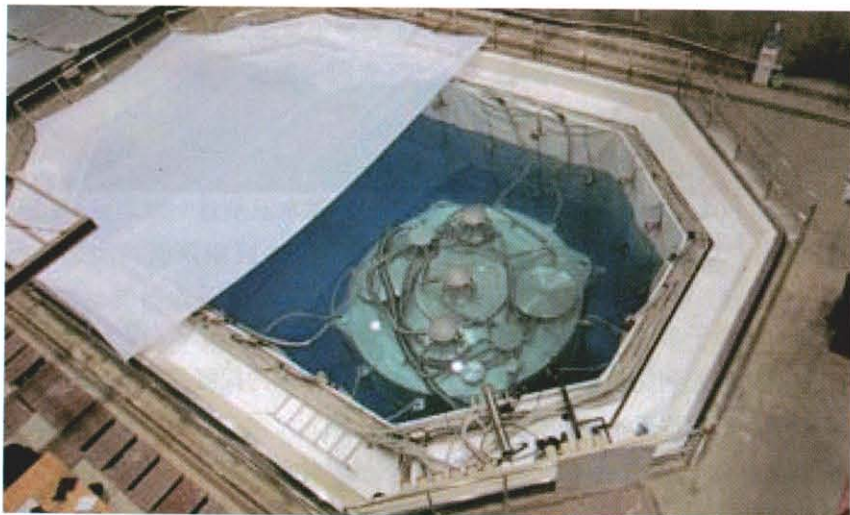


图 10 2号实验厅安装了一个中微子探测器

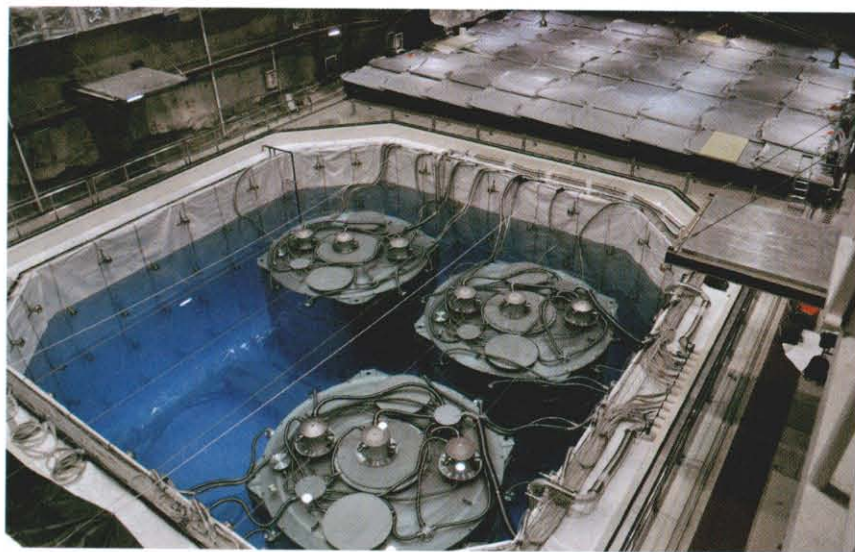


图 11 3号实验厅安装了3个中微子探测器

安装了三个探测器 AD4~AD6 (图 11), 每个探测器每天约探测到 70 个中微子。

地面上有相当多的高能宇宙射线, 大约每平方米每秒 200 个。这些宇宙线以及它们产生的次级粒子、长寿命同位素等会淹没稀少中微子信号。因此实验必须在地下进行, 依靠山来屏蔽宇宙射线。上述三个实验厅都位于地下, 用水平隧道相连。EH1 和 EH2 上的岩石约有 100 米厚, 而 EH3 则位于地下 350 米。

为了屏蔽岩石中的天然放射性, 同时探测宇宙线粒子以去除本底, 中微子探测器都浸泡在巨大的水池中, 四周至少有 2.5 米厚的水屏蔽。水池上面还有用来探测宇宙线的阻性板探测器。中微子探测器和宇宙线探测器的详细设计另文介绍。

5. 大亚湾实验的结果

大亚湾实验的近点实验 EH1

最先装好, 于 2011 年 8 月 15 日开始运行。通过 AD1 和 AD2 的实验数据, 我们进行了大量的本底和误差的研究, 基本上确定了中微子的挑选方法和误差分析。EH2 于 11 月 5 日开始运行, EH3 于 12 月 24 日开始运行, 开始三个点同时测量, 获取有意义的物理数据。

三个点每天获取的数据量约为 200GB。其中中微子事例只占极少的部分, 大部分是天然放射性和宇宙线带来的本底。例如, 对近点的一个探测器, 宇宙线事例是 21 Hz, 天然放射性是 280 Hz, 而中微子事例只有 0.01 Hz。为了将这些中微子事例挑出来, 首先要做宇宙线反符合, 就是由宇宙线探测器确定的每个宇宙线事例后面 200 微秒甚至 1 秒的时间内, 中微子探测器测到的事例都不要, 这样可以把宇宙线带来的本底基本上去除干净。然后需要做一个快慢符合测量, 要求一个信号后面 200 微秒内必须有一个 6 ~ 12MeV 的慢信号成对出现。这是因为中微子事例由正电子和中子信号组成。正电子在液体闪烁体中会马上发出闪烁光, 形成快信号, 中子则需要慢化成热中子, 然后在靶介质中的钷上俘获, 这个慢化时间常数是 28 微秒, 中子在钷上俘获放出的能量是 8MeV。加上其他一些辅助的挑选条件, 就可以干净地挑出中微子事例, 本底只占百分之几。在本底中, 大部分是可以精确确定数量的偶然符合本底, 经过仔细研究, 不确定性较大的其他本底共有 4 种, 只占信号的 0.5% 左右。

事实上, 不久我们就发现远点

的中微子丢失了，说明 θ_{13} 比我们预期的要大得多。分析了 55 天的数据后，远点的三个探测器共观测到约 1 万个中微子。通过远近点比较，我们发现远点的中微子数丢失了 6%，统计误差为 1.1%，系统误差仅为 0.4%。这个比值换算成混合角，通过更精确的 χ^2 分析，得到 $\sin^2 2\theta_{13}=0.092$ ，误差为 20%。

图 12 显示了三个实验厅内的六个中微子探测器测量到的中微子数与预期中微子数的比值。横坐标是中微子的飞行距离。纵坐标为 1 的虚线表示没有振荡。曲线为中微子的振荡曲线的最佳拟合值。在近点实验厅 EH1 和 EH2，振荡很小（这里的振荡主要来自较远的反应堆，比如从岭澳反应堆到大亚湾近点 EH1 的两个探测器距离超过 1 千米，已经有了一些振荡效应），在远点实验厅的 3 个探测器可以看到明显的振荡效应。小图中的 χ^2 分析表明 θ_{13} 不为零的置信度为 5.2 倍标准偏差。

这项发现一经公布，就在世界上引起了轰动，在不到一天的时间里，即有 1000 多条海外网络报道和评论。诺贝尔奖获得者李政道、卡洛·鲁比亚教授以及十几位各大实验室负责人和粒子物理实验的发言人向中国高能物理研究所发来贺信。李政道先生说：“这是物理学上具有重要基础意义的一项重大成就！”

引起轰动有几个原因。一是结果本身的重要性。2003 年美国物理学会将 θ_{13} 的测量列为中微子振荡研究的第一优先。为了这个数字，全世界研究中微子的物理学家已经等了 9 年。虽然去年 T2K 和

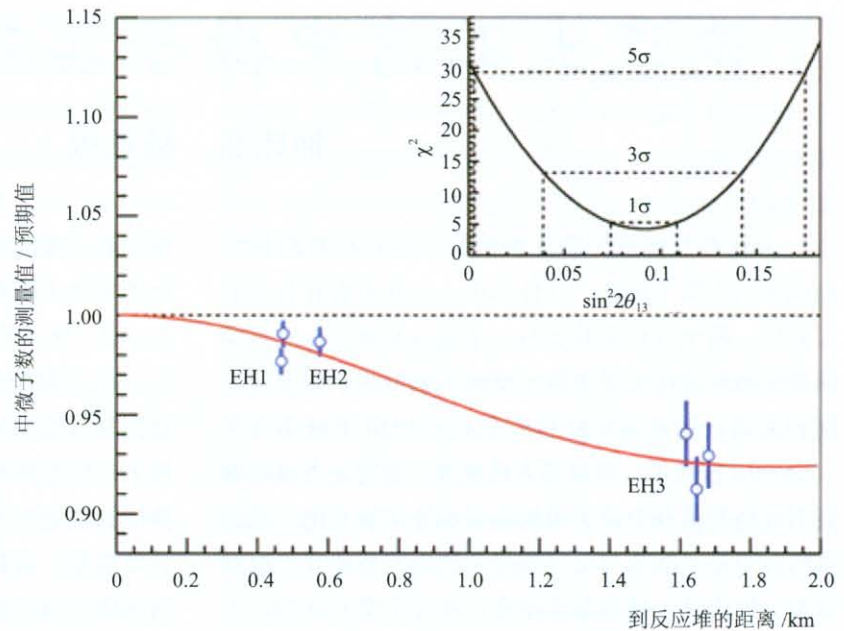


图 12

Double Chooz 实验发现了 θ_{13} 可能很大的迹象，但可靠程度不高，不能令人信服，只有大亚湾的结果才能称之为“发现”。二是 θ_{13} 出人意料的大。在 2003 年的时候，大家普遍认为 $\sin^2 2\theta_{13}$ 可能会在 0.01 ~ 0.03 之间，因此大亚湾实验将设计精度定为 0.01，结果几乎比预期大了 10 倍。而一个大的 θ_{13} 对中微子的下一步发展是一个大好消息，所有人都为此感到兴奋。第三，没有人预料到大亚湾实验会这么快这么好地公布结果。大部分人都预期最早会在 2012 年 6 月份国际中微子大会上公布。同时，大亚湾实验对系统误差和本底的控制也令人惊讶，达到非常高的水平。在设计时，我们发现要达到 0.01 的设计精度，系统误差必须小于 0.5%，设计误差为 0.38%，这已经是国际少见的精度，有很多人持怀疑态度。实际上通过分析数据，相对系统误差仅为 0.2%。

6. 展望

虽然已经取得重大成果，大亚湾的分析工作才刚刚开始。2012 年夏天，大亚湾将安装剩余的两个中微子探测器，同时进行全面的探测器刻度研究，结合能谱分析，提高实验的测量精度。现在测量到的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的误差为 20%，按大亚湾的设计，经过三年运行后，精度可以提高 4 倍，误差可以降低到 5%。精确测量的 θ_{13} 将对中微子研究的方方面面有重要影响。

此外，大亚湾还将研究中微子混合的质量平方差；精确测量反应堆中微子能谱，并研究反应堆中微子反常；测量宇宙线产生的同位素截面；研究超新星中微子；研究中微子非标准相互作用；初步研究中微子混合矩阵幺正性，寻找新物理，等等。

（中国科学院高能物理研究所 100049）