

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_{21}^2 , 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_{21}^2 、 $\sin^2 \theta_{13}$ 和 Δm_{31}^2 , 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。

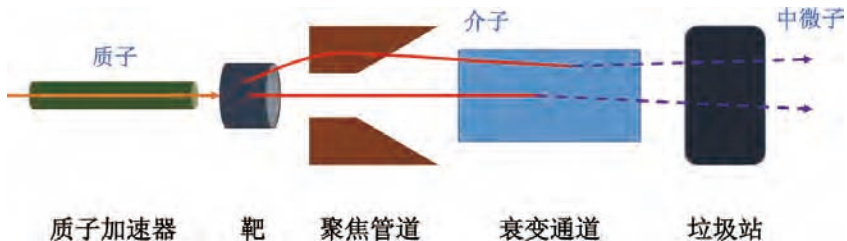


图1 加速器产生中微子

通常由耐高温的材料制成，如石墨等，以抵抗高功率束流带来的巨大的热量。碰撞产生的不同方向的带电粒子通过一个加磁场的聚焦管道变成同一个方向。聚焦管道通常设计成牛角的形状，使得不同横向动量的粒子都能够得到聚焦，而改变磁场方向则可以按需挑选出带正电或带负电的介子。聚焦后的介子在数百米长的衰变通道中产生中微子或它的反粒子。最后，尚未衰变的介子跟其他除中微子以外的衰变产物一起被传送到厚重的垃圾站中被吸收，避免造成放射性的污染。

短基线加速器物理和实验

在发现缪中微子之后，世界各地建造了多条加速器中微子束流，并将中微子探测器放置在距离束流很近的地方，通常相隔只有几十米，用于研究中微子与物质发生的相互作用（如图2所示）。中微子飞行的距离又叫基线，所以这样的实验一般被称为短基线中微子实验。短基线实验在标准模型建立的过程中起到了至关重要的作用。例如，1973年，欧洲核子中心观测到加速器缪子与强子或电子通过“中性流”发生弱相互作用的过程，成为电弱统一理论的重要证据，并为电弱统一理论的三位创始人温伯格（S.

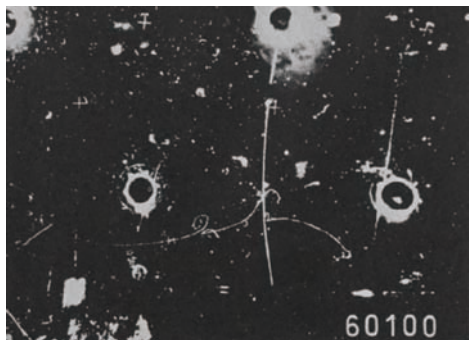


图2 缪中微子与电子的中性流反应（图片来源：*Phys. Lett.* 46B 121）

Weinberg）、萨拉姆（A. Salam）和格拉肖（S. Glashow）带来了1979年诺贝尔物理学奖。

在标准模型中，中微子没有质量。然而，从电子中微子和缪子中微子被发现不久开始，牧二郎（Z. Maki）、中川昌美（M. Nakagawa）、坂田昌一（S. Sakata）和庞蒂科夫（Pontecorvo）等几位科学家就已经提出了不同类型的中微子之间可以互相转化，或者说中微子发生振荡变成另一种类型，而这种情形必须在中微子质量不为零的前提下才能出现。因此，后期的短基线加速器实验也同时承担了搜寻中微子振荡的任务。其中大部分实验都没有发现中微子的类型发生改变，仅有的例外是美国的LSND和MiniBooNE实验。这些短基线的实验结果无法用现有的三代中微子振荡来解释，而必须引入第四代甚至第五代中微子，因此成为了探索更多种类中微子的重要线索。

长基线加速器物理和实验

1998年，日本的梶田隆章（T. Kajita）代表超级神冈（Super-Kamiokande）国际合作组在第十八届国际中微子大会上给出了大气中微子振荡的证据。2001年和2002年，加拿大的麦克唐纳（A. McDonald）领导的萨德伯里中微子观测站（Sudbury Neutrino Observatory）国际合作组先后发表两篇文章，证实了太阳中微子振荡。这两个重大发现揭示了中微子存在质量，超出了人们对物质世界的认识，为新物理打开了一扇窗户。梶田隆章和麦克唐纳也因此分享了2015年诺贝尔物理学奖。

大气中微子是由宇宙这个天然的粒子加速器产生的。高能宇宙射线（主要是质子）穿过地球附近，与地球大气层发生相互作用产生介子，再进一步衰变产生中微子。中微子振荡具有周期性，振荡频率由两种中微子的质量平方差决定，振荡幅度则由中微子的混合角确定，振荡几率和中微子的传播距离 L 与中微子能量 E 之比有关。超级神冈观测到的大气中微子振荡对应的两种中微子的质量平方差在万分之五到千分之六 eV^2 之间，第一个振荡极大值位于 $L/E \approx 200 \sim 2000 \text{ km/GeV}$ 附近。也就是说，如果利用

加速器产生能量为 1 GeV 的中微子，那么探测器需要放置在数百千米之外才能得到最好的探测效果，因此这样的实验被称为长基线加速器实验。

国际上第一个长基线加速器实验是日本的 K2K 实验。中微子束流由位于东京附近的高能加速器研究机构 (KEK) 提供，探测器位于日本西部神冈 (Kamioka) 的一个矿井中，也就是超级神冈使用的探测器，主体部分为 5 万吨纯水，通过观察中微子与水发生带电电流作用产生带电轻子并发出的切伦科夫光来测量中微子的方向、能量并鉴别中微子的种类。束流平均能量为 1.4 GeV，飞行距离约为 250 km。2003 年，K2K 首次公布实验结果，观测到了缪中微子的消失：预期可以看到 158 个事例，实际只看了 112 个事例。同时，不同能量的中微子消失几率不一样，与中微子振荡的理论及超级神冈测到的中微子振荡参数完全一致。这是国际上首次通过人工的中微子源证实大气中微子振荡。

随后，日本在 KEK 东北方向的东海 (Tokai) 建立了质子加速器研究机构 (J-PARC)，将束流功率提高到 100 千瓦量级，可以产生更多的中微子。中微子平均能量约为 600 MeV，到超级神冈的距离 295 km (如图 3 所示)。束流方向并不是正对超级神冈探测器，而是设计成 2.5° 的夹角，这样虽然损失了部分中微子流强，但中微子的能量更加集中，有利于探测最后一个未知的混合角 θ_{13} 。新一代的长基线加速器实验 T2K 于 2010 年开始运行。然而，2011 年 3 月日本发生大地震，加速器被损坏，实验被迫暂停。2011 年 7 月，T2K 根据已经获取的数据公布了首次实验结果，在干净的中微子束流中找到了 6 个电子中微子，而预期的本底只有 1.5 个。这个结果表明缪中微子很可能振荡

到了电子中微子，即 θ_{13} 不为零，置信度为 2.5 倍标准偏差。除了观测缪中微子到电子中微子的振荡之外，T2K 还通过观测缪中微子的消失大大提高了质量平方差 Δm_{32}^2 和混合角 θ_{23} 的测量精度，其中 θ_{23} 的精度为目前的世界之最。2014 年，T2K 将自己的缪子到电子中微子振荡的数据与反应堆实验测量电子中微子消失的结果进行联合分析，结果暗示描述轻子宇称 - 电荷共轭 (CP) 破坏的相角在 270° 附近。

在 T2K 公布找到电子中微子后不久，美国的 MINOS 实验也发表了类似的结果，显著性为 1.7 倍标准偏差。MINOS 探测的中微子束流来自于著名的费米国家实验室，基线长度达到 735 km (如图 4 所示)。

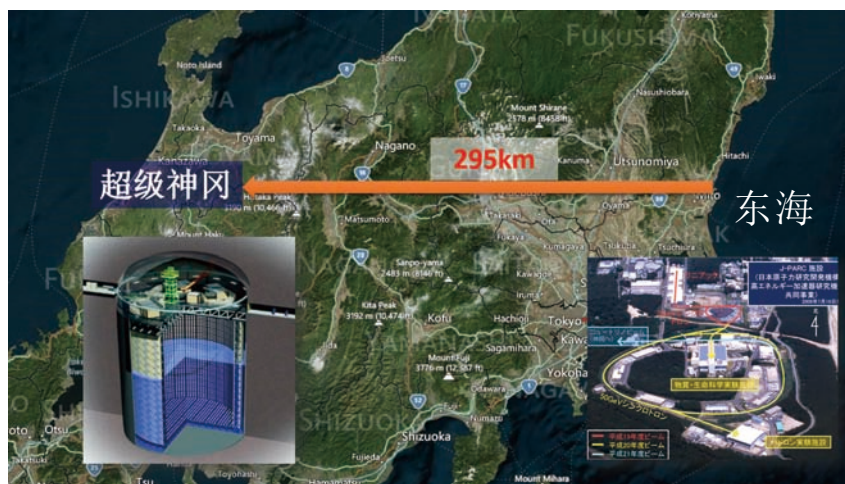


图 3 日本 T2K 实验

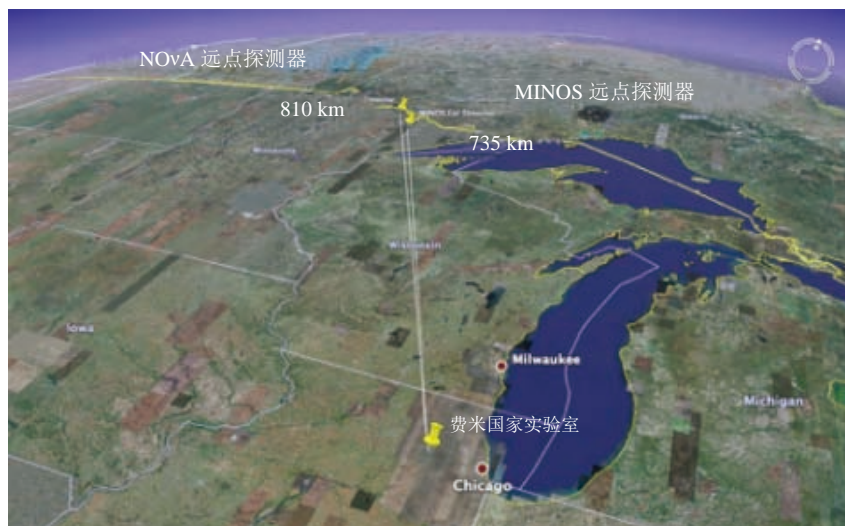


图 4 美国 MINOS 实验和 NOvA 实验

探测器位于明尼苏达州苏丹的一个矿井中，由总共 5400 吨铁和闪烁体交替排列而成，对于缪中微子的探测能力远好于电子中微子。事实上，MINOS 早在 2005 年就开始运行，是国际上第一个分别观测到正反缪中微子消失的实验，还曾经报道过正反中微子的消失几率有 98% 的可能性不一样。这可是一个不亚于中微子超光速的新闻，因为它打破了描述基本粒子最基本的 CPT 定理。好在 MINOS 增加了数据量之后，发现两者又趋于一致，之前看到的差别只能用实验数据的涨落来解释。MINOS 的探测器正对束流方向，能谱比较宽，因此更加有利于测量中微子的振荡频率，从而给出了世界上最精确的 Δm_{32}^2 的测量结果。

与 MINOS 相隔不远的 NOvA 实验，同样探测来自费米实验室的中微子束流，只是与束流方向存在 0.8° 的夹角，基线为 810 km（如图 4 所示）。NOvA 建造了 1 万 4 千吨分小单元的液体闪烁体探测器，对电子中微子的探测效果比较好。2015 年，利用两种不同的分析方法（事例挑选效率不同），NOvA 分别观测到 6 个和 11 个电子中微子，跟反应堆实验的结果联合之后，同样指出 CP 相角可能在 270° 附近。

加速器产生的缪中微子消失之后，大部分都变成了陶中微子。由于陶子的质量很大，达到 1.8 GeV，因此只有能量很高的陶中微子才能发生带电流反应从而被识别和探测到。另一方面，陶子的寿命很短，在产生之后的万亿分之一秒时间内几乎都会衰变，因此陶中微子的探测十分困难，需要探测器的特殊设计，同时测量数百微米的陶子径迹，及其次级粒子在陶子衰变顶点附近的拐弯。欧洲核子中心建立了一条指向意大利格兰萨索地下实验室的中微子束流线，而位于格兰萨索的 OPERA 实验正是被设计用来探测缪中微子到陶中微子的振荡（测量中微子的飞行速度只是它的副产品）。OPERA 使用了 1800 吨夹在铅块之间的感光乳剂，从 2006 年开始运行，至今总共找到 5 个陶中微子，是缪中微子振荡到陶中微子的直接证据（如图 5 所示）。同样位于格兰萨索的 ICARUS 实验，则致力于发展探测器技术，建造了 600 吨液氩探测器，具有优秀的

径迹重建和粒子识别能力，代表了下一代加速器中微子实验的发展方向。

加速器中微子的未来

尽管现代的加速器中微子实验才开始运行不过几年时间，下一代实验的规划和设计早就已经开始了。下一代加速器实验试图解决中微子和中微子振荡研究中遗留的几大难题，如中微子的质量顺序（Mass Hierarchy）、轻子 CP 破坏、是否存在三代以外的中微子、 θ_{23} 是否等于 45° 等。这些难题对实验提出了更高的要求。例如，CP 破坏只会对中微子振荡的行为产生小的改变，只有当发生振荡的次数足够多了之后，才有可能体现出 CP 破坏的效果。尽管 T2K 和 NOvA 已经对 CP 相角可能的范围给出了一点点的暗示，但这样的暗示实在太不明显了，更何况这个结果还严重依赖于反应堆实验（主要是大亚湾）对 θ_{13} 的测量，并不是一个独立的测量结果。因此，设计和建造更好的实验迫在眉睫。

利用加速器中微子探测质量顺序和 CP 破坏，通常通过比较正反缪中微子各自振荡到正反电子中微子的差别来实现。其中，中微子在穿行地球的过程中，与物质中的电子发生特殊的物质效应，改变振荡几率。如果质量顺序为正，对于电子中微子来说，振荡效应被加强；而电子反中微子的振荡效应被减弱。而质量顺序为负的情况下两者正好颠倒。基线越长，中微子在地球中发生的物质效应也越强。CP 相角也会改变

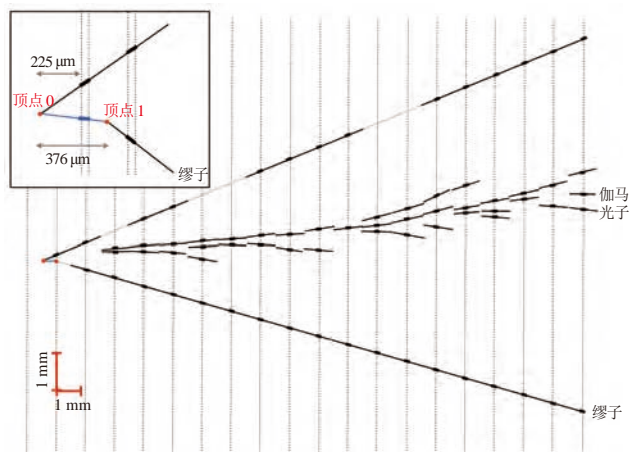


图 5 OPERA 找到的其中一个陶中微子事例（图片来源：*PhysRevD.89.051102*）

振荡几率，正的 CP 相角会减弱缪中微子到电子中微子的振荡，而加强缪子反中微子到电子反中微子的振荡。图 6 显示了正反中微子振荡几率的相对差别 (Asymmetry) 与质量顺序及 CP 相角 (δ_{CP}) 的关系，并比较了基线为 295km 和 1300km 两种情况。可以看出，基线较长的实验更容易同时确定质量顺序和 CP 相角，而基线较短的实验比较适合单独测量 CP 相角。

为了提高实验的灵敏度，最有效的途径就是增加中微子的数量。目前国际上最先进中微子束流生产基地，如日本的 J-PARC，美国费米实验室和欧洲核子中心，它们的加速器功率都小于 1 兆瓦。而它们的共同目标都是突破 1 兆瓦大关，建成传说中的“中微子超级束流”，实现中微子数目量级上的提升。而探测器方面当然也不甘示弱，朝着更大更强的方向发展。水切伦科夫类型的探测器定位为 50 万至 100 万吨量级，比世界上现有的同类探测器大了整整一个量级，代表实验为日本的超超级神冈 (如图 7 所示)。而以液氙为代表的新型探测器，凭借其出色的粒子识别能力，希望达到“小”而精的效果，代表实验为美国和欧洲联合推动的 DUNE。

超超级神冈 (HyperK) 顾名思义就是超级神冈的升级版，总共包含 99 万吨水，其中有效体积为 56 万吨，是真正的巨无霸。而 T2K 也将随之升级为 T2HK。考虑到加速器功率的提高，T2HK 运行一年获取的数据量相当于 T2K 的 50~100 倍。如果得到批准，T2HK 计划于 2018 年开始建设，2025 年开始运行，运行十年之后，将有 60% 的可能性确定 CP 相角 (置信度达到 5 倍标准偏差)。

DUNE 实验计划在当

年戴维斯 (R. Davis) 观测太阳中微子的霍姆斯特克矿井中，建立重达 4 万吨的液氙探测器，探测来自费米实验室的中微子束流，基线为 1300km (如图 8 所示)。DUNE 预计在 2030 年以前开始运行。由于基线更长，运行十年之后，就能使测量中微子质量顺序的灵敏度达到 5 倍标准偏差，而测量 CP 相角的灵敏度则略逊于 T2HK。

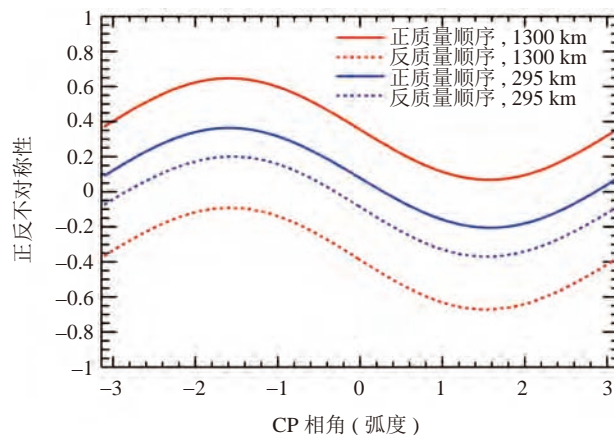


图 6 正反中微子振荡几率的差别

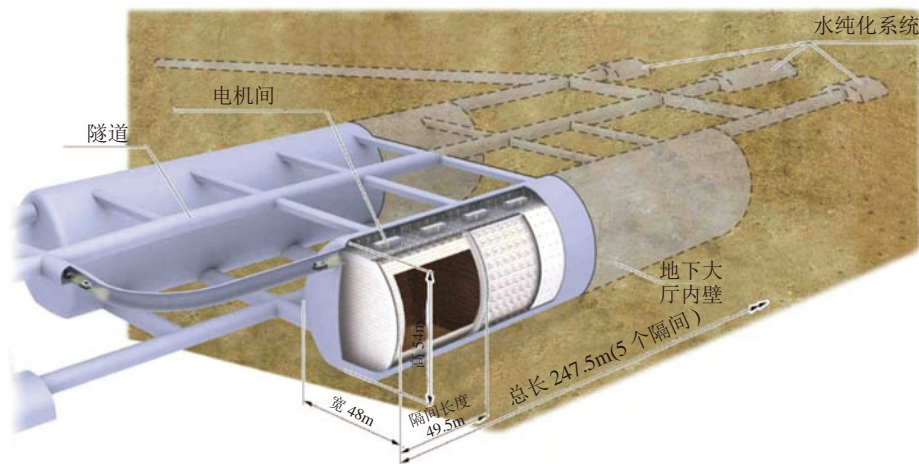


图 7 超超级神冈探测器 (图片来源: <http://arxiv.org/abs/1109.3262>)

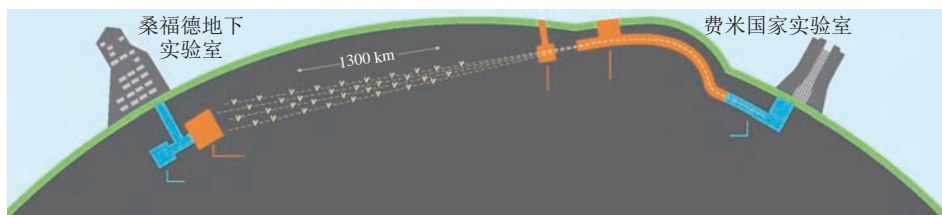


图 8 DUNE 实验 (图片来源: <http://www.dunescience.org/>)

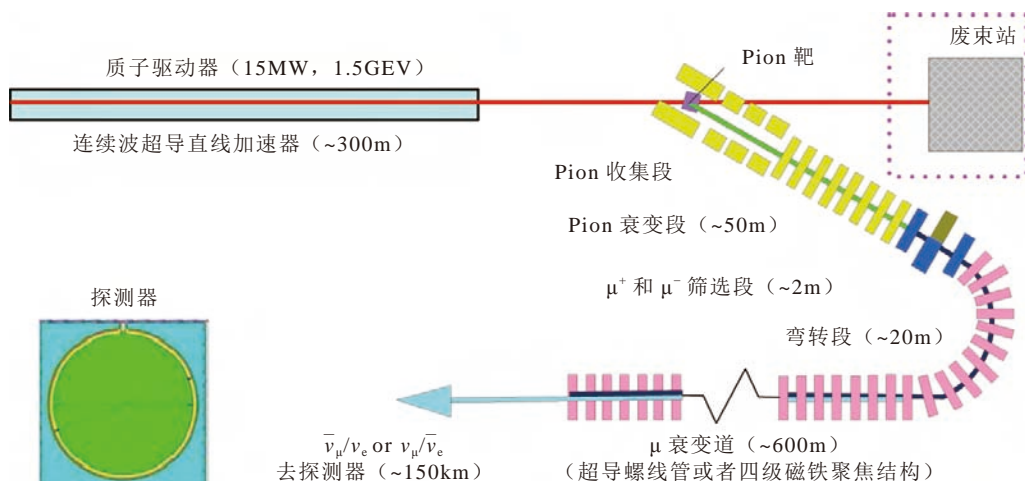


图9 MOMENT 实验方案

除了这两个实验外，国际上正在计划中的实验还包括基于欧洲散裂中微子源 (ESS) 的 ESSvSB，和基于小型商用回旋质子加速器的 DAE δ ALUS。它们的主要目标都是探测 CP 破坏。此外，除了传统的介子衰变产生缪中微子束流，通过加速贝塔放射性核素能够提供电子反中微子束流。而未来的“中微子工厂”则希望对介子衰变产生的缪子进行二次加速，从而同时得到缪子衰变产生的缪子型和电子型两种中微子束流。增加中微子束流的种类可以测量更加丰富的中微子振荡模式，进一步研究中微子振荡的特性并提高振荡参数的测量精度。而中微子工厂也被称为“终极”实验方案。然而，面临的技术挑战也是巨大的。比如，要对寿命极短的缪子进行加速并在缪子衰变之前就使它达到足够的能量非常困难。而探测器也必须具备鉴别正反粒子以及鉴别电子、缪子甚至陶子的能力，因此带磁场和具有单元结构的大型探测器是“中微子工厂”的必备条件。

中国的反应堆中微子实验已经走在了世界的前列，而加速器中微子实验也在酝酿当中。2013 年前后，中国提出了基于加速器驱动次临界洁净核能系统 (ADS) 的缪子衰变中等基线中微子束，英文为 Muon-decay medium-baseline neutrino beam facility，简称 MOMENT。MOMENT 利用 ADS 将要建立的功率高达 15 兆瓦的质子加速器产生 300MeV 或更低

能量的中微子，主要物理目标是探测 CP 破坏。目前，MOMENT 的束流设计和物理方案设计正在进行当中（如图 9 所示）。

结束语

利用高能粒子加速器提供中微子束流是中微子实验研究的重要手段之一。加速器中微子为粒子物理标准模型的建立和完善做出了重要贡献，更为研究中微子的性质和中微子振荡提供了强大的支持。从国际中微子研究进展和规划来看，加速器中微子的实验研究还将在未来的数十年继续发展，力争解决中微子质量顺序和轻子 CP 破坏等重要的物理问题。而中国也希望抓住历史机遇，发展自己的加速器中微子实验，在中微子的领域全面走在世界最前沿。

