

· 科学家在想什么 ·

中微子——通往新物理之门

曹俊

(中国科学院高能物理研究所 100049)

希格斯粒子被发现之后，粒子物理进入了一个新的阶段。希格斯粒子是粒子物理标准模型的最后一个组成部分，它的发现意味着一个时代的结束，也预示着一个新时代的开启。标准模型是系统地描述整个粒子物理、经过大量实验检验的理论体系。建立标准模型的相关工作已获得了18次诺贝尔奖。找到希格斯粒子之后，标准模型趋近完善，具有优美的结构和惊人的预言能力；另一方面，却存在暗物质、暗能量、宇宙正反物质不对称性、中微子质量等一些标准模型无法容纳，或者难以解释的现象，说明必定存在着标准模型之外的新物理。

在标准模型中，中微子是没有质量的。中微子振荡的发现说明中微子有质量。这是目前发现的唯一有坚实实验证据超出标准模型的现象。

中微子

中微子共有三种，分别是电子中微子、 μ 中微子、 τ 中微子。在标准模型中它们的质量为零。1956年李政道和杨振宁预言弱作用宇称不守恒，即空间的左右不对称，很快被吴健雄用实验证实。实验也发现在弱作用中宇称不仅不守恒，而且是最大破坏的。造成这一现象的原因实质是只存在左手螺旋度的中

微子（即它的自旋总是与运动方向相反），不存在右手中微子。这只有中微子质量为零才能成立，因为质量不为零的话，那么中微子的速度必然小于光速，可以选择一个比它还快的参考系，让它的螺旋度发生翻转。根据这一现象，李政道和杨振宁提出了中微子的二分理论，该理论又催生了弱作用的V-A理论，被标准模型所继承，与各种实验数据符合得非常好。因此，在标准模型中，中微子是没有质量的。

然而，1998年日本超级神冈实验(Super-K)发现大气中微子存在振荡现象，即中微子在飞行中可以变成其他种类的中微子。与更早的太阳中微子失踪之谜，稍晚的SNO(太阳中微子)、KamLAND(反应堆中微子)、K2K(加速器中微子)等实验的结果一起，形成了中微子振荡的坚实证据。中微子振荡说明中微子有质量，只不过它非常非常小，以至于现有技术还不能直接测出来。

将中微子质量纳入标准模型中看上去不是大问题，像电子一样给它加一个质量项似乎就可以了。不过马上就会碰到两个问题。一个问题是怎么加。中微子自旋为1/2，是费米子。其他的费米子都是带电荷的，而中微子不带电。这

样，中微子可以像其他费米子一样，是狄拉克粒子，有一个狄拉克质量项，也可以是一种特殊的马约拉纳粒子，即它的反粒子就是它自身，只是螺旋度相反。另一个问题是中微子质量太小，如果简单加一个狄拉克质量项，那么它的质量与最重的顶夸克相差一万亿倍。同一个希格斯粒子，既要产生顶夸克那么大的质量，又要产生中微子那么小的质量，如此悬殊的差距让人很难相信。有一类很受物理学家喜欢的理论，叫“跷跷板机制”，它假定中微子是马约拉纳粒子，同时存在尚未发现的、质量远大于电弱能标的重中微子，这样中微子的微小质量可以得到很自然的解释。不过重中微子是无法填进标准模型的三代结构中的。

我们把具有确定质量的中微子（即质量本征态）叫 m_1 、 m_2 、 m_3 ，它们与味道本征态——电子中微子、 μ 中微子、 τ 中微子并不一一对应。例如，具有确定质量的 m_1 可以看成是由三种味道的中微子按某种比例组合而成，而具有确定味道的电子中微子也是由三种不同质量的中微子组合而成。正是这种混合导致了中微子振荡。

三代中微子的振荡可由6个参数描述，包括2个质量平方

差, 3 个混合角, 和 1 个 CP 破坏相角。太阳中微子实验测得了 $m_2^2 - m_1^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 和混合角 $\sin^2 2\theta_{12} = 0.86$, 大气中微子实验测得了 $|m_3^2 - m_2^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 和 $\sin^2 2\theta_{23} \approx 1$ 。大亚湾反应堆中微子实验测得了最后一个混合角 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.09$ 。未知的参数还剩下 CP 破坏相角。此外, 大气中微子实验不能确定 m_2 和 m_3 到底谁更重, 称为质量顺序 (或质量等级) 问题; 也没有确定 θ_{23} 针对 $\pi/4$ 的偏离取向, 后者被称为 θ_{23} 的八分圆问题。

通过中微子振荡只能测出中微子的质量平方差。精确测量 β 衰变的电子能谱端点, 或者测量无中微子双 β 衰变 (假如存在这类衰变的话), 可以得到中微子质量的另一个关系, 从而限定三种中微子的质量。然而这两类实验难度非常大, 近期能够成功的可能性很小。普朗克卫星最新的宇宙学观测给出了三种中微子质量之和的最佳测量结果, 为 $0.320 \pm 0.081 \text{ eV}$ 。

中微子的实验研究大致可以分成两类, 一类是中微子振荡研究, 另一类是非振荡物理, 包括绝对质量的测量、无中微子双 β 衰变、寻找惰性中微子、寻找非标准相互作用和反常磁矩, 以及中微子天文学等。

由于标准模型强大的预言能力, 在过去几十年, 不少新粒子或新现象都是先有理论预言, 再被实验发现, 因此被称为 “有保障的发现”, 包括一些获诺贝尔奖的发现如 W^\pm 和 Z^0 。随着希格斯粒子的

发现, “有保障的发现”基本上结束了, 新物理的突破需要更加艰难的探索。2012年, 除了希格斯粒子, 大亚湾实验还发现了一个较大的中微子混合角 θ_{13} 。这绝对是一个好消息, 它告诉我们, 中微子这个领域还有几个 “有保障的发现” 在不远处等着我们。我们可以在研究中微子未知性质的同时寻找新物理的突破口。

质量顺序的测量

在测得 θ_{13} 后, 测量质量顺序成为中微子研究的下一个热点。

我们已知 $m_2 > m_1$, 因为能量较高的太阳中微子振荡主要发生在太阳内部, 电子中微子与太阳内的电子发生带电流弱相互作用带来物质效应, 可以区分 m_2 与 m_1 的大小。大气中微子振荡则只能测得质量平方差的绝对值, 因此我们不清楚三种中微子的质量顺序是正的 ($m_3 > m_2 > m_1$) 还是反的 ($m_2 > m_1 > m_3$)。如果不知道质量顺序, 长基线加速器中微子的振荡几率不能确定, 因此也影响 CP 破坏的测量; 从宇宙学, 或者无中微子双 β 衰变实验,

或者 β 谱端点得到质量关系后, 也不能确定中微子的绝对质量; 假如中微子质量顺序为正, 我们有可能永远无法通过无中微子双 β 衰变实验来确定中微子是狄拉克粒子还是马约拉纳粒子。

我们曾经认为 θ_{13} 很小, 质量顺序、CP 破坏相角等未知参数用现有技术可能难以测量。因此, 十几年前人们就开始研制中微子工厂、 β 束流等新技术。大亚湾实验发现 θ_{13} 远大于预期, 因此用我们现有的技术就可以进行质量顺序和 CP 破坏的研究。国际上共提出了 8 个实验方案以测量质量顺序, 包括中国的江门中微子实验 (JUNO)、美国的 LBNE、美国在南极洲的 PINGU、日本的超超级神冈 (Hyper-K)、欧洲的 LBNO、韩国的 RENO-50、印度的 INO, 以及即将建成的美国 NOvA。其中 JUNO、LBNE、PINGU、Hyper-K 的竞争力较强。

利用反应堆中微子振荡中的干涉效应可以测量质量顺序, 其最佳基线 (即反应堆到探测器的距离)

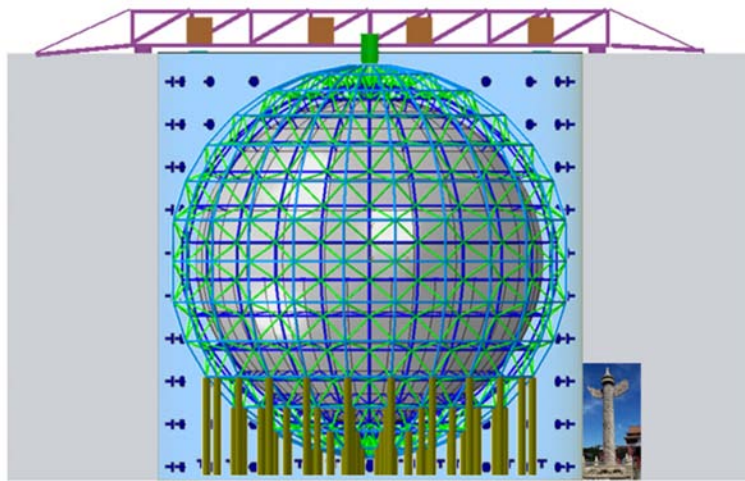


图1 江门中微子实验 2 万吨探测器示意图

约为 60 千米，需要很大的探测器和极佳的能量分辨率，从精确的能谱测量中确定这种干涉效应。2008 年高能物理所就提出了进行该实验的设想，称为大亚湾二期实验。发现 θ_{13} 很大后，实验难度大大降低，这项工作得以迅速提上日程。该实验要求探测器到各个反应堆的距离相等，否则干涉效应将相互抵消。由于大亚湾附近规划的反应堆布局不利于测量，2012 年确定在广东省江门的开平市建立实验站，位于距阳江核电站和台山核电站 53 千米处。实验将建设一个有效质量为 2 万吨的液体闪烁体探测器（图 1），位于地下 700 米，能量精度为 3%。最主要的难点是比以前最好的液体闪烁体探测器的能量精度还要高 1 倍。江门中微子实验预期 2020 年建成运行，6 年后可将质量顺序确定到 3 ~ 4 倍标准偏差。同时可以精确测量 $\sin^2 2\theta_{12}$ 和 2 个质量平方差参数到好于 1% 的精度，研究超新星中微子、太阳中微子、地球中微子、大气中微子，以及惰性中微子等。

LBNE 将在南达科它州的 Homestake 建立 1 万吨的液氩探测器，探测 1300 千米外费米实验室产生的加速器中微子束流，通过中微子穿过地球时的物质效应来确定质量顺序。实验原计划采用 3.4 万吨的探测器，目前只批准了 1 万吨，预期 2022 年建成。长基线加速器中微子实验对质量顺序的灵敏度严重依赖于 CP 破坏的大小。对 CP 破坏较大的一半参数空间，LBNE 在 10 年内可将质量顺序确定到 5

倍标准偏差。对另一半参数空间则为 2 ~ 5 倍标准偏差。实验的难点是建造 1 万吨的液氩探测器（以前最大为 600 吨）。同样利用费米实验室的加速器产生中微子的还有即将建成的 NOvA 实验，它在 730 千米外的明尼苏达州建立 5 万吨的塑料闪烁体探测器，有 1/4 的几率（参数空间）将质量顺序测量到 3 倍标准偏差。

大气中微子也可以用来确定质量顺序。高能原初宇宙线在大气中产生大量的中微子，它们在地球表面基本上均匀分布。超级神冈实验正是发现了贯穿地球的大气中微子随不同飞行距离的存活几率而发现了中微子振荡。穿过地球时的物质效应对正、反 μ 中微子的影响不同，在正、反质量顺序情况下的

影响也不同。超级神冈实验虽然有 5 万吨水，但仍不足以区分正反质量顺序。印度在建的 INO 实验是唯一能区分正、反 μ 子的大气中微子实验，但其质量也为 5 万吨，灵敏度不高。大气中微子有较宽的能谱，其中对质量顺序测量贡献最大的是 7 GeV 左右的中微子。南极洲的冰立方实验（图 2）可以探测到大气中微子，体积为 1 立方千米，即 10 亿吨，但能量阈值太高，不能探测 7 GeV 的 μ 中微子。因此，科学家计划在冰立方的中心重新建一个光电倍增管更密集，能探测到更多光子，因而能量阈值更低的实验，叫 PINGU，其有效质量 100 ~ 1000 万吨。3 年的数据量可以测量质量顺序到 3 倍标准偏差以上。实验的主要难点在于能否精确

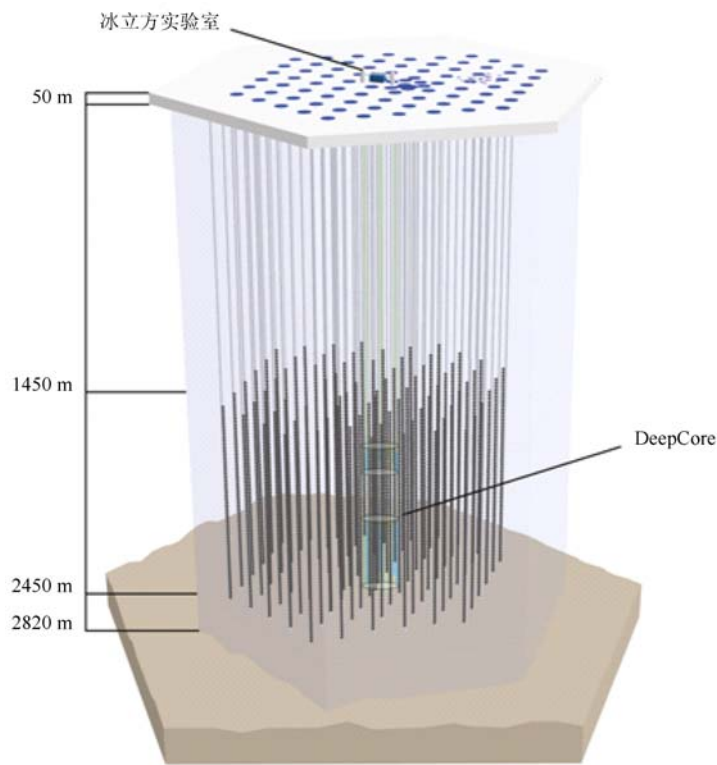


图 2 南极洲冰立方实验，PINGU 位于图中 DeepCore 处（来自 arXiv:1401.2046）

地将光电倍增管部署到冰下的预期位置，以及能否精确理解光子在冰层中的传播过程。PINGU 实验尚未批准。如果这些问题能解决，可能是测量质量顺序最快的实验。

继超级神冈之后，日本计划在原址旁新建超超级神冈(Hyper-K)，质量从 5 万吨提升到 100 万吨。Hyper-K 将探测来自 295 千米外日本散射中微子源 (J-Parc) 的中微子束流。由于 295 千米的距离较短，地球物质效应不够显著，运行 6 ~ 10 年后也只对不到 1/4 的参数空间能将质量顺序测量到 3 倍标准偏差以上。Hyper-K 也能探测大气中微子和超新星中微子。利用大气中微子对质量顺序的灵敏度更好，6 ~ 10 年的数据，对大部分参数空间都能测量到 3 倍标准偏差以上。

在这些实验中，JUNO、LBNE、NOvA、INO 已获批准，PINGU、Hyper-K 有较大的可能被批准(图 3)。这些实验涵盖了反应堆中微子、加速器中微子和大气中微子三种源，采用了不同的探测器技术。加速器实验用 μ 中微子束流，探测电子中微子的出现几率，灵敏度依赖于 CP 破坏相角。大气中微子探测 μ 中微子的消失几率，灵敏度依赖于 θ_{23} 对 $\pi/4$ 的偏离值。反应堆中微子实验则与 CP 破坏相角和 θ_{23} 的八分圆问题无关，但对能量精度要求很高。预期到 2025 年左右，我们能够通过不同的手段基本上确定中微子的质量顺序。

其他中微子振荡测量

中微子的 CP 破坏大概是剩下的“有保障的发现”中最重要的

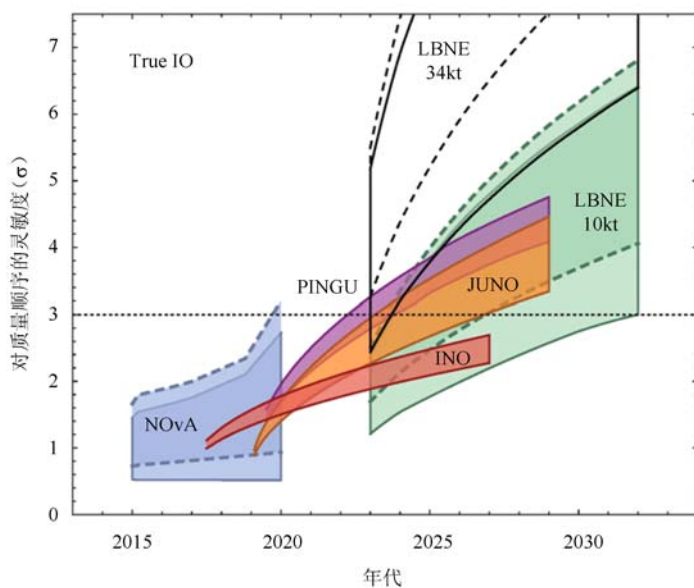


图 3 假如中微子真实质量顺序为反序，各实验对质量顺序的灵敏度。其中 NOvA、LBNE 的上下限相应于不同 CP 破坏相角，INO 和 PINGU 对应不同 θ_{23} ，JUNO 对应不同能量精度。PINGU 对正质量顺序的灵敏度更好 (来自 M. Blennow, JHEP 1403 (2014) 028)

一个。它与宇宙中正反物质的不对称可能相关。测量 CP 破坏最直接的方法是比较正、反中微子振荡的差别。只有加速器中微子实验比较容易做到这一点。通过改变质子打靶后的聚焦磁场方向，可以选择性地聚焦正粒子还是反粒子，从而产生正中微子或反中微子束流。由于质子带正电，产生的反中微子束流一般只有正中微子的 1/3 流强。从探测器测得它们振荡几率的差别，就可以测得 CP 破坏相角。LBNE 和 Hyper-K 实验可以测量 CP 破坏。如果 CP 破坏相角为 0° 或 180° ，则 CP 破坏效应为零， 90° 和 270° 处最大。到 2032 年，通过 10 年的测量，例如 3 年正中微子，7 年反中微子，LBNE 对 1/4 的参数空间可测量 CP 破坏到 3 倍标准偏差以上，而 Hyper-K 则有 3/4 的参数空间。

大气中微子和加速器中微子

实验都可以测量 θ_{23} 并确定它对 $\pi/4$ 的偏离。加速器中微子 LBNE 可以通过 μ 中微子消失几率的测量，对大部分参数空间将 θ_{23} 的精度测量到好于 1° ，对 θ_{23} 小于 40° 或大于 50° 的情况可以解决八分圆问题到 3 倍标准偏差以上。Hyper-K 通过大气中微子也可以测量到类似的精度。

预期到 2032 年左右，我们将能够有 3/4 的几率测量到中微子的 CP 破坏。对其他 5 个中微子振荡参数的测量精度将好于 1%。精确测量振荡参数将使我们能够检验混合矩阵的幺正性。假如存在超出标准模型的重中微子，例如像解释中微子微小质量的“跷跷板机制”所预言的那样，我们现有的技术手段也许无法直接寻找，但它们会对现有的中微子振荡产生间接影响。我们所测得的 3×3 混合矩阵将是一个更大的幺正矩阵的子矩阵，前者

本身不再满足么正性。通过精确测量混合参数，我们可以窥探更高能量下的新物理。

非振荡中微子研究

无中微子双 β 实验是一类极为重要的中微子实验。如果发现了这种现象，则说明中微子与其他费米子都不同，是马约拉纳粒子。现在有十多个实验，利用不同的探测技术和不同的同位素进行研究，例如 Gerda, CUORE, NEMO 等。EXO 是其中竞争力最强的实验之一。它利用液氙 (^{136}Xe) 同时作为双 β 衰变核素和探测介质，在极低成本、实验规模化上有较大优势。目前 EXO 实验采用 200 千克液氙，计划升级为 nEXO，靶质量为 5 吨，并继续提高探测器性能。特别是有可能实现独有的 Ba 离子标记技术，原则上可排除所有其他核素产生

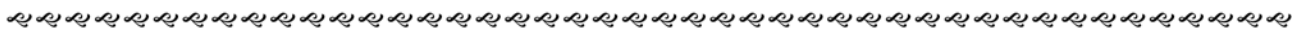
本底。

假如中微子具有反质量顺序，下一代的无中微子双 β 实验将能在未来 10 年确定中微子是狄拉克粒子还是马约拉纳粒子。假如质量顺序是正序则很糟糕，如果未能找到无中微子双 β 衰变现象，即使是下一代实验，也不能排除它为马约拉纳粒子。

为了解释 LSND 实验发现的极短距离的中微子振荡现象，有人认为存在着质量在 1 eV 附近的中微子。由于加速器上 Z^0 粒子衰变实验已经证明只有三种参与弱作用的中微子，只能假定存在一种标准模型之外的、不直接参与弱作用的粒子，称为“惰性中微子”。还有一些其他迹象支持惰性中微子的存在，如反应堆中微子反常、GELLEX 反常等。专门设计来验证

LSND 实验的 MiniBooNE 实验也未能得到明确的结果。惰性中微子激起了相当一部分人的兴趣。新设计的实验包括在距反应堆几米的地方测量中微子振荡、近距离的加速器中微子实验、利用放射源近距离测量中微子等。也许未来一二十年内能够证实或否定它的存在。

中微子也是一种新的天体物理的研究手段。中微子不带电，穿透能力强，因此能提供其他粒子无法提供的信息。南极洲的“冰立方”实验 2013 年发现了来自宇宙的极高能中微子，它们有可能提供极高能宇宙线起源的信息。探测超新星中微子、太阳中微子将带来星体内部的信息，帮助我们理解星体的形成与演化。地球中微子也能帮助我们刺探无法到达的地球内部，帮助理解地球的形成与演化。



科苑快讯

钻石瑕疵证明地球深处存在水

钻石瑕疵会降低珠宝成品的价值，但对地质学家来说却是宝贵的研究机会。肉眼很难发现的钻石微小瑕疵，帮助解决了地幔中存在水的长期争论。地表下 400 千米的地幔主要是称为橄榄石的矿物，并不吸收水。然而在此之下，高温和高压导致橄榄石变为不同的化学结构，其中之一称为尖晶橄榄石，实验室测试表明其中含有多达 2.5% 的水。

图中钻石出自巴西捷那地区，是由岩浆推到地表的，化学结构表明其形成于 400 千米深处。研究者在显微镜下发现钻石内部有一颗 40 微米的晶体，称为包裹体，光谱分析是尖晶橄榄石。发表在《自然》(Nature) 网站上的进一步分析，揭示了这块尖晶橄榄石包含氢氧键，说明晶格中至少含有 1.4% 的水。生成该钻石的地



方可能不是典型的下地幔，如果是下地幔的话，该处会存在大量水。这非常重要，因为地幔在温度变化时会排出高压蒸汽，导致火山喷发。

(高凌云编译自 2014 年 3 月 12 日 www.sciencemag.org)