

中微子研究的历史与未来

曹俊

(中国科学院高能物理研究所 100049)

中微子研究已有漫长的历史。从泡利 1930 年提出存在中微子的假说，迄今已有 85 年。从首次探测到中微子算起，也有 60 年历史。因为中微子难以探测，起初发展较为缓慢。1998 年日本超级神冈实验发现中微子振荡，迎来了中微子研究的黄金时代。各种研究蓬勃发展，美国甚至停掉了除大型强子对撞机以外的其他大型实验，将粒子物理研究的主要精力放在了中微子上。本文将简要回顾中微子研究的历史，并介绍现在和未来的中微子实验研究。

发现中微子

中微子最显著的特点就是几乎不与物质相互作用，因而穿透能力强，同时也使得探测非常困难。

我们身边的中微子其实非常多，例如一个典型的核反应堆每秒钟产生 6 万亿亿个中微子，每秒钟有 3 亿亿个太阳中微子穿过每个人的身体，宇宙大爆炸的残余中微子更是在整个宇宙空间内多达 330 个每立方厘米。大多数核过程都会产生中微子，例如宇宙线轰击大气、岩石的天然放射性、超新星爆炸，等等，连每个人都会因体内的钾 40 衰变而每天产生 4 亿个中微子。

这些中微子几乎自由地穿行，本身不能被探测，只有极少的一部分会被探测器捕获，变成可观测的粒子，因此现代的大型中微子实验动辄上万吨。以江门中微子实验为例，2 万吨液体闪烁体每天只能探测到 60 个反应堆中微子，4 个大气中微子，1 个地球中微子，以及 90 个硼 8 太阳中微子。与之相比，作为本底的宇宙线则有 10 万个，这还是将探测器放到地下 700 米，宇宙线流强降低了 20 万倍后的结果。

自从泡利预言中微子后，人们尝试了许多方法来寻找它，其中包括王淦昌 1941 年提出的 K 电子俘获方法，美国人阿伦用它得到了中微子存在的证据。但直到 1956 年，才由莱因斯 (F. Reines) 和柯温 (C.

Cowan) 首次直接探测到中微子，莱因斯因此获得了 1995 年的诺贝尔奖。

莱因斯是一名理论物理学家，他加入了曼哈顿项目，在费曼 (R. Feynman) 和提出太阳内部氢核聚变机制的贝特 (H. Bethe) 领导下，为洛斯阿拉莫斯实验室的理论组工作。莱因斯曾回忆说，他的理论物理思维方式在发现中微子的过程中至关重要，“因为一个靠谱的实验家会认为根本没有成功的可能。”

最初他和柯温的想法是在原子弹试验时，在靠近核爆中心的地下放一个探测器。核爆瞬间产生大量中微子，也许他们能抓到几个。后来在别人的劝说下放弃了这个疯狂的想法，改用更温和稳定的核反应堆。他们的第一个实验在汉福特反应堆进行，采用了 300 升液体闪烁体，这是当时最大的探测器。此前的物理实验很少采用 1 升以上的液体闪烁体。核武器试验产生了大科学工程的雏形，使他们敢于考虑“大规模”的实验。反应堆中微子在探测器中发生反贝塔衰变反应，产生正电子和中子，短时间内在液体闪烁体中先后形成两个信号，这种特征能极大地压低天然放射性本底。现代的反应堆实验，如大亚湾和江门中微子实验，依然沿用了这种原理。不过由于宇宙线本底没有屏蔽好，汉福特实验的结论并不清晰，1953 年他们发表论文说“可能”探测到了中微子。

汲取经验教训后，他们来到了更大的萨瓦纳河反应堆旁，在距反应堆 11 米、位于地下 12 米的地方，采用了更大的探测器，包括 400 千克氯化镉水溶液和 4200 升液体闪烁体。这次他们确凿无疑地找到了中微子。即便如此，由于探测中微子的困难性，贝特听到他们成功的消息后依然将信将疑，说“我们不能论文上写的什么东西都信”。也确实如此，莱因斯和柯温测得的反应截面与当时的理论符合很好，不幸的是，同年李政道和杨振宁提出宇称不守恒，导致中微子反应的理论截面

增大了一倍。他们重新分析了数据，又与新理论符合得很好，在同行中引起了非议。也许因为这个原因，如此重要的工作过了 39 年才被授予诺贝尔奖。

相较于首次发现中微子的曲折和扑朔迷离，发现第二种中微子的过程看上去要简单一些。1962 年莱德曼 (L. Lederman)、施瓦茨 (M. Schwartz) 和斯坦伯格 (J. Steinberger) 利用布鲁克海文实验室的 15GeV 质子加速器 AGS，建立了世界上第一条中微子束流。质子束流打击铍靶，产生了大量 π 介子， π 介子再衰变，变成一个缪子和一个中微子。由于质子能量很高，所有这些次级粒子都沿原质子的方向前冲，但只有中微子才能穿透 13.5 米厚的钢屏蔽层，到达 10 吨重的火花室探测器。中微子在探测器中发生核反应，生成带电轻子，从而被探测到。加速器产生的中微子数远不如核反应堆多，但能量要高几百倍，而中微子发生反应的截面大致正比于其能量，再加上加速器容易控制，因此比较干净地探测到了中微子。他们发现中微子束流在探测器中只能产生缪子，而不能产生电子，说明这是一种新的中微子，缪子与缪中微子、电子与电子中微子之间分别存在轻子数守恒。他们因此获得了 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 3 种中微子。最后一种中微子——陶中微子直到 2000 年才被美国费米实验室的 DONUT 实验发现。陶中微子的产生与探测都更加困难。质子由当时最强大的加速器 Tevatron 加速到 800 GeV，打在一大块钨上，产生粲介子 D_s ，它的衰变可以产生一个陶轻子和一个陶反中微子。陶轻子再衰变成陶中微子，穿过 36 米的屏蔽层到达探测器。同样，也只有中微子才能穿透屏蔽层。陶中微子在探测器中发生核反应，生成陶轻子，从而被探测到。陶轻子的寿命非常短，因此不像缪子和电子能在探测器中形成径迹，而是只有 1 毫米。为了探测它，DONUT 不得不采用了一种古老的技术——核乳胶，其主要成分就是传统相机胶卷上的显影成份溴化银。陶轻子衰变成缪子或电子，我们会在探测器中看到，在 1 毫米的径迹后，紧跟着一条转折后的长径迹。这个留在核乳胶上的“转折”是陶轻子的关键特征。DONUT 共

观察到 4 个这样的事例，预期本底只有 0.2 个，因此确凿地发现了陶中微子。

发现中微子振荡

标准模型中中微子质量为零，实验上也确实没有发现任何质量偏离零的现象。不过，庞蒂科夫 (B. Pontecorvo)、牧 (Z. Maki)、中川 (M. Nakagawa)、坂田 (S. Sakata) 等人在二十世纪五六十年代提出，假如中微子有小到难以察觉的质量，且质量本征态与味道本征态之间存在混合，就会出现中微子振荡现象，即一种中微子在飞行中能自发变成其他种类的中微子。本质上这是一种量子干涉现象。通过弱作用产生的中微子味道本征态（比如电子中微子），可看做是不同质量本征态的叠加。由于中微子质量极其微小，在接近光速的长距离飞行中，不同质量本征态能一直保持相干而不退耦，从而在宏观上表现出振荡现象。

中微子振荡最早由戴维斯 (R. Davis) 在探测太阳中微子时发现迹象。20 世纪 60 年代末他首次探测到了来自太阳的中微子，证实了太阳能量来自核聚变，被授予 2002 年诺贝尔奖。此后进一步的测量发现，探测到的太阳中微子比预期少，仅为三分之一，被称为“太阳中微子丢失之谜”。1988 年，梶田隆章 (T. Kajita) 与他的两位导师小柴昌俊 (M. Koshiba) 和户冢洋二 (Y. Totsuka) 在神冈实验中发现大气中微子也比预期少，被称为“大气中微子反常”。由于实验数据精度不高，以及对中微子振荡理解不深，这两个实验迹象未被普遍接受为中微子振荡的证据。

1987 年神冈实验与美国 IMB 实验探测到超新星中微子，小柴昌俊因此与戴维斯分享了 2002 年诺贝尔奖。更大的超级神冈实验得以于 1991 年开始建造，1996 年完成。探测器采用了 5 万吨纯净水，13000 个 20 英寸光电倍增管。超级神冈的科学目标包括太阳中微子、大气中微子、质子衰变等，后来还用做加速器中微子实验 K2K/T2K 的远端探测器。

来自太空的原初宇宙射线在地球大气层中会产生大量的粒子，包括我们通常说的宇宙线缪子，也包括其他带电粒子，以及大量中微子。后者称为大气中微子，包括电子中微子、缪中微子以及他们的反粒子。神冈实验发现大气中微子中的缪中微子与电子中微子

的比值比预期少。1998年，超级神冈实验精确测量了两种中微子个数与能量、方向的关系，发现缪中微子丢失的几率和它的传播距离和能量有关，这正是中微子振荡的关键证据。因此，超级神冈以确凿的证据发现了大气中微子的振荡。

为了解决“太阳中微子丢失之谜”，SNO实验采用加州大学陈华森建议的方法，用重水同时探测三种中微子。该实验位于加拿大萨德伯里地下2千米的一处废弃镍矿中，直径30米的地下探测器大厅内安放有直径12米的有机玻璃球型探测器，探测器内装有一千吨的重水，并安装1万个光电倍增管作为光信号探测单元。实验从1990年开始动工建设，1999年5月实验建成开始运行。

中微子在重水中可以有三种不同的反应：带电流、中性流、弹性散射过程。带电流只对电子中微子敏感，中性流对三种中微子同等敏感，而弹性散射对三种中微子都敏感，但电子中微子的反应截面是另外两种中微子的6倍。2001年SNO发现太阳中微子中的电子中微子确实丢失了，与超级神冈实验探测到的太阳中微子结果相结合，基本证实太阳中微子转变成了其他种类的中微子。2002年，SNO测得了全部三种中微子的流强，发现总流强与预期一致，给出了中微子转换的确凿证据，同时证明了太阳标准模型的正确。

2002年，铃木厚人(A. Suzuki)领导的KamLAND实验通过探测日本和韩国几十个反应堆发出的中微子，首次发现反应堆中微子的消失现象，其消失的幅度与太阳中微子测量结果一致。与此同时，西川公一郎(K. Nishikawa)领导的K2K实验，使用超级神冈作为远端探测器，测量250千米外日本高能所(KEK)加速器产生的中微子，首次观测到了加速器中微子振荡现象，其振荡行为与大气中微子振荡一致。这样，太阳和大气中微子振荡现象分别得到了反应堆和加速器等人工中微子源的验证。

中微子振荡由6个参数描述，太阳中微子振荡确定了其中的一组参数 $\sin^2 2\theta_{12} \sim 0.86$ 和 $\Delta m_{21}^2 \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ ，大气中微子振荡确定了另一组参数 $\sin^2 2\theta_{23} \sim 1$ 和 $|\Delta m_{32}^2| \sim 2.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ ，还有混合角 θ_{13} 和CP破坏相角 δ 未知。此外，大气中微子实验

不能确定 Δm_{32}^2 的符号，即两个质量本征态 m_2 和 m_3 到底谁更重，称为中微子质量顺序问题，也不能确定 θ_{23} 位于哪个象限。

2003年左右，中微子振荡现象已得到实验确立，寻找与混合角 θ_{13} 相关的第三种振荡模式成为研究的焦点。以前的近距离反应堆实验法国CHOOZ和美国Palo Verde，未能发现该振荡，因此这个混合角远小于另外两个，其具体数值的大小将决定中微子物理的发展方向。国际上先后提出八个反应堆中微子实验，以及多个加速器中微子实验，最终有三个反应堆中微子实验和两个加速器中微子实验进入实验建设阶段，包括中国的大亚湾、韩国的RENO以及法国的Double Chooz等三个反应堆中微子实验，以及日本T2K和美国NOvA两个加速器中微子实验。

大亚湾反应堆中微子实验坐落在我国广东省深圳的大亚湾核电站内，于2007年开始建设，2011年底投入运行。2012年3月，大亚湾实验以超过五倍标准偏差的置信水平率先给出了第三种振荡模式存在的证据，并精确测量了中微子参数 θ_{13} 的大小。其后得到另外两个反应堆中微子实验Double Chooz和RENO以及加速器中微子实验的证实，从而完善了中微子振荡的标准框架。

中微子振荡的现状与未来

在标准的中微子振荡理论中，还有质量顺序和CP破坏相角需要测量，也需要确定混合角 θ_{23} 是否偏离45度。它们不仅仅影响中微子振荡的大小、引导中微子味结构的更深层理论解释，质量顺序还决定了无中微子双贝塔衰变实验的前景，CP破坏相角的大小也是宇宙起源与演化必须解决的关键问题。对中微子混合参数的精确测量将使检验混合矩阵的幺正性、窥探新物理成为可能。

目前仍在运行的中微子振荡实验中，反应堆中微子实验有大亚湾、韩国RENO、法国Double Chooz，大气中微子有日本Super-K，太阳中微子有Super-K和意大利BOREXINO，加速器中微子实验有日本T2K和美国NOvA。三个反应堆中微子实验的主要物理目标是进一步提高 θ_{13} 测量精度，对未来测量质量顺序和CP破坏具有重要意义。大气与太阳中微子实

验主要在改进已有结果，没有重大的物理目标。

T2K 实验与 K2K 类似，也使用超级神冈作为远端探测器，但中微子源换成了 295 千米外的日本散裂中微子源 (J-Parc) 的中微子束流。2011 年 T2K 观测到了缪中微子束流中电子中微子的出现，最早给出了 θ_{13} 不为零的迹象，但因大地震加速器受损，未能给出更可靠的证据。最近 T2K 结合大亚湾给出的精确 θ_{13} 值，意外地给出了最大 CP 破坏的迹象，CP 相角为 270 度。

NOvA 实验利用费米实验室的加速器产生中微子，在 810 千米外的明尼苏达州建立 5 万吨的液体闪烁体探测器，最初的主要目标是测量 θ_{13} ，同时有一定几率测量质量顺序和 CP 破坏。2007 年开始建造，2014 年建成。刚投入运行的 NOvA 实验给出了与 T2K 同样的最大 CP 破坏迹象，同时倾向于正的质量顺序。如果这两个参数确实位于这种使 CP 破坏极大的组合，这两个实验将能在几年内在 3 倍标准偏差的置信度下给出初步的结论。

大亚湾实验发现 θ_{13} 值远大于预期，表明用现有技术就可以测量质量顺序和 CP 破坏，从而为未来的中微子研究铺平了道路，多个新的中微子实验已被批准或正在申请，包括中国的江门中微子实验 (JUNO)，美国 DUNE，日本 Hyper-K，印度 INO，韩国 RENO-50，美国在南极的 PINGU，法国在地中海的 ORCA 等。

江门中微子实验位于江门开平市，距阳江和台山核电站各 53 千米，以两万吨液体闪烁体作为中微子探测介质，实验厅位于地下 700 米。2013 年正式批准立项，2015 年开始建设，预计 2020 年建成开始运行。通过精确测量反应堆中微子能谱的变形，将在 6 年内确定质量顺序到 3 ~ 4 倍标准偏差的水平，也将以好于 1% 的精度测量多个中微子振荡参数，探测超新星中微子、地球中微子、太阳中微子、大气中微子等。韩国 RENO-50 与江门实验的方案与目标非常相似，但还未获批准。

大气中微子可以用来确定质量顺序。印度的 INO 实验已被批准，但灵敏度不高。南极州“冰立方”实验体积为 1 km³，即 10 亿吨，它可以探测到大气中微子，但能量阈值太高，不能探测对质量顺序最灵敏的 7 GeV 左右的缪中微子。因此，美国计划在“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 万 ~ 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。类似的实验还有法国在地中海的 ORCA 实验，实验方法和灵敏度都与 PINGU 相似。这两个实验尚未批准，但有较强竞争力。

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。计划 2025 年建成。它可以通过大气中微子测量中微子质量顺序，对大部分参数空间都能测量到 3 倍标准偏差以上。也可以探测来自 295 km 外日本散裂中微子源 (J-Parc) 的中微子束流，测量 CP 破坏。

美国的 DUNE 实验经过多年的讨论和重新优化设计，已于今年正式成立合作组，计划 2025 年建成。DUNE 实验计划采用 4 万吨液氩作为中微子探测的靶材料，已被批准的方案为 1 万吨。它将测量 1300 千米外费米实验室的加速器中微子，从而可以对中微子质量顺序和 CP 破坏现象做出高精度测量。对 CP 破坏较大的一半参数空间 DUNE 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。

通过这些新的实验，预期未来的 10 到 20 年，我们能完成对中微子振荡的研究。

蓬勃发展的中微子研究

中微子振荡是当前中微子研究的热点，但实际上中微子存在众多未解之谜，其他方面的研究也在蓬勃发展。

中微子振荡证明中微子有微小的质量，但具体数值仍然未知，正在通过贝塔衰变、无中微子双贝塔衰变，或者宇宙学测量等方法研究。根据已有的数据限制，估计最重的在 0.1 电子伏量级，与顶夸克差了 12 个数量级，最轻的仍不能排除为零。这带来了新的问题：它的质量也跟顶夸克一样，是由希格斯机制产生的吗？还是有新的产生机制？假如中微子是马约拉纳粒子，即它是自身的反粒子，那么现在流行的关于中微子质量产生的“跷跷板机制”能够比较自然地解释它为什么这么轻，但粒子物理的标准模型需要大的修改。

无中微子双贝塔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

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜；
她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2016 年《现代物理知识》每期定价 10 元，全年 6 期 60 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；合订本每本 50 元；2012 ~ 2015 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元。

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 EXO、Gerda、CUORE、NEMO、KamLAND-Zen、SNO+ 等。EXO 是其中竞争力最强的实验之一。它利用液氙 (^{136}Xe) 同时作为双贝塔衰变核素和探测介质。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。假如中微子是反质量顺序，下一代的无中微子双贝塔实验将能在未来 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情况比较糟，如果实验未有正结果，即使是下一代实验，也不能给出结论。

为了解释美国 LSND 实验 20 世纪 90 年代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 1eV 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粒子，只有两个独立的质量平方差，因此只能假定这种粒子不参与弱作用，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和 GELLEX 反常。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，等等。也许未来 10 年内能够解释这个谜团。

中微子也是一种新的天体物理的研究手段。它穿透能力强，是独一无二的研究天体内部的探针。中微子天文学刚刚兴起，将在太阳物理、地球物理、超新星爆发、宇宙起源、宇宙线起源等方面有较大发展。特别是南极洲的“冰立方”实验 2013 年发现了来自宇宙的极高能中微子，未来进一步升级后，有可能解决宇宙线起源的百年之谜。