

后中微子振荡发现的实验进展与展望

陈少敏[†]

(清华大学工程物理系 高能物理研究中心 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室 北京 100084)

2016-11-24收到

[†] email: chenshaomin@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20170101

Post neutrino-oscillation-discovery experiments: status and prospects

CHEN Shao-Min[†]

(Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Ministry of Education, High Energy Physics Center, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要 2015年诺贝尔物理学奖授予了发现中微子振荡也就是中微子有质量的实验。这个发现是至今为止, 粒子物理标准模型——这一得到广泛实验验证的理论中唯一指明存在新物理的明显证据。文章将介绍中微子振荡发现以后主要的中微子实验物理目标、采用的探测技术、实验状况及其未来展望。

关键词 中微子, 中微子振荡, 中微子质量, 中微子探测, 中微子实验

Abstract The Nobel Prize for Physics in 2015 was awarded for the discovery of neutrino oscillations, which vindicate the existence of massive neutrinos. This is the only clear evidence that points to new physics beyond the Standard Model, a theory which has been extensively tested in experiments. This article will review the physical objectives, detection techniques, current status, and prospects of neutrino experiments after the discovery of neutrino oscillations.

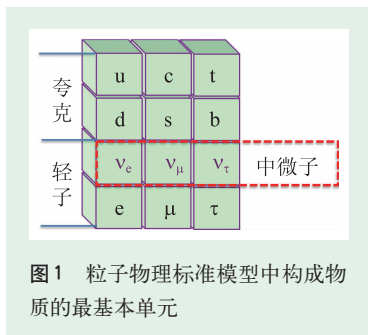
Keywords neutrino, neutrino oscillation, neutrino mass, neutrino detection, neutrino experiment

1 引言

中微子是1930年由奥地利物理学家泡利首先提出的, 目的是为了保证 β 衰变过程中的能—动量守恒和角动量守恒的小质量中性粒子^[1]。现如今, 它与电子, 夸克等其他基本粒子一道, 在粒子物理标准模型中被认为是构成物质结构的最基本单元^[2]。从图1可以看到, (正)中微子一共有3种类型(或称“有3代”, 或“有3种味道”)。长期以来, 关于它是否有质量一直都是中微子实验研究的热点。标准模型中的中微子是严格无质量的, 而建立在这一模型上的许多预言也得到了广泛的实验验证。但是, 包括日本超级神冈实验与

加拿大萨德伯里中微子观测站等中微子实验在经历了几十年的不懈努力, 尤其是中美合作的大亚湾反应堆中微子实验最后的“临门一脚”作用下, 中微子有虽小但非零的质量而导致的三代中微子振荡现象终于被实验确定下来, 并获得了2015年诺贝尔物理学奖以及2016年基础物理突破奖。

中微子振荡的发现对粒子物理而言具有划时代的意义。在李政道和杨振宁、朗道以及萨拉姆分别独立提出的二分量中微子理论中, 中微子只有左手分量^[3, 4]。如果没有右手中微子, 则其相互作用拉氏量质量项将不存在, 即中微子的质量为零。因此, 中微子在标准模型中是严格无质量的。实验上任何发现中微子有质量的证据将表明



存在超出标准模型的新物理。上个世纪通过放射性核素的 β 衰变以及带电介子及轻子衰变,已经发现中微子即使有质量也是非常

小,以至于远超所有实验能量分辨率所能达到的精度。因此,直接确定其质量将是一项非常具有挑战性的工作,甚至是一项不可能完成的任务。但是,如果微小的中微子一旦有虽小但不为零的质量,那么它的物质波在传播过程中会呈现一种可观的奇特量子干涉效应:中微子从一种类型转变成另一种类型。这种现象称为中微子振荡,是由意大利物理学家庞蒂科夫在1957年首先提出的^[5]。中微子的这种干涉特征就像光学应用领域通过干涉效应测量常规手段无法测量到的物体微小形变一样,可以用来测量极其微小的中微子质量(实际上是不同代中微子的质量平方差。)

至今为止,中微子振荡的实验发现依然是表明存在超出标准模型新物理的唯一证据。有质量的中微子暗示目前的标准模型是不完整的,需要改进或者替换。但是,新的模型到底是什么?这依然是个谜。这是因为理论对中微子的了解还不够,需要更多的实验测量结果来指明方向。为此,目前中微子实验主要集中在:(1)精确测定中微子混合矩阵并验证其么正性;(2)寻找并测量中微子的电荷—宇称破缺相位;(3)确定三代中微子的绝对质量及其排序;(4)确定中微子是狄拉克型的还是马约拉纳型的;(5)寻找非标准模型的相互作用、惰性中微子、中微子磁矩的实验证据等。

另一方面,中微子振荡的发现以及中微子混合矩阵的进一步测量,也为中微子实验最终打开了一扇通往应用的大门:做为独特的内部探针来研究太阳、超新星以及我们赖以生存的地球等。目前这类实验主要集中在:(1)精确测量太阳中微子流强及能谱,并检验标准太阳模型;(2)寻找核塌缩超新星中微子,研究超新星演化及爆发机

制;(3)探测来自包括地幔与地壳的地球中微子,研究放射热占地球热平衡的比重和探索地球板块运动能量来源等;(4)探测高能宇宙中微子,寻找高能宇宙线的起源等。

2 中微子探测

2.1 中微子源与中微子探测原理

在宇宙中,中微子无所不在,空间密度达 $300\text{个}/\text{cm}^3$,而且它们中的大多数与宇宙同龄。各种中微子源如果按能量从低到高排列,分别是大爆炸产生宇宙背景中微子,地球中的铀、钍、钾放射性元素 β 衰变产生的地球中微子,人造放射性同位素产生的中微子,太阳内部氢核聚变产生的中微子,人造核反应堆裂变产生的中微子,核塌缩超新星中微子,宇宙线与地球大气层相互作用直接产生或通过带电介子衰变产生的大气中微子,通过人造质子加速器轰击靶产生的加速器中微子,以及来自宇宙的高能中微子等。

中微子与物质的相互作用是电弱相互作用,属于粒子物理标准模型范畴。可以通过交换带电弱作用媒介子W的带电流过程,也可通过交换中性弱作用媒介子 Z^0 的中性流过程。在已知的所有中微子反应中,截面大约在 10^{-40}cm^2 左右。与之相比较,相同能量的伽马射线与物质的相互作用截面为 10^{-23}cm^2 左右,可见中微子与物质的相互作用概率极其低。因此,为了探测中微子需要足够大的靶质量,通过靶物质的摩尔质量与阿伏伽德罗常数换算成足够的靶原子数,并设法提高入射中微子流强与增加实验时间来获得更大的数据统计量。

目前,中微子探测实验主要有几类:(1)中微子与核外电子发生弹性散射打出可以观测的电子。这类过程的主要特征是,当中微子能量与出射电子的动能比电子质量高得多时,出射的高能电子大都是朝前散射,并携带了中微子的方向信息;(2)正反中微子与核发生散射,包括与核子的类弹性散射与核深度非弹性散射,打出带电轻子

(根据能量的不同可以是电子、 μ -子或 τ -子),反冲核子或强子末态。这类反应在能量传输远小于核子质量时,出射的带电轻子几乎是各向同性的,没有携带原初入射中微子的方向信息。只是当能量传输远大于核子质量时,出射的末态粒子才具有明显的前向性;(3)中微子与原子的关联散射($\nu+A\rightarrow\nu+A^*$),这类散射在十几 MeV 能段比中微子与核外电子的弹性散射截面要大出 5 个量级。但是,它所引起的核反冲非常小,只有通过极其灵敏的辐射热计实验才有可能探测到。目前,该类散射尚未在实验上观测到;(4)中微子通过与原子俘获反应释放出电子。这类反应到目前为止,主要研究 MeV 能段以下的太阳中微子。值得一提的是,上述第二种过程存在中微子反应的能量阈值问题,主要是受到出射带电轻子质量与始末态反冲核质量差等因素的影响。例如,在大亚湾反应堆中微子实验中,末态带电轻子为正电子,反应前与反应后的核子分别为质子与中子。因此,可以计算得到反电子中微子的能量阈值为 1.8 MeV,因此,该实验无法研究能量低于该阈值的中微子振荡现象。

2.2 切连科夫探测器技术

由于中微子探测器需要大的靶体积,因此,实验上最容易得到的靶物质就是水。到目前为止,用于探测中微子的大体积水质切连科夫探测器包括过去日本神冈实验(有效靶体积约为 2 千吨的水)与美国 IMB 实验(有效靶体积约为 5 千吨的水),以及现在的超级神冈实验(有效靶体积约为 2 万吨的水,见图 2)与正在拟议建造的 Hyper-K 实验(有效靶体积约为 50 万吨的水)。这类探测器由于维护简单,因而比较容易实现大体积的目标。历史上,首个超新星爆发中微子实验 SN1987a 就是由神冈实验与 IMB 实验发现的,而大气中微子振荡的发现则是由超级神冈实验完成的。

这种探测器的原理在于通过探测中微子与物质发生反应所产生的带电粒子在水中的速度超过光速时产生的如图 3 所示切连科夫光,来确定带

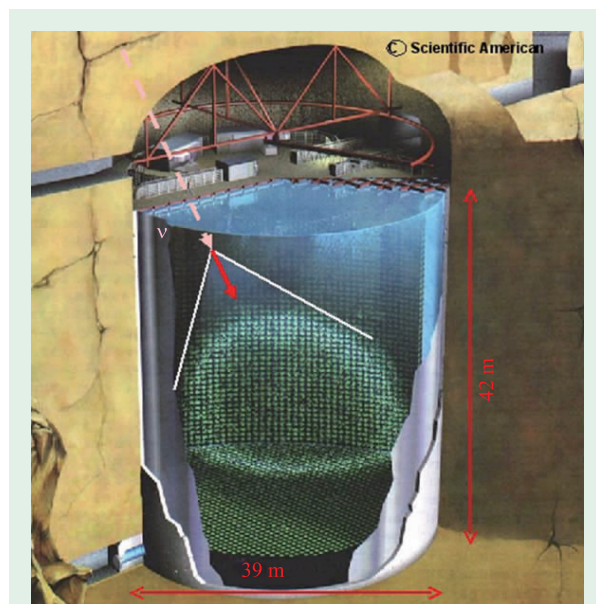


图 2 超级神冈实验探测器示意图。图中还给出了中微子与水反应得到的带电粒子在水中产生切连科夫光环的情形

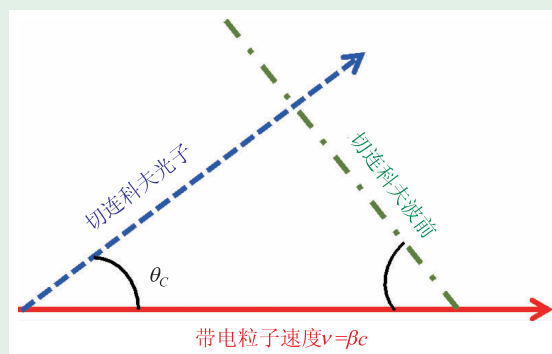


图 3 带电粒子在介质中飞行所产生的切连科夫光示意图

电粒子的方向与能量。速度为 βc 的带电粒子在折射率为 n 的介质中运动时,切连科夫角满足 $\cos\theta_c=1/(n\beta)$ 。图 4 给出了 3 种类型的带电轻子在水中的切连科夫角随其动量的变化关系。对于水质切连科夫探测器,带电粒子每损失 1 MeV 的能量,大约可以发射出 170 个切连科夫光子。根据切连科夫角的限制,还可以计算出在具有不同折射率的介质下,带电粒子能够产生切连科夫光的能量阈值。因此,水质切连科夫探测器无法探测低于切连科夫能量阈值的带电粒子(见图 4 中 θ_c 为零时不同带电轻子的截止动量)。此时,100 MeV 以下的宇宙线 μ -子会形成所谓的“不可见”本底,影响到低能中微子的实验研究。

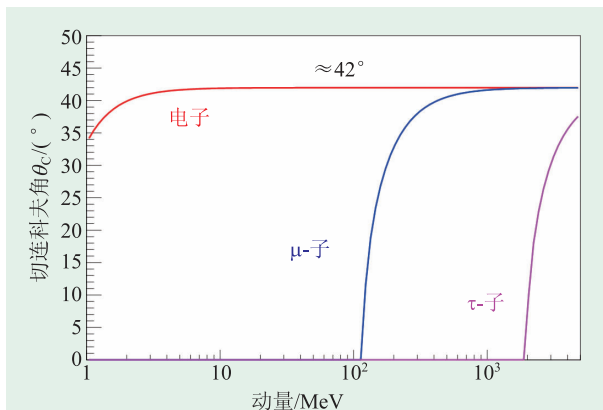


图4 带电粒子在水中的切连科夫角随动量的变化

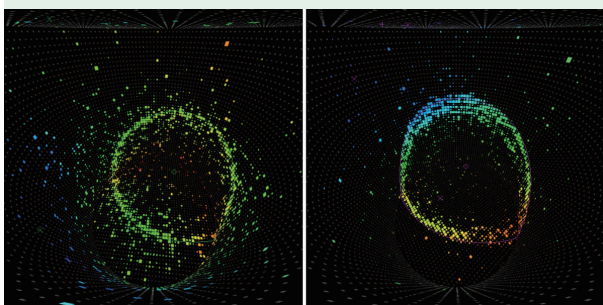


图5 电子(左)与 μ -子(右)在圆柱体探测器水体中发出的切连科夫光影像。由于电子质量较小,在水中会受到多重散射的影响,造成切连科夫光环的晃动,影像出现模糊(图片由超级神冈实验提供)

当带电粒子发出的切连科夫光被安装在探测器周围的光电倍增管探测到后,根据记录到的时间并扣除光子从中微子与物质发生相互作用的地点飞行到光电倍增管这一路程所用时间,实验上利用信号时间的一致性就可以确定其所产生的切连科夫光环。然后根据相对论带电粒子在水中的切连科夫角为 42° 的特点,重建出带电粒子的顶点及飞行方向。利用经过衰减等因素修正的电荷测量量,乘上经过实验刻度得到的能量标度因子,就可以确定粒子的动量。值得一提的是,由于电子的质量远小于 μ -子的质量,它在水中飞行时更容易受到多重散射的影响,因而电子的光环影像要比 μ -子的模糊(图5)。这一特点在水质切连科夫探测器中被用来做电子与 μ -子的粒子鉴别。这对发现大气中微子振荡起到了至关重要的作用。另外,由于伽马射线在水中的平均自由程只有几个厘米,很容易通过康普顿散射打出电子而

被探测到。因此,在水质切连科夫探测器中,电子与伽马射线是不可区分的。

由于大型水质切连科夫探测器对能量为几个MeV以下的带电粒子探测能力不足,此类探测器一般不具备利用中子来识别正反中微子的能力。如果实验能够探测到反电子中微子发生反贝塔衰变反应所产生的中子,就有可能将其与不产生中子的电子中微子反应区分开来。目前采用的技术是探测中微子反应关联的中子被水中的氢原子俘获并释放出2.2 MeV特征伽马射线的方法(图6)。但是,该方法由于伽马射线能量与探测器内部材质的放射性本底释放出的低能伽马或贝塔射线的能谱重合,探测效率与信噪比均不高。一种在水中加入少量金属钷化合物(例如,硫酸钷八氧水)的方法正在超级神冈实验进行试验。这种方法利用热中子在钷上的俘获截面达48.89 kb,寿命在30 μ s左右,释放出的光子串总能量在8 MeV左右的特点,可以有效探测反电子中微子与水反应产生的中子,探测效率高于80%,从而达到区分正反电子中微子反应的目的。这对在大型水质切连科夫探测器上探测超新星中微子将具有决定性的意义。不但有可能探测到弥漫在宇宙空间的超新星遗迹中微子,而且对可能发生在银河系中心的核塌缩超新星爆发中微子角度方向的定位精度也会得到显著提高。此外,由于超新星爆发中微子会比光学信号更早到达地球,快速的超新星爆发中微子探测,将可以通过超新星早期预警网络通知天文观测台与引力波实验站,联合对超新星爆发进行观测研究。因此,尽管水质切连科夫探测器过去已经在中微子实验中应用了多年,但是,从便于维护和容易获得大的靶体积上看,未来该种类型的水质切连科夫探测器依然还会被中微子实验研究所采纳。未来百万吨级的日本Hyper-K将采用基于纯水的水质切连科夫探测技术^[6]。

除了以纯净水作为靶材质以外,切连科夫探测技术还被应用到以重水为靶物质的实验。例如,加拿大萨德伯里中微子观测站实验。该实验对带电粒子的探测与纯水的探测器完全一样。但是,由于不同种类(味道)的中微子均可以与重水

中的氘核发生经由弱作用中性流反应，这一特点使得该实验还同时具有对由电子中微子转换为其他味道中微子进行探测的能力。该实验被认为是最终解决了困扰多年的太阳中微子“丢失”问题的决定性实验，它确凿无疑地验证了太阳中微子振荡的假设。由于重水价格十分昂贵，限制了基于重水的切连科夫探测器在中微子实验的发展。

为了测量几十 GeV 甚至到 TeV 或 PeV 能量的宇宙线中微子，在南极与地中海中分别建造了基于冰和基于海水的超大体积切连科夫探测器。与上述实验不同的是，这种极高能量的中微子与核相互作用，除了产生对应的带电轻子以外，还将产生大量的强子。这些带电强子发出密集切连科夫光，被悬挂在冰或海水中的光电倍增管阵列记录下来，从而重建出入射中微子的方向与能量。由于这类靶物质不如纯水的洁净度高，因此，大量的低能本底限制了其在对几百 MeV 以下中微子的实验研究。目前主要用作对高能大气中微子和宇宙中微子的研究。未来千万吨级以上地中海的 ORCA 实验与南极的 PINGU 实验都采用这类基于海水或冰的切连科夫探测技术^[7, 8]。

2.3 闪烁体探测器技术

在几个 MeV 量级以下的低能中微子实验中，主要采用的是基于有机液体闪烁体的探测技术。此时的液体闪烁体既用作靶物质又用作探测物质。例如，大亚湾反应堆中微子实验、日本的 KamLAND 实验与意大利的 Borexino 实验等。这些液体闪烁体主要是一些芳香族的化合物，当带电粒子或伽马射线入射到液体闪烁体中时，会引起包括原子和分子的电离与激发，在退激过程中发出荧光。由于发射的荧光波长可能比较短，会发生光被液体闪烁体自吸收现象。即便不被吸收，这些短波长的荧光还会因与光电倍增管的灵敏波段不匹配而不被探测到。因此，一般都会在液体闪烁体中加入少量的波长位移剂，其作用是吸收短波长的光子再发射出较长波长的光子。

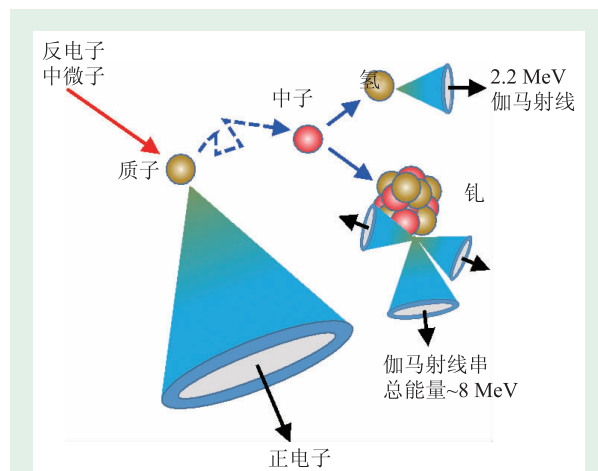


图6 水质切连科夫探测器中的反电子中微子发生反贝塔衰变反应示意图。过程产生的中子在水中慢化后将会被原子俘获放出特征伽马射线(例如图中被氢原子与钆原子俘获的情形)。注意，伽马射线在水中会因发生康普顿散射打出电子而被探测到

液体闪烁体探测器与水质切连科夫探测器有很大的不同。相比而言，对于携带相同能量的同种类型带电粒子，在液体闪烁体探测器中产生的光子数至少要比纯水的情况高十几倍，使得探测器具有很好的能量分辨率。同时，由于没有切连科夫光阈值的限制，闪烁体探测器对低能宇宙线 μ -子本底具有很好的探测能力，可以有效地排除因其衰变产生的米歇尔电子，或与原子核发生散裂作用而产生的放射性同位素本底。由于发出的闪烁光是各向同性的，这种类型的探测器无法确定出带电粒子乃至入射中微子的方向，但是，根据带电粒子在不同位置发出的闪烁光到达光电倍增管的时间及电荷分布，实验上可以据此精确地确定中微子反应的位置(图7)。因此，通常用于已知中微子来源方向的实验。例如，大亚湾反应堆中微子实验，日本的 KamLAND 实验与意大利的 Borexino 实验等。虽然从维护和光在液体闪烁体的衰减长度(典型为二十几米)上看，这种探测技术不大可能是未来超大型液体闪烁体探测器的发展方向，但是，对于低能中微子研究而言，千吨或万吨级靶质量的液体闪烁体探测器依然具有其不可替代的作用。未来的万吨级的广东江中微子实验站(JUNO)与千吨级的锦屏中微子实验都将

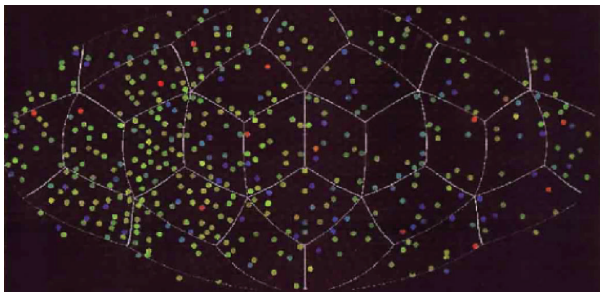


图7 反应堆反电子中微子反应产生的正电子在球形液体闪烁探测器中发出的闪烁光影像(多边形展开的球面图)。图中的亮点为记录到闪烁光的光电倍增管,不同颜色表明光到达的时间不同。从亮点密度分布可以判断反应发生在影像图的左侧(图片由KamLAND实验提供)

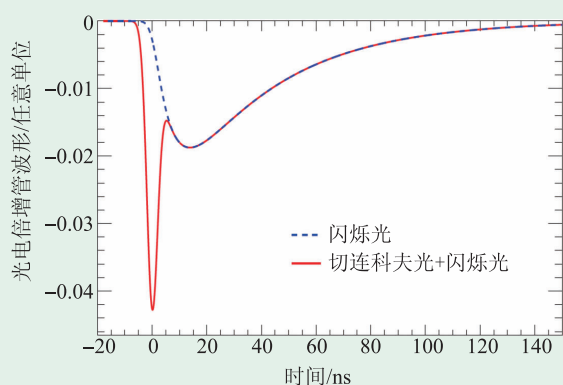


图8 光电倍增管记录下带电粒子在慢液体闪烁体中所发出光的信号示意图

采用液体闪烁体探测技术^[9, 10]。

值得一提的是,在反应堆中微子实验中,为了更有效地探测反应堆反电子中微子反应信号,一般还要在液体闪烁体中加入少量的钆化合物(例如,大亚湾实验中采用的氯化钆化合物)。它的作用与在水质切连科夫探测器的应用一样,都是为了提高对反贝塔衰变产生的中子信号的探测效率,以达到有效去除探测器内部放射性元素产生的低能伽马和贝塔射线本底的目的。

近年来,为了同时提供良好的能量分辨率与方向信息,发展起来了基于水与液体闪烁体之间的水基液体闪烁体以及慢液体闪烁体技术。在该技术中,液体闪烁体采用了线性烷基苯的配方,闪烁光发光的持续时间拉长至100 ns左右(与之相比较,切连科夫光发光持续时间在几个ns量级),并加入微量的波长位移剂以提高闪烁光的光产额。如图8所示,通过对光电倍增管的波形进

行分析,实验上就可以识别出代表切连科夫光的快分量和代表闪烁光的慢分量。

2.4 叠层式探测技术

叠层式探测技术与对撞机实验探测器的量能器设计所采用取样型探测技术一样。其结构大都为靶物质层(例如,铁)与探测物质层(例如,固体闪烁体)的交互叠加。显然这种探测器与水质切连科夫探测器和液体闪烁体探测器最大的不同,在于它并不是全灵敏型或均匀介质探测器。因此,从能量测量的角度上看,靶物质这些“死”物质的存在,会使能量分辨率受到较大的影响。但是,基于该类技术的探测器具有便于施加高场强磁场的特点,可用于分辨粒子携带的电荷并根据其在磁场中弯曲的曲率半径来确定粒子的动量。这是前面两种均匀介质探测技术目前所不具备的,可以从另一方面弥补能量分辨率较差的不足。该技术比较适合研究能量在几个GeV量级以上的加速器 μ -中微子或大气中微子,而均匀介质探测器为了测量这些高能中微子则需要较厚的吸收体,这对于固定靶体积的探测器,意味着探测效率的损失。由于施加磁场会耗费大量的电力,因此,只能用来建设万吨级左右体积的探测器。目前除了正在运行的美国MINOS+加速器中微子实验以外,未来拟议在印度建造的万吨级INO大气中微子实验也将采用该叠层式探测技术^[11]。为了提高对多个带电粒子末态的鉴别,并减小“死物质”对能量分辨率的影响,也有实验采用将液体闪烁体探测器单元化的叠层式探测器设计,并且闪烁体单元容器采用了聚氯乙烯材料等低原子序数的材料。例如,正在运行的美国Nova实验等。

2.5 液氙时间投影室技术

切连科夫探测器与液体闪烁体探测器在位置分辨方面,受制于粒子与光在介质中的散射行为,以及光电倍增管的量子效率、覆盖角及几何尺寸的影响,分辨率均在十几厘米以上。而且,

粒子能量越低，位置分辨率越差。这不利于在中微子实验中对中微子反应信号及类型的识别，尤其是涉及对短寿命介子级联衰变的识别。正在拟议建造的美国地下中微子实验(DUNE)将采用液氩时间投影室技术^[12]。带电粒子在液氩中运动会引起氩原子的电离，产生的闪烁光将被光电倍增管探测。而沿带电粒子飞行轨迹产生的电离电子在电场作用下还会漂移到时间投影室壁上。此时，垂直于电场方向平面的原初位置信息像投影仪那样投影到由三层相互呈一定夹角的阳极丝组成的时间投影室壁上。通过三层阳极丝记录的位置信息以及达到的时间信息，就可以对带电粒子的径迹进行三维成像。因此，这种探测器可以像对撞机实验上的探测器一样，对中微子反应过程产生的末态粒子径迹进行精确的拓扑重建。精确的位置分辨能力及优越的拓扑特性，使得该类型的探测器除了具有对带电粒子精确探测的性能以外，还可以通过顶点位置的信息很好地识别伽马射线(图9)，这是水质切连科夫探测器与液体闪烁体探测器所不具备的能力。目前，在万吨级探测器上进行该技术应用的研究正在开展当中，两种不同设计的原型机正在设于日内瓦的欧洲核子研究中心(CERN)进行束流测试研究。

2.6 测热辐射计技术

这类探测技术与前面介绍的探测技术相比，最大的优点是对 keV 量级能量测量具有很好的分辨率，而且能量阈值比前面介绍的中微子探测器最低阈值 0.15 MeV 还要低。例如，基于高纯锗的探测器就是采用低温测热辐射计的技术。类似的探测器还包括采用氧化碲的固体探测器。但是，此类探测器由于探测物质非常昂贵，目前依然是百公斤量级的小体积探测器，在统计上无法开展以中微子反应为对象的研究，主要用来探测无中微子双贝塔衰变的贝塔电子和低质量暗物质与核碰撞所产生的反冲热。由于无中微子双贝塔衰变可以确定中微子的到底是狄拉克型还是马约拉纳型，这对理论上确定超出标准模型新物理的走向起到至关重要的作用，因此，目前吨量级的未

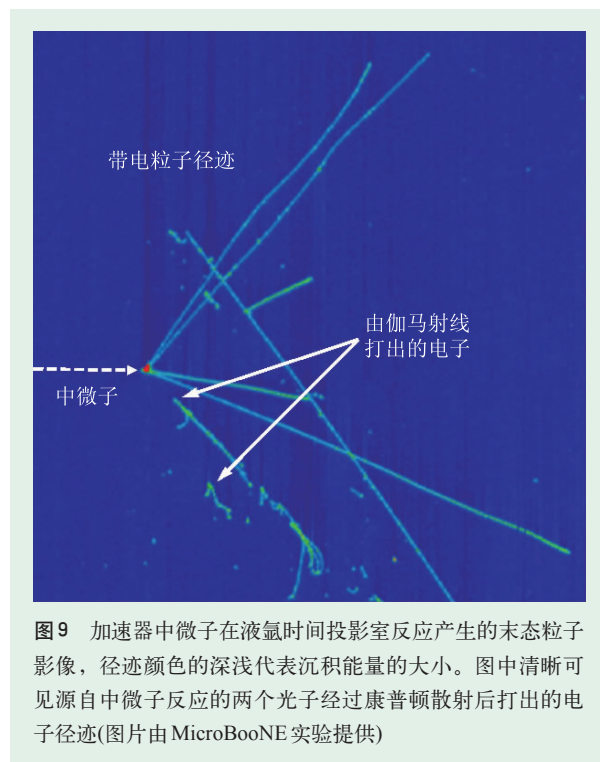


图9 加速器中微子在液氩时间投影室反应产生的末态粒子影像，径迹颜色的深浅代表沉积能量的大小。图中清晰可见源自中微子反应的两个光子经过康普顿散射后打出的电子径迹(图片由MicroBooNE实验提供)

来无中微子双贝塔衰变实验是核物理领域的研讨热点。

3 中微子振荡实验的现状

根据中微子源的不同，实验上可以分为非加速器中微子与加速器中微子两大类。两者在物理上各有侧重，但在许多方面有着互补和交叉印证的特点。事实上，即使是研究中微子振荡的实验，还可以把中微子实验按离中微子距离的基线长短分为长基线(百公里以上)和短基线(十几米到几百米，有时也可以到一两公里左右)实验。同时，为了减小宇宙线本底，中微子实验通常都在地下实验室来进行；并根据需要还会在中微子探测器外部加上反符合探测器，用以探测进入中微子探测器的宇宙线本底并藉此定义中微子信号事例。

3.1 大气及宇宙中微子实验

已建成并正在运行的大气中微子实验主要包括日本超级神冈实验(5万吨纯净水)、欧洲的ANTARES实验(近千万吨地中海海水)和美国的IceCube实验(1 km³体积的南极冰)。它们均采用

切连科夫探测技术。由于靶体积的大小不同, 实验覆盖的中微子能量从几百 MeV 到 TeV, 甚至到 PeV 量级。这些实验既可以对 GeV 量级的大气中微子振荡进行研究, 也可以用来探索来自宇宙的中微子, 包括十几 MeV 的超新星爆发中微子和可用于揭示宇宙线起源和本质的甚高能宇宙中微子。

3.2 长基线加速器中微子实验

目前正在运行的长基线加速器中微子实验有日本的 T2K 实验(295 km)、美国的 MINOS 实验(735 km)和 Nova 实验(810 km)。它们的中微子束流能量都在 GeV 量级, 射向探测器的中微子束流在时间上呈脉冲状, 并有正反 μ -子中微子两种运行模式。值得一提的是, 刻画加速器中微子流强的大小并不是通常用的中微子通量指标, 而是采用累积质子达到靶的数目(protons on target, P.O.T.), 这个数目目前一般在 10^{20} 以上。这类实验的共同特征是都包含一个用来测量加速器中微子能谱与通量的近点探测器(几百米长的基线), 以及一个用来研究加速器中微子振荡现象的远点探测器。近点与远点探测器通过 GPS 来对时, 确定加速器中微子束流产生的起始时间。在扣除中微子以光速达到近点和远点的飞行时间后, 就可以严格定义在这两个探测器的中微子信号产生的时间段。因此, 可以形象地说, 长基线加速器中微子实验是把对大气中微子振荡的研究搬到地面上来, 解决了大气中微子研究中在中微子种类、能谱与流强方面的不确定性。目前这 3 个长基线中微子实验主要用来: (1)精确测量中微子振荡参数(尤其是混合角的界限); (2)利用地球的物质效应寻找可能存在于中微子的电荷—宇称破缺; (3)寻找标准模型以外的物理, 包括惰性中微子等。

3.3 短基线加速器中微子实验

在加速器中微子实验中, 对中微子振荡测量的系统误差, 在很大程度上来自从近端测量往远端测量延拓时产生的误差。高能量的加速器中微子与靶相互作用涉及复杂的核效应, 理论上存在

自由核子截面、费米动量、多核子相互作用、泡利阻塞效应、末态相互作用等多种影响因素, 对发生在这些中微子的类弹性散射和强子产生过程缺乏精确的计算。为了在短时间内完成对不同靶材质、接收度、中微子能谱、种类(或味道)进行反应截面测量, 需要有针对性地进行短基线加速器中微子实验。除了上述 3 个长基线加速器中微子实验的近点探测器可以开展中微子截面测量的研究以外, 还有专门的实验, 例如, MINERvA 与 MicroBooNE 实验。它们的基线长度都是几百米, 高能加速中微子在如此短的距离几乎没有发生振荡。

3.4 反应堆中微子实验

目前还在运行的反应堆中微子实验包括大亚湾中微子实验、韩国的 RENO 实验和法国的 Double Chooz 实验。它们最主要目的是寻找第三种中微子的振荡模式, 并精确测量对应的中微子混合角。与长基线中微子实验一样, 这三个实验都包含离反应堆堆心几百米以内的近点探测器和 2 km 左右的远点探测器。其中, 为了使得实验对中微子混合角的精度达到 1% 以下的量级, 大亚湾中微子实验的近点与远点探测器还采用在技术上完全相同的反电子中微子探测器模块。2012 年 3 月, 大亚湾实验首次观测到三代中微子框架中预言的第三种中微子振荡模式, 给出了对应的非零混合角, 为实验寻找中微子的电荷—宇称破缺打开了一扇大门。由于核反应堆提供了大量能量不超过 8 MeV 的反电子中微子(每 GW 热功率的反应堆每秒可以产生 2×10^{20} 个反电子中微子), 这些实验还利用采集到大量的中微子事例来研究反应堆核衰变的贝塔能谱, 验证相关的核裂变理论模型。

3.5 短基线反应堆中微子实验

高精度的反应堆中微子实验研究发现了两个反常的实验结果: 一方面, 实验发现反应堆反电子中微子的流强比理论预期系统偏低大约 5%; 另一方面, 实验还发现反应堆反电子中微子能谱

在 5 MeV 出现与反应堆模型预言不一致的突起。这两个反常虽然在采用远、近点相对比方法的反应堆中微子振荡实验中被抵消掉。但是，这两个反常可能暗示存在新的振荡与核衰变模型的不完备，因而许多国家在离反应堆几十米甚至十几米处开展了短基线反应堆中微子实验。这些实验包括俄罗斯的 DANSS 实验(基线长度约 10 m)，韩国的 NEOS 实验(基线长度约 24 m)，美国的 PROSPECT 实验(基线长度约 10 m)，等等。实验采用的主要探测技术为液体闪烁体探测技术。

3.6 无中微子双贝塔实验

中微子的振荡现象进而证明其有质量，使得寻找无中微子双贝塔衰变重新回到核物理与粒子物理研究的热点。与研究中微子振荡的实验不同，这类实验的目的主要是寻找在放射性同位素贝塔衰变中可能出现的无中微子双贝塔衰变过程。任何观测到的无中微子双贝塔衰变结果都将证明中微子是马约拉纳中微子，不像带电的轻子都是狄拉克型轻子那样。而且，该过程的存在仅仅当中微子有质量时才会发生。目前正在运行并发表结果的实验包括采用锆-76 同位素的欧洲 GERDA 实验(约 34 kg)，采用氙-136 同位素的美国 EXO-200 实验(约 100 kg)和日本 KamLAND-ZEN 实验(约 500 kg)。这些实验均未看到无中微子双贝塔衰变过程，给出的衰变半衰期下限在 10^{25} 年量级，马约拉纳平均质量的上限达 60 meV。

4 未来中微子实验展望

未来中微子实验(包括正在建设和拟议建设)在粒子物理领域主要集中在三大方向：(1)精确测量中微子的电荷-宇称破缺相位；(2)确定三代中微子的质量排序；(3)寻找无中微子双贝塔衰变。在 2016 年的中微子大会与国际高能物理大会上公布的目前实验结果上看，中微子的电荷-宇称守恒至少在 2 倍标准偏差以上被排除；中微子质量在 1 倍标准偏差范围内倾向于正常排序；无中微子双贝塔衰变尚未在实验上观测到。由于它们对

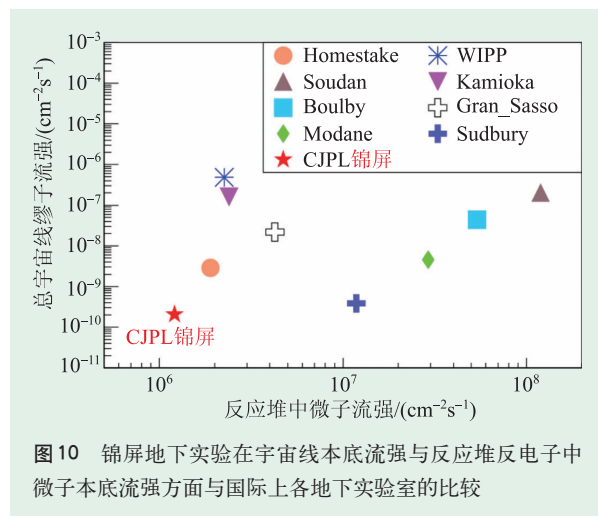


图 10 锦屏地下实验在宇宙线本底流强与反应堆反电子中微子本底流强方面与国际上各地下实验室的比较

粒子物理与核物理的发展至关重要，因此，未来中微子实验主要集中在三大方向。

4.1 地下实验室

中微子实验最大的本底来自宇宙线本身或者由其诱导的长寿命放射性同位素产生的本底。国际上针对上述物理目标拟议开展中微子实验的几大地下实验室包括：日本神冈地下实验室(约 1000 m 埋深)、美国桑德福地下实验室(约 1500 m 埋深)、加拿大萨德伯里中微子观测站(2100 m 埋深)、意大利格兰萨索地下实验(约 1400 m 埋深)、广东江门中微子观测站(约 700 m 埋深)、四川锦屏地下实验室(约 2400 m 埋深)。其中，四川锦屏地下实验室由于在宇宙线本底和反应堆本底方面在世界上都是最低的(图 10)，因此，在国际上被认为是未来建造大体积探测器开展低能中微子实验与寻找无中微子双贝塔衰变的最佳场所。

4.2 未来中微子振荡实验

未来通过中微子振荡实验测定中微子的电荷-宇称破缺相位和中微子质量排序的实验包括：(1)研究反应堆反电子中微子振荡的中国江门中微子实验(JUNO)与韩国 RENO-50 实验；(2)研究加速器中微子振荡的日本 Hyper-K 实验和美国 DUNE 实验；(3)研究大气中微子振荡的印度 INO 实验，欧洲的 KM3NeT/ORCA 实验，以及美国

PINGU 实验。这些实验有望在下一个十年到二十年的时间内,完成上述物理目标。

4.3 未来非中微子振荡实验

针对中微子属性研究的非中微子振荡实验主要包括对中微子绝对质量测量和无中微子双贝塔衰变。德国 KATRIN 实验利用氢同位素氘的贝塔衰变,通过对贝塔能谱在运动学中的截止点研究来测量中微子的绝对质量。理论上,该衰变每发射 10^{11} 个贝塔电子,才会有一个最靠近能谱的截止点。预计在未来十年内,这种直接测量中微子绝对质量大小的下限可以达到 200 meV。但是,利用天文观测的宇宙微波背景实验,通过研究中微子能量密度分布,预计未来十年实验对三代中微子总质量和的测量下限可以达到 15—30 meV。

未来下一代寻找无中微子双贝塔实验从技术路线上划分主要包括:(1)基于吨量级固态锗-76 探测技术的实验,需要欧洲、中国和美国在高纯锗提纯方面的合作;(2)基于吨量级液态氙-136 探测技术的实验,主要是日本的 KamLAND-Zen 实验和美国 nEXO 实验;(3)基于吨量级二氧化碲晶体探测技术的欧洲 CUPID 实验等。这些吨量级的未来实验预计对马约拉纳平均质量大小测量的下限可以达到 20 meV,从而在灵敏度上能够覆盖中微子质量反常排序允许区,如果实验上对最轻的中微子质量约束在 50 meV 以下,则对未来中微子振荡实验的质量排序判定可以起到验证的作用。但是,如果中微子振荡实验证明中微子质量是正常排序的话,要看到无中微子双贝塔衰变的

迹象将非常困难。

5 结束语

中微子虽然其名字起源于 1930 年,是最古老的基本粒子之一,但也是目前最不了解的粒子。中微子振荡的发现进而证明其有质量是目前确认存在超出标准模型新物理的唯一证据。但是,新物理在何方?尽管理论上有许许多多的猜测,但这依然是一个没有答案的问题。揭示中微子的本质是目前和未来中微子实验的重点。其中,测量中微子的电荷—宇称破缺相位,确定中微子质量及排序,以及判定中微子到底属于狄拉克型的还是马约拉纳型的中微子,将是未来中微子实验的物理目标,这些目标的实现将对新物理的确定起到至关重要的作用。同时,这些中微子实验由于在大体积、低本底、高灵敏度等方向的技术突破,不但对中微子物理本身,而且对其在天体物理、地球科学等领域也能起到非常大的促进作用。进入 21 世纪,中国的中微子实验得到了飞跃式的发展。大亚湾中微子实验的杰出成就让中国进入了中微子研究的前沿。广东江门中微子实验站和中国锦屏极深地下实验为中国未来的中微子实验研究提供了极好的机遇。作为本文的结束语,对于有志于从事中微子研究的青年学者而言,借用诺贝尔物理学奖获得者史蒂芬·温伯格 2003 年在加拿大麦吉尔大学理学院毕业典礼上的一段讲话:“go for the messes—that’s where the action is(中文大意是:广阔天地,大有作为)”^[13]。

参考文献

- [1] Pauli W. Phys. Today, 1978, 31N9: 27
- [2] 马丁纽斯·韦尔特曼 著,丁亦兵 等译. 神奇的粒子世界. 北京: 科学出版社, 2012
- [3] Lee T D, Yang C N. Phys. Rev., 1957, 105(5): 1671
- [4] Salam A. IL Nuovo Cimento, 1957, 5(1): 299
- [5] Pontecorvo B. Sov. Phys. JETP, 1957, 6: 429
- [6] Abe K *et al.* arXiv: 1109.3262
- [7] Kouchner A. J. Phys. Conf. Ser., 2016, 718: 062030
- [8] Aartsen M G. arXiv: 1306.5846
- [9] An F *et al.* J. Phys. G, 2016, 43: 030401
- [10] Beacom J *et al.* arXiv: 1602.01733
- [11] Indumathi D. AIP Conf. Proc., 2015, 1666: 100003
- [12] Acciarri R *et al.* arXiv: 1601.05471
- [13] Weinberg S. Nature, 2003, 426: 389



大连齐维科技发展有限公司

CHI-VAC Research & Development Co., Ltd.

地址: 大连市高新园区龙头分园龙天路27号

电话: 0411-86286788

传真: 0411-86285677

E-mail: info@chi-vac.com

http://www.chi-vac.com

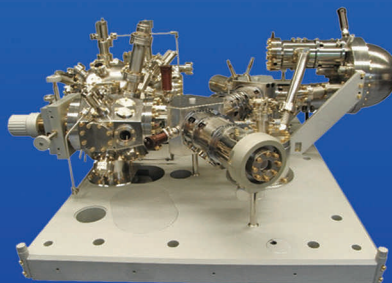
自主研发的超高真空驱动器和系统



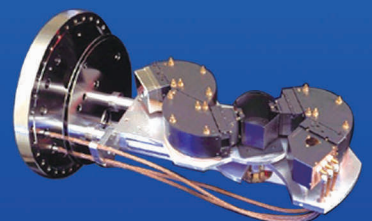
全权代理国际先端分析仪器



日本R-DEC公司的RHEED
和分析软件



德国Elmitec公司低能量/
光电子显微镜



美国LK Technologies公司高分辨
电子能量损失谱仪