

散裂中子源上的中微子研究

黄明阳^{1, 2}

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 东莞中子科学中心 523803)

一、中微子与散裂中子源

20 世纪以来, 在全世界物理学家孜孜不倦地研究下, 中微子物理和实验研究不断取得进步, 共有 4 次重大研究进展斩获诺贝尔物理学奖。1930 年, 奥地利物理学家泡利 (W. Pauli) 为解释贝塔衰变中能量似乎不守恒, 提出了中微子的概念, 开创了中微子物理学。1956 年, 美国物理学家莱因斯 (F. Reines) 和柯温 (C. Cowan) 在反应堆中第一次探测到电子中微子, 莱因斯因此获得 1995 年诺贝尔物理学奖。1962 年, 美国物理学家莱德曼 (L. Lederman) 和施瓦茨 (M. Schwartz) 等人在布鲁克海文实验室利用加速器第一次探测到缪中微子, 这是人类第一次利用加速器中微子束, 莱德曼和施瓦茨因此获得 1988 年诺贝尔物理学奖。1987 年, 日本神冈探测器和美国 IMB 探测器第一次在地球上探测到超新星中微子, 开创了中微子天体物理学, 神冈实验室负责人小柴昌俊 (M. Koshiba) 因此获得 2002 年诺贝尔物理学奖。1989 年, 欧洲核子研究中心证实存在且只存在三种中微子。1998 年, 日本超级神冈探测器利用大气中微子发现中微子振荡现象, 证实中微子具有微小质量, 超级神冈实验室负责人梶田隆章 (K. Takaaki) 因此获得 2015 年诺贝尔物理学奖。2000 年, 美国费米实验室的 DOUNT 实验第一次探测到陶中微子。现代中微子物理学研究表明: 中微子可分为三种不同味; 它们具有微小质量, 几乎不受引力影响; 不带电荷, 不受电磁相互作用的影响; 只参与弱相互作用。与粒子物理标准模型所描述的不同, 中微子具有微小质量, 这是人们目前找到的粒子物理标准模型之外新物理的重要证据, 为粒子物理研究注入了新的活力, 进一步激发人们寻找标准模型之外的新物理, 建立更加完善的粒子物理统一模型。

当一个中等能量的质子打到重核后会导致重核不稳定而分裂出大量中子, 这样重核会裂开并向各个方向发散相同数量的中子, 大大提高了中子的产生效率, 按照这种原理工作的装置称为散裂中子源, 图 1 描述了散裂中子源的工作机制。自 20 世纪 80 年代以来, 散裂中子源成为国际上一个重要发展方向。与电子、X 射线、激光相比, 中子作为“探针”具有高穿透性, 对氢、碳、氮等敏感, 带磁矩、自旋等优点。与反应堆产生的中子相比, 散裂源中子束具有脉冲性、高分辨、低本底和能量范围大等优点, 是生命科学、材料科学和核物理等诸多学科研究的平台。它与同步辐射装置互相补充, 并为质子治癌、洁净能源等应用提供技术支持。在国际上, 美国、欧洲、日本等国都在竞相发展高通量的新一代散裂中子源, 我国科学家也正在建造中国散裂中子源。

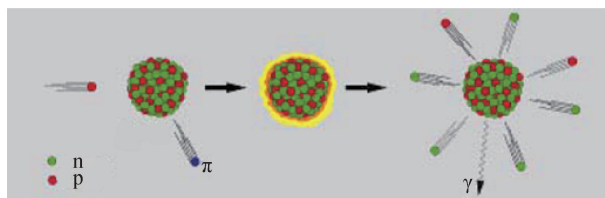


图 1 散裂中子机制

散裂中子源在中微子领域的应用始于 20 世纪后期。20 世纪 70 年代初, 美国洛斯·阿拉莫夫国家实验室的 LAMPF 强流质子加速器, 是世界上第一台散裂中子源。20 世纪 80 至 90 年代, 美国科学家建立大型中微子探测器 LSND, 用于探测散裂中子源 LAMPF 产生的加速器中微子。1985 年, 英国卢瑟福国家实验室建立 ISIS 环形加速器, 这是迄今为止世界上运行时间最长的散裂中子源。随后, 英国 KARMEN 实验组建立大型中微子探测器, 用于探测散裂中子源 ISIS 产生的加速器中微子。这两个短基线加速器中微子实验

在中微子振荡研究和中微子散射截面测量方面做出很多重要的贡献。

进入 21 世纪, 伴随美国散裂中子源 (SNS)、日本散裂中子源 (J-PARC) 的建成和中国散裂中子源 (CSNS)、欧洲散裂中子源 (ESS) 的开建, 散裂中子源日益成为加速器中微子研究的重要平台。2010 年, 基于日本散裂中子源的长基线加速器中微子实验 T2K 建成并开始运行, 迄今已经取得很多重要的研究成果。同时, 基于美国散裂中子源、中国散裂中子源、欧洲散裂中子源的中微子实验目前也处于设计过程中, 将来有望为中微子物理研究提供更多的实验结果。

二、散裂中子源上短基线加速器中微子研究

当散裂中子源的中能质子打到散裂靶后, 重核不稳定会产生大量中子。在这过程中, 同时会产生大量正反 π 介子。由于多种原因, 大部分的反 π 介子会被散裂靶吸收, 而正 π 介子则会衰变为正缪子和缪中微子。随后, 正缪子会继续衰变为正电子、电子中微子和反缪中微子。因而, 在散裂中子源质子打靶过程中会产生三种中微子, 分别为电子中微子、正缪中微子、反缪中微子。图 2 描述了散裂中子源中微子产生机制。

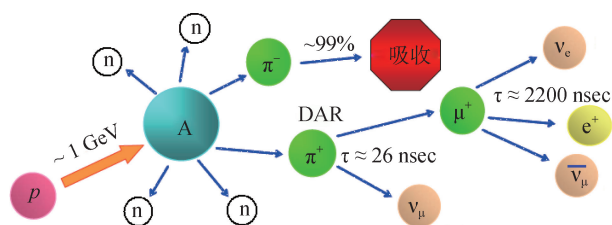


图 2 散裂中子源中微子产生机制

将探测器放置在距离加速器中微子源很近的地方, 通常间隔只有几十米到几百米, 用于研究中微子与物质的相互作用, 这种短距离的中微子实验称为短基线加速器中微子实验, 而中微子源到探测器之间的距离称为基线。21 世纪以前的散裂中子源中微子实验一般都是短基线加速器中微子实验, 主要包括美国 LSND 实验和英国 KARMEN 实验。

美国的 LAMPF 加速器建设完成于 20 世纪 70 年代, 其引出束流功率为 56 千瓦, 重复频率可调节为 120 赫兹, 引出质子束的平均能量为 798 兆电子伏, 产生的电子中微子平均能量大约为 37 兆电子伏。探测器 LSND 的介质为 167 吨矿物油, 放置于离中微子源 30 米处。这个加速器中微子实验主要用于研究中微子振荡和测量中微子散射截面。图 3 给出了 LSND 探测中微子信号的过程。1995 年, LSND 实验发现可能存在第四种类型中微子——惰性中微子, 这提供了研究更多种类中微子的重要线索。

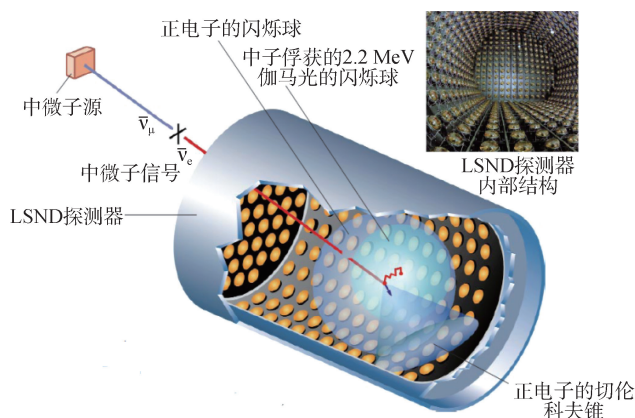


图 3 LSND 探测中微子信号过程

英国的 ISIS 加速器建设完成于 1985 年, 其引出束流功率为 160 千瓦, 重复频率为 50 赫兹, 引出质子束的平均能量为 800 兆电子伏, 产生的电子中微子平均能量大约为 37 兆电子伏。KARMEN 实验探测器介质为 56 吨液闪 (75% 石蜡油和 25% 三甲基苯), 放置于离中微子源 17.7 米处。该中微子实验也主要用于研究中微子振荡和测量中微子散射截面。图 4 给出了 KARMEN 实验探测器示意图。20 世纪 90 年代, KARMEN 实验在反贝塔衰变、中微子 - 电子散射、中微子 - 碳反应以及中微子与其他粒子散射的散射截面测量方面开展了很多重要工作, 也取得不少重要研究进展。LSND 发现惰性中微子线索之后, KARMEN 实验也进行了相应的中微子振荡实验研究, 其实验结果在一定能量范围内与 LSND 的实验结果是兼容的。

总体而言, 过去基于散裂中子源的短基线加速器中微子实验在中微子振荡研究和中微子散射截面测量方面取得很多重要进展。虽然未来的散裂中子源短

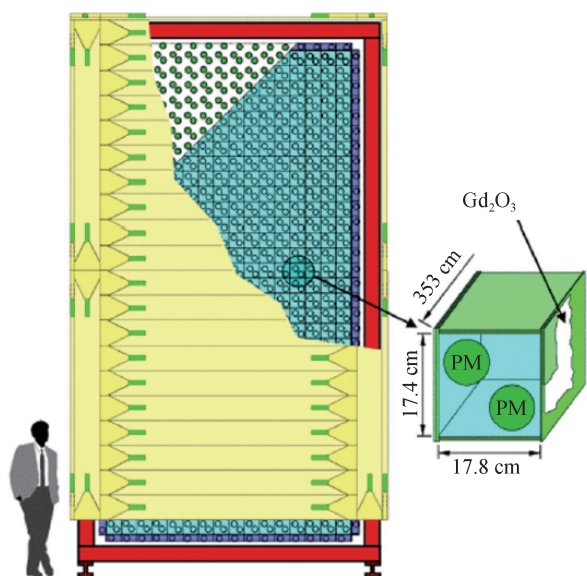


图4 KARMEN 探测器示意图

基线中微子实验与目前国际上其他类型中微子实验相比，在测量中微子混合参量研究方面或许没有显著优势，但是用于测量中微子散射截面还是比较合适的，可能得到很多有意义的结果。

三、散裂中子源上长基线加速器中微子研究

长基线中微子实验是指从中微子源到探测器之间的距离比较长，一般为几百千米甚至几千千米的中微子实验。进入 21 世纪之后，散裂中子源开始应用于长基线中微子实验，主要代表有日本的 T2K 实验。

日本散裂中子源建设完成于 2009 年，目前其主环的引出质子束流能量为 3 万兆电子伏，引出功率为 240 千瓦，重复频率为 0.3 赫兹，产生的电子中微子平均能量约为 700 兆电子伏。日本散裂中子源远点中微子探测器为超级神冈探测器，其介质为 5 万吨纯净水，距离日本散裂中子源为 295 千米。图 5 给出了 T2K 实验示意图，图 6 给出了超级神冈探测器示意图。基于日本散裂中子源和超级神冈探测器的新一代长基线加速器中微子实验 T2K 于 2010 年开始运行取数。2011 年 3 月日本发生大地震，其加速器被损坏，T2K 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，缪中微子很可能振荡到电子中微子，即 1-3 混合角不为零，置信度为 2.5 倍标准

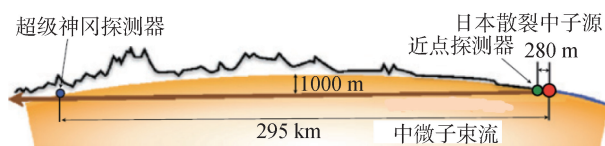


图5 日本 T2K 实验

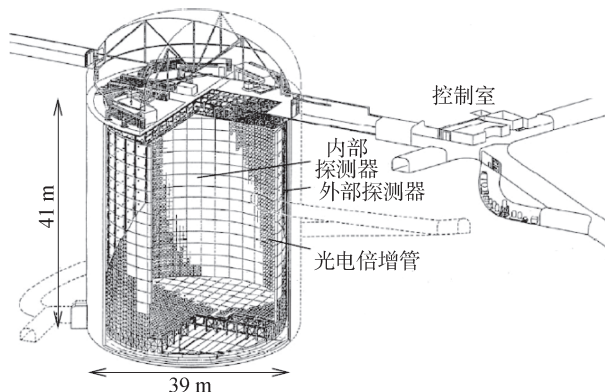


图6 超级神冈探测器

偏差。2014 年，T2K 将自己的缪中微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 - 电荷共轭破坏的相角在 270° 附近。

根据日本 T2K 实验的运行情况和取得的成果可知，基于散裂中子源的大型长基线加速器中微子实验应用前景十分广阔。相比于其他类型中微子实验，散裂中子源长基线加速器中微子实验在研究中微子振荡和测量中微子混合参量方面具有比较大的优势，有可能得到很多重要研究成果。

四、散裂中子源上超新星中微子探测

II 类超新星爆发过程中会产生大量的各种不同味的中微子和反中微子，最终会形成中子星或者黑洞。这种类型超新星爆发过程中产生的能量几乎就是内核的总引力能，其中产生的中微子带走大约其总能量的 99%，而超新星爆发消耗的能量大约只有 1%。当中微子在超新星内核产生以后，需要经历与超新星物质的各种相互作用，才能传播到超新星表面。在这一过程中，中微子主要经历三种效应：中微子集体效应、米赫耶夫 - 斯米尔诺夫 - 沃芬斯坦 (MSW) 效应、超新星震荡效应，造成不同味中微子相互转换。中微

子逃离超新星束缚之后, 需要经历漫长宇宙空间传播才能到达地球表面。由于宇宙空间近似于真空, 而且中微子不带电荷, 其路径不受遍布宇宙的磁场影响, 因而这段漫长宇宙空间传播几乎不会改变中微子的状态。但是, 在中微子从地球表面到达探测器这段传播过程中, 中微子与地球的物质之间会发生相互作用, 从而受到地球物质效应的影响。总体而言, 中微子从产生到逃离超新星, 再经过漫长宇宙空间距离的传播, 到达地球被探测到的过程中, 会受到各种中微子效应

的影响。在这一过程中, 虽然中微子的总粒子数保持不变, 但是不同味中微子会相互转换。

通过比较超新星中微子能谱和散裂中子源加速器中微子能谱, 可以发现这两者能谱范围很接近, 因而利用散裂中子源加速器中微子实验装置可以探测超新星中微子, 图 7 给出了中国散裂中子源加速器中微子能谱和超新星中微子能谱的比较。当前正在设计的散裂中子源加速器中微子实验一般会同时兼顾加速器中微子和超新星中微子探测。

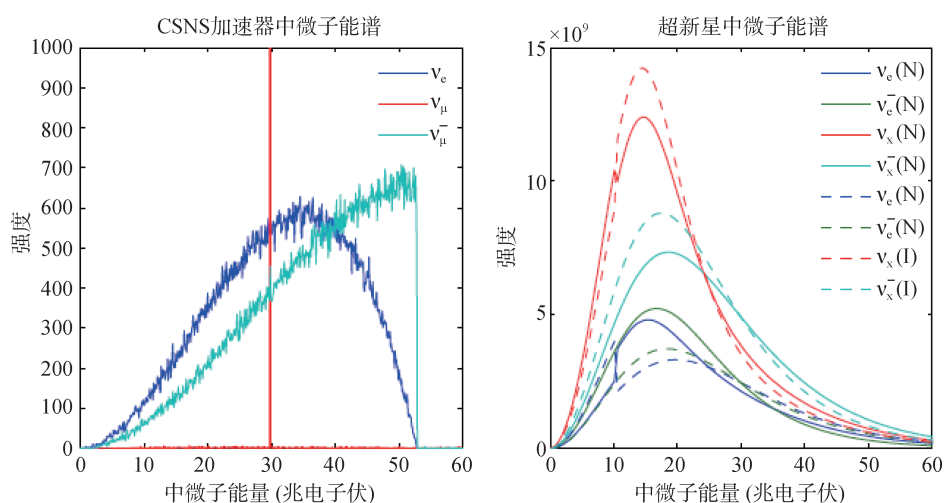


图 7 CSNS 加速器中微子能谱与超新星中微子能谱比较

根据散裂中子源探测器介质的材料, 可以利用不同的反应通道来探测超新星中微子。常见的反应通道有: 反贝塔衰变、中微子-电子散射、中微子-氘反应、中微子-碳反应、中微子-氧反应等。对于这些反应通道进行详细研究, 可以给出其探测超新星中微子的具体方法。同时, 在超新星中微子探测过程中会受到各种本底的影响, 包括散裂中子源加速器中微子本底、大气中微子本底、太阳中微子本底、反应堆中微子本底、超新星遗迹中微子本底等。但是, 由于超新星爆发产生中微子过程很短(大约 20 秒), 能谱范围比较窄, 通过计算可以得到上面提到的各种本底对超新星中微子探测影响很小。最后, 不同反应通道的探测效率不同, 这也会对超新星中微子探测产生影响。

总之, 根据超新星中微子研究理论, 考虑超新星中微子在产生、传播、探测过程中受到的各种效应的影响, 并结合探测器各方面情况, 可以计算出利用散

裂中子源加速器中微子探测器不同反应通道所能探测到的不同味超新星中微子事例数, 进而通过比较不同味中微子的事例数变化, 得到一些中微子混合参量和超新星爆发的信息。

五、中国散裂中子源的中微子研究

中国散裂中子源是我国正在建设的、用于中子散射研究的大型基础科学研究平台。其利用中能质子轰击钨靶产生大量的散射中子, 进而开展前沿学科和高新技术方面的研究。中国散裂中子源主要包括一个 80 兆电子伏的直线注入器、一个 1.6 千兆电子伏的快循环同步加速器、一个中子靶站和多个中子谱仪。其引出的质子束能量为 1.6 千兆电子伏, 引出功率为 100 千瓦(二期工程将提高到 500 千瓦), 重复频率为 25 赫兹。图 8 给出了中国散裂中子源示意图。中国散裂中子源建成后将成为发展中国家的第一台散裂中子

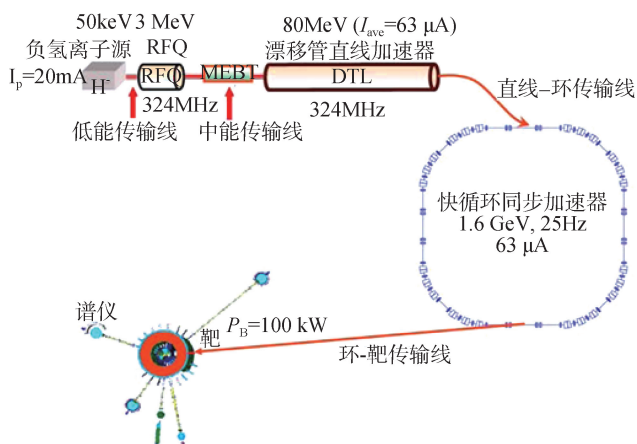


图8 中国散裂中子源示意图

源，并进入世界四大散裂中子源之列。它目前正处于建设阶段，将于2018年3月建设完成并接受国家验收。

中国散裂中子源高通量质子打靶产生中子过程中，会附带产生大量加速器中微子，其不同味中微子能量大约在30至60兆电子伏范围。目前已经有一部分物理学工作者提出在中国散裂中子源附近建立中微子探测器，并初步设计探测器的结构和探测介质，用于探测中国散裂中子源产生的加速器中微子。根据探测器介质的材料，选择用于探测不同味中微子的反应通道。利用蒙特卡罗模拟和数值计算方法，可以初步估算探测器放置在不同位置时不同反应通道所能探测到的各种不同味中微子的事例数。通过对数据进行整理、分析和比较，可以得到：虽然中国散裂中子源短基线加速器中微子实验要在目前国际上其他类型中微子实验的基础上更加精确地测量中微子混合参量有点困难，但是该实验用来测量中微子散射截面较为合适，可以得到很多有意义的研究成果。

由于中国散裂中子源加速器中微子和超新星中微子能谱范围很接近，因而可以利用其加速器中微子实验装置探测超新星中微子。根据探测器介质的材料，选择用于探测不同味超新星中微子的反应通道。对这些反应通道进行详细研究，可以给出其探测超新星中微子的具体方法。同时，由于超新星爆发产生中微子过程很短（大约20秒），能谱范围比较窄，通过计算可以得到中国散裂中子源超新星中微子探测的各种本底都很小。根据超新星中微子的研究理论，考虑超新星中微子在产生、传播、探测过程中受到各种效应

的影响，结合探测器实际情况，经过详细数值计算可以得到利用中国散裂中子源加速器中微子实验装置的不同反应通道所能探测到的不同味超新星中微子事例数。对数值计算的结果进行整理、分析和比较，可以发现通过比较不同味中微子的事例数变化，有可能得到一些中微子混合参量和超新星爆发的信息。

六、总结和展望

目前中微子物理已成为高能物理、天体物理与宇宙学研究的共同热点。利用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支持。

中国散裂中子源作为我国正在建设的重大基础科学装置，将建成大型的质子加速器，其质子打靶为我们提供大量的加速器中微子，这将为我国进行第一个加速器中微子实验创造难得机遇和提供良好平台。基于中国散裂中子源的加速器中微子实验可以同时兼顾加速器中微子和超新星中微子测量，不仅可以加深对中微子振荡和超新星天体物理的研究，得到中微子混合参量和超新星结构的信息，而且有利于我国加速器中微子研究追赶国际前沿，为基础物理学研究做出更大的贡献。

致谢

感谢中山大学丁淑娟对本文的大力支持。本文得到国家自然科学基金（批准号：11205185）的资助。

