

振荡中的中微子——中微子混合矩阵的提出与验证

刘金岩

(中国科学院自然科学史研究所 100190)

中微子是联系微观物质世界和宏观宇宙的桥梁,对人类理解物质基本组成及宇宙起源和演化至关重要。1956年,科温(C.Cowan)和莱因斯(F.Reines)等首次直接探测到了反应堆电子反中微子。1962年,布鲁克海文实验室发现 μ 中微子。日本物理学家立即提出描述中微子振荡的混合矩阵,即MNS混合矩阵。此前,苏联物理学家庞蒂科夫(B.Pontecorvo)也提出中微子混合和振荡概念。中微子振荡随后成为粒子物理领域的研究热点,也是探索超出粒子物理标准模型的重要途径。本文旨在回顾中微子概念的提出历史,介绍庞蒂科夫和日本物理学家构建中微子混合矩阵的发展过程,并简要评述后续理论和实验发展。

一、中微子概念的提出及早期发展

β 射线性质及相关物理现象研究直接推动了原子核物理和粒子物理早期发展。1896年,贝克勒尔(A.Becquerel)发现天然放射性现象。两年后,卢瑟福(E.Rutherford)提出放射线由 α 射线和穿透性更强的 β 射线组成^[1]。其中 β 射线粒子最终被确认是电子。随后,物理学家深入研究 β 衰变的能量谱等性质。1914年,查德威克(J.Chadwick)首次发现 β 射线谱显示出连续谱迹象。这一问题最终于1927年被埃利斯(E.Ellis)及其合作者开展的一系列实验所确定^[2](图1)。衰变的连续谱问题随即引发当时物理学界的一次危机。如果原子核 β 衰变是一个两体反应过程,即 ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_ZY + e^-$,按照动量守恒定律,电子应该具有确定能量,而非连续分布。玻尔(N.

Bohr)甚至认为在原子核衰变过程中不遵守能量守恒定律。他于1930年5月8日在伦敦举行的一次法拉第讲座中公开谈及此想法^[3]。

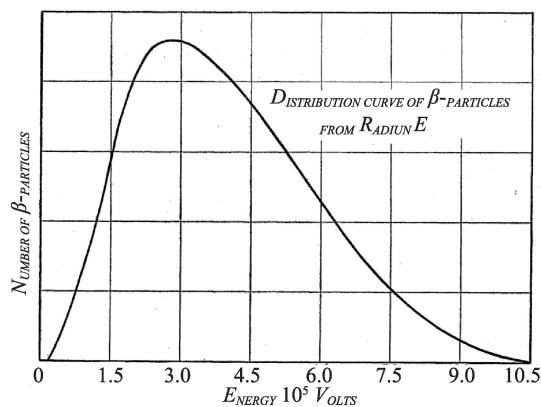


图1 E.Ellis实验测量的 β 射线连续谱

为拯救 β 衰变中的能量守恒问题,泡利(W.Pauli)于1930年12月4日给正在德国Tübingen参加放射性会议的与会者写了一封著名信件。他在信中除了解释无法参加会议的原因是更期待参加苏黎世举行的一场舞会,还声称找到挽救 β 衰变过程能量守恒定律的补救方法,即:

原子核中可能存在一种电中性粒子¹,我称之为中子(neutron),其自旋为 $1/2$,满足不相容原理。它不同于光子,不以光速运动。中子质量与电子同一量级,且肯定不大于质子质量的 0.01 倍。因此,假设 β 衰变中同时放射出中子和电子,二者能量之和为常数,便可理解 β 衰变的连续谱。

泡利在信中还提到自己不敢轻易发表论文,但还是应该勇于尝试新的想法解决物理学难题,并请放射性领域的朋友严肃考虑如何从实验上证实这

一和物质作用很小、穿透力很强的粒子。1931年6月15日至20日,泡利在加利福尼亚州帕萨迪纳举行的美国科学促进会及相关学会第88次会议上介绍了他关于“中子”的建议(图2)。



图2 泡利在帕萨迪纳参会时与古德斯米特(S.A.Goudsmit)交谈

不过,泡利的“中子”假说并没有立即受到欢迎,准确来说是关心 β 衰变问题的物理学家知道其工作但并没有广泛接受。以1931年10月11日至17日在罗马召开的第一届原子核物理国际会议为例,密立根(R.Millikan)、玛丽·居里(M.Curie)、玻尔、海森堡(W.K.Heisenberg)和埃伦费斯特(P.Ehrenfest)等一流物理学家悉数出席(图3)。德拜(P.Debye)在

会议总结报告中并没有提及泡利的“中子”假设,而是强调了玻尔的立场,即“在核分解过程中破坏能量守恒定律”的可能性。

1932年,核物理领域取得重要进展。当年2月,查德威克发现与质子质量相当的中性核子。但这一质量重的粒子显然不可能是泡利建议的中性粒子。4月,考克饶夫特(J.D.Cockroft)和瓦尔顿(E.T.S.Walton)利用高压倍加速器加速质子,首次实现用人工加速的粒子引起的核反应。这些新发现成为当年7月在巴黎举行的第五届国际电学会议主要议题。不过,费米(E.Fermi)在会上发表关于原子核问题的主题演讲时只在报告结尾处简单提及这些重大进展。他那时对查德威克的中子似乎兴趣不大,但对泡利的新粒子假说持积极态度,认为这种粒子可以解决 β 射线的连续光谱和核电子的自旋等问题。

1933年10月12~18日,费米在巴里举行的意大利科学促进会议上再次提到泡利的新粒子假说能解释 β 衰变连续谱,并称之为“中微子”(neutrino:意大利语,微小的中性物体),以避免与查德威克的“中子”(neutron:大的中性物体)混淆。几天后(10月22日至29日),在布鲁塞尔召开第七届索尔维会议(图4)。泡利在会上正式公开介绍他的中微子假



图3 1931年10月在罗马举行的第一届原子核物理国际会议



图4 第七届索尔维会议

说。这促使查德威克等参会者简单讨论探测这种难以探测粒子的可能方法。尽管如此,中微子在会议期间仍旧被忽视, β 衰变领域研究者也未将其视为主要问题。

费米的做法则截然不同。他很快放弃追求原子核尺度上的新物理定律,并展示如何在普通量子力学框架内通过中微子假设来解释 β 衰变。1933年底至1934年初,费米发表 β 衰变理论^[4]。类似于泡利想法,他提出在 β 衰变中发射出一个电子和一个中微子,两个粒子之间分享该过程中释放的能量,电子因而获得从零到某个最大值的所有能量值。此外,费米还得出一个关键性结论,即电子在 β 衰变之前不存在于原子核中,而是与中微子一起在发射那一刻产生。这类似于在量子跃迁过程中由原子发射的光量子,不能被认为在发射过程前已经存在于原子中²。物理学史家布朗认为费米构建了一个“强大的、定量的”,在许多方面仍然是“标准的”理论^[5]。根据该理论,原子核的 β 衰变是由母核中的一个中子 n 衰变到质子 p 加上一个电子 e 和一个反中微子 $\bar{\nu}$,即 $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ 的四费米子理论。1934年,约里奥·居里夫妇和费米分别利用 α 粒子和中子产生人工放射性物质。自发的 β 衰变只是弱相互作用的一种表现形式。两年以后,玻尔承认在原子核 β 衰变问题上,守恒定律的严格有效性不再存在严重疑问^[6]。

二、探测中微子

由于中微子不带电,且与物质相互作用极其微

弱,因此多数物理学家认为几乎不可能探测到中微子。根据贝特(H.Bethe)和佩尔斯(R.Peierls)在1934年2月给出的结果,利用原子核反应过程产生中微子(1 MeV)的截面约为 10^{-44} cm²量级(相当于在固体中可穿透 10^{16} 千米)^[7]。但也有实验物理学家设计实验寻找中微子。当时普遍认为测量放射性元素的反冲能量和动量能获得中微子存在证据。

1942年,浙江大学王淦昌教授发表一篇中微子探测方法的“极有创建性的文章”^[8]。王淦昌早年留学德国,在著名放射性物理专家迈特纳(L.Meitner)指导下获得博士学位。他在留学期间便关心 β 衰变理论和验证中微子实验。王淦昌1934年回国后相继在山东大学和浙江大学任教。“七七事变”爆发后,浙江大学决定西迁并最终落脚到贵州省遵义市。此时条件稍微安稳,但仍不具备开展实验条件,王淦昌通过归纳、分析国外物理学杂志上所发表的实验方法、数据和结论,提出利用 Be^{γ} 的 K 电子俘获方法寻找中微子^[9]。该过程中反冲核是单值能量,测量反冲核能量便可获得关于中微子信息。王淦昌认为这种工作既能为理论工作搭桥,也能推动实验工作前进。1947年,他又提出另一种探测中微子方法。因中微子研究工作,王淦昌还获得3000美元的范旭东奖金^[10]。阿伦(J.S.Allen)、莱特(B.J.Wright)、戴维斯(R.Davis)等国外实验物理学家按照王淦昌方法进行一系列实验,最终于1952年间接证实中微子存在。王淦昌后来曾说:“我想出来的实验,由外国人做出来,而不是在中国由我们的自己做出来,这是很可惜的,也是一件十分遗憾的事情。”^[11]

在提出中微子探测方法和后续中微子物理研究过程中,庞蒂科夫(B.Pontecorvo)也曾做出突出贡献。美国物理学家泰勒格迪(V.Telegdi)甚至认为中微子物理学中绝大多数重要思想都归功于庞蒂科夫。庞蒂科夫提出的中微子物理想法超前于时代,启发多项著名实验,促进理论和实验互动发展。1913年,庞蒂科夫出生于意大利比萨的一个犹太裔家庭。受费米的人格魅力吸引,他于1929年离开比

萨进入罗马大学物理系三年级学习。毕业后成为费米小组的最年轻成员,是“Via Panisperna boys”成员之一(图5)。1934年,庞蒂科夫参与完成著名的慢中子实验^[12]。两年后,他按照费米建议到巴黎的约里奥·居里(F.Joliot-Curie)实验室研究同核异构问题(nuclear isomerism)^[13]。1940年6月,德国占领巴黎。因担心自己犹太血统被迫害,庞蒂科夫携家人辗转到达美国并在一个油井勘探公司工作。受益于在罗马积累的中子研究经验,庞蒂科夫开发一种后来广泛应用于石油勘探行业的利用中子寻找石油的测井方法^[14]。



图5 费米及其研究小组(摄于1934年)
(由左至右:O.D'Agostino, E.Segrè, E.Amaldi, F.Rasetti 和 E.Fermi)

鉴于个人仍对物理学浓厚兴趣,庞蒂科夫于1943年至1948年到加拿大蒙特利尔实验室工作,参与设计和建造大型重水和天然铀反应堆NRX(National Research Experimental)³。由于反应堆将产生高通量中微子(预计 $6 \times 10^{15} \bar{\nu}_e / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$),庞蒂科夫意识到有可能利用核反应堆探测这类粒子。事实上,他在1946年一次由加拿大国家研究委员会组织的核物理会议演讲中讨论了利用反 β 衰变过程 $\bar{\nu} + Z \rightarrow (Z-1) + e^+$ 测量中微子的可能性^[15]。尽管根据贝特和佩尔斯在1934年的计算结果,在当时似乎不可能探测反 β 衰变。但庞蒂科夫认为利用诸如

核反应堆等强中微子源使得上述探测具有可行性。他认为反应中产生的($Z \pm 1$)核可能是放射性的,不难确定其半衰期。这种方法的基本特点是产生的放射性原子具有与探测原子不同的化学性质。因此,可利用大体积浓缩放射性原子。庞蒂科夫提出对这种放射化学方法的基本要求,即探测物质不太昂贵;产生的原子核必须具有放射性且其半衰期至少为一天,以便将其分离;分离方法应相对简单且背景需尽量小。他建议的反应为 $\bar{\nu} + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ (${}^{37}\text{Ar}$ 为放射性元素氩,半衰期约为35天),中微子源可以是太阳中微子或核反应堆产生的中微子⁵。

借助于液体闪烁体技术发展,科温(C.Cowan)和莱因斯(F.Reines)于1956年首次直接探测到这种幽灵粒子^[16]。莱因斯早年曾参与曼哈顿工程的多项核试验并撰写报告。1951年,他与科温开始探测中微子。根据费米理论,反 β 衰变过程 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 中的末态正电子会迅速同电子湮灭(产生两条0.51 MeV伽马射线),末态中子则被质子俘获(释放一条2.2 MeV伽马射线)。这种特征信号可以被检测(图6)。他们还发现在液态闪烁体中掺入镉盐可加强中子俘获,从而产生9 MeV伽马射线。1953年,莱因斯和科温利用汉福德核电站的一个大型反应堆开展首次实验。探测器包括300升液体闪烁体和90个光电倍增管,但因宇宙射线背景噪音未获得理想结果。1955年,他们又利用萨凡纳河附近700 MW反应堆(地下12米,距离反应堆11米;中微子通量约为 $1.2 \times 10^{12} / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)开展实验。1956年6月14日,他们给泡利发电报宣称发现中微子(图7)。

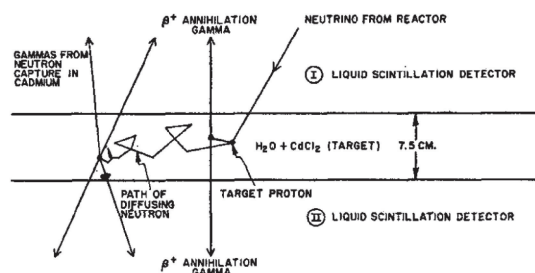


图6 莱因斯等人提出的直接探测中微子示意图

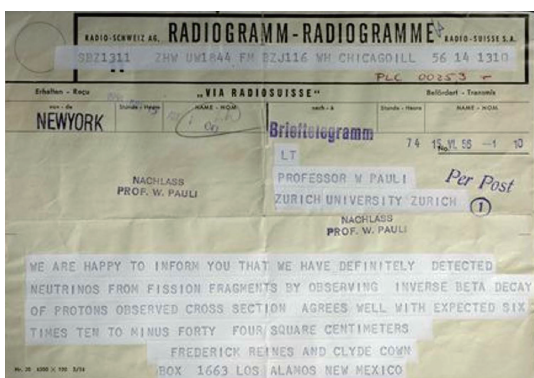


图7 莱因斯和科温发给泡利的电报,宣称探测到中微子

三、建立中微子混合矩阵

直接发现中微子的同一年,杨振宁和李政道提出弱相互作用下宇称不守恒的划时代成就,推翻物理学领域传统的宇称守恒定律。同时,物理学家渴望利用中微子作为探针来研究弱相互作用。尽管缺乏合适的实验方法,但在20世纪50年代末依旧取得进展。宇称不守恒定律得到实验验证后,朗道(L.D.Landau)、李政道和杨振宁、萨拉姆(A.Salam)分别提出二分量中微子理论。1958年,戈德哈伯(M. Goldhaber)等人实验发现中微子是左旋的,有力支持弱相互作用的 $V-A$ 形式。此外,物理学家相继给出中微子质量上限(如小于200 eV)。此外,庞蒂科夫和日本物理学家还提出中微子的振荡和混合,引领了20世纪下半叶中微子物理发展的主流。

1. 庞蒂科夫首次提出中微子振荡概念

1950年10月以后,庞蒂科夫开始在苏联杜布纳的原子核问题研究所工作。参与同步回旋加速器 Synchrocyclotron 实验和塞普可夫 Serpukov 加速器实验(图8)。关于庞蒂科夫到苏联的原因,俄罗斯物理学家契列波夫(V.P.Dzheleпов)认为他在当时“是一位共产主义理想主义者,真诚地相信俄罗斯选择的发展类型的力量和正确性。”^[17]当然,也有学者称庞蒂科夫在间谍身份被揭露之前而选择前往苏联。

庞蒂科夫对中微子振荡领域的贡献是根本性



图8 1950年代庞蒂科夫(中)与费米(右)在莫斯科⁶

的。1957年,他在中微子被认为是无质量的,因此不可能存在振荡效应的年代提出中微子可能存在振荡现象。他当时相信轻子领域也存在类似 $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ 现象,提出在二分量中微子理论不成立且中微子荷(即轻子数)不守恒的情况下,中微子-反中微子转变原则上是可能的^[18]。由于当时知道存在一种中微子,因此他提出的震荡模式为 $\nu_L \leftrightarrow \bar{\nu}_L$ 和 $\bar{\nu}_R \leftrightarrow \nu_R$ 。紧接着,庞蒂科夫得知戴维斯利用萨凡纳河反应堆利用 $\bar{\nu}_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e$ 过程观察到中微子和反中微子存在区别,且轻子数不守恒⁷。庞蒂科夫深入思考轻子数破坏过程并提出发生该过程的原因是在真空中电子中微子到反电子中微子的变换。除 ν_L 和 $\bar{\nu}_R$ 外,庞蒂科夫还假设存在惰性中微子 $\bar{\nu}_L$ 和 ν_R 。为解释戴维斯实验,庞蒂科夫认为存在 $\bar{\nu}_R$ 和惰性 ν_R 之间的混合 $\bar{\nu}_R \leftrightarrow \nu_R$ (通过两个Majorana质量本征态: $\nu_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}[\bar{\nu}_R + \nu_R]$, $\nu_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}[\bar{\nu}_R - \nu_R]$)。这意味着中微子和反中微子是粒子混合物,即两个具有不同宇称的中性Majorana粒子 ν_1 和 ν_2 的对称和反对称组合。因此,来自反应堆的最初主要由反中微子组成的一束中性轻子,在一定距离后将由等量中微子和反中微子组成^[19]。

1959年,庞蒂科夫开始考虑在加速器上开展中

微子实验。他认为首先要解决的问题是回答存在两种类型中微子的可能性,即来自 β 衰变的中微子与来自 $\pi \rightarrow \mu$ 衰变产生的中微子是否相同^[20]。他列举在 $\nu_e \neq \nu_\mu$ 情况下,一些由中微子(或反中微子)束诱发的可能反应过程将被禁止。尽管很困难,但庞蒂科夫提议在设计新的强加速器时须认真考虑计划测试 ν_e 和 ν_μ 特性的实验,还需在加速器设计早期阶段考虑这种实验中的辐射屏蔽问题。同时,哥伦比亚大学的施瓦兹(M.Schwarz)也讨论同样问题,提出产生几乎纯净中微子束流的方法^[21]。随后,施瓦茨参加了莱德曼(L.Lederman)、斯坦伯格(J.Steinberger)等人在布鲁克海文实验室的小组,将此想法付诸实施^[22]。1962年6月,该团队利用BNL的交变梯度同步加速器(AGS)产生15 GeV的质子束流发现 μ 中微子(证明存在两种类型中微子 ν_e 和 ν_μ)^[23]。三位物理学家因此共同分享1988年诺贝尔物理学奖。

庞蒂科夫曾先后建议苏联物理学家利用反应堆探测中微子和检验是否存在两种中微子,但由于缺乏足够的资源和设施(如高能加速器、核反应堆和地下实验室内)而无法开展实验验证其预言性的理论想法。此外,在冷战的国际背景下,他也无法与欧洲核子研究中心和美国等国家的物理学家合作。尽管如此,庞蒂科夫凭借在弱相互作用物理学和中微子物理学方面的工作被授予1963年列宁奖。1968年至1969年,庞蒂科夫与合作者发展出不同类型中微子(或反中微子)之间相互振荡的理论,成为解释各种振荡实验现象的理论基础^[24]。

2. 名古屋小组提出MNS混合矩阵

庞蒂科夫提出中微子振荡(中微子-反中微子振荡模式)概念时实验上只确认一种中微子。1962年发现 ν_μ 后,日本物理学家牧(Z.Maki),中川(M.Nakagawa)和坂田昌一(S.Sakata)立即在名古屋模型下构建了中微子振荡公式,描述中微子味道特征态(ν_e 、 ν_μ)与质量特征态(ν_1 、 ν_2)之间的关系(图9)。此



图9 坂田昌一、牧和中川

后,日本物理学界中微子研究领域保持领先优势。

名古屋模型是坂田模型的拓展。1956年,日本物理学家坂田昌一提出强相互作用粒子的复合模型,即坂田模型^[25]。模型将 p 、 n 和 Λ 粒子作为构成已知介子和重子的基础粒子。坂田模型提出后,短时间内未引起国际物理学界关注,但日本物理学家认识到其深远意义并做推广研究。牧首次尝试在场论框架下处理坂田模型。松本(K.Matsumoto)提出的复合粒子半经验质量公式能较好计算已知的复合粒子质量,还具有预言未知粒子能力。1958年,小川修三(S.Ogawa)指出当忽略质量差和电荷时, p 、 n 和 Λ 之间存在完全对称性。第二年,小川等人把完全对称性表述为三维么正群 $U(3)$ 理论,详细考察该群结构并尝试对基本粒子分类。不过,坂田模型研究介子时相对有效,但不能有效解释重子质量谱。

考虑到弱相互作用中重子族和轻子族之间存在强的相似性,且在 $p \rightarrow \nu$, $n \rightarrow e^-$, $\Lambda \rightarrow \mu^-$ 变换下存在明显对称性。坂田等人基于坂田模型提出名古屋模型以解释完全对称性及重子-轻子对称性。^[26]模型假定新引入的物质是重子质量及其相互作用根源,带正电的物质附着在三种轻子上生成 p 、 n 和 Λ ,即: $p = \langle B^+, \nu \rangle$, $n = \langle B^+, e^- \rangle$, $\Lambda = \langle B^+, \mu^- \rangle$,其中B场的作用是将重子和轻子映射。实验证实自然界存在两种中微子后,坂田昌一、牧和中川(图7)迅速对名古屋模型做必要修改,提出一种中微子混合理论^[27]。他们假设存在一种表征,其通过某种应用于弱中微子表征的正交变换来定义“真正的中微子”,

即 $\nu_1 = \nu_e \cos \theta + \nu_\mu \sin \theta$ 和 $\nu_2 = -\nu_e \sin \theta + \nu_\mu \cos \theta$ 上。他们当时认为 B^+ 仅附着于混合态 ν_1 (与 p 对应) 但不附着于 ν_2 , 理由是当时不存在与之对应的重子。但他们也指出不排除 B^+ 能附着于 ν_2 的可能性, 而与之对应的重子因为质量大而尚未被发现。

修改后的模型成功地解释了核子的轻子衰变和 A 粒子的轻子衰变之间的关系。但是, 此模型除了继承完全对称性理论在重子分类上的困难外, 还包含一些新的特定的假设, 例如 B^+ 物质与轻子相结合的方式, 以及中微子混合的根源等。为了克服修改后的名古屋模型的过渡性质, 牧在 1963 年引进四个原始重子来解释重子族和介子族的对称性, 由此把坂田模型和名古屋模型的积极因素都集中到一个统一模型中, 但也包含许多假设。

随着共振态粒子实验的积累以及群论方法的发展, 盖尔曼(M.Gell-Mann)和兹温格(G.Zweig)提出夸克(艾斯)模型。夸克模型假设重子由 u, d, s 和其反夸克 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ 组成, 夸克具有分数电荷。1973 年, 小林诚(M.Kobayashi)和益川敏英(T.Maskawa)推广了卡比波(N.Cabibbo)的二代夸克混合, 提出存在第三代夸克, 他们构建的 KM 矩阵不仅能够描述夸克味之间混合, 同时能够解释 CP(电荷-宇称)对称性破坏问题。中微子混合矩阵目前则被称为 PMNS 矩阵。此外, 发现第二代中微子后, 自然地伴随发现 τ 轻子(1975 年)提出存在第三代中微子。中微子混合矩阵也被扩展到三代。三代中微子振荡规律可用 6 个基本参数描述, 即 3 个混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 和 θ_{13} , 2 个质量平方差 Δm_{21}^2 和 Δm_{32}^2 , 以及 1 个电荷宇称相位角 δ_{CP} 。

四、测定中微子混合矩阵参数

1963 年, 巴考尔(J.Bahcall)等人根据标准太阳模型计算得出太阳内部通过 Be 衰变放射的中微子通量^[28]。第二年, 巴考尔^[29]和戴维斯^[30]同时分别发表了关于太阳中微子的理论和实验论文。戴维斯一直对庞蒂科夫提出的氯-氩方法感兴趣。他在美国布鲁克海文国家实验室工作期间持续研究这种

方法, 即通过反 β 衰变($\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$)过程产生的放射性 ${}^{37}\text{Ar}$ 数量推算太阳核聚变中产生的中微子数⁹。20 世纪 50 年代末期, 戴维斯首次在俄亥俄州一个矿井地下 1 英里深处放置探测器探测太阳中微子, 但因受宇宙射线影响信号而未得到可靠结果。随后, 他将实验移到南达科他州的霍姆斯塔克金矿, 将装有 390000 升四氯乙烯的探测器置于地下 4850 英尺(约 1478 米), 利用化学方法提取反应产物 ${}^{37}\text{Ar}$ 。1968 年 4 月 16 日, 戴维斯发表论文宣布观测到的太阳中微子只有巴考尔预言的理论值的 1/3^[31], 即所谓的“太阳中微子丢失”之谜。

物理学界对“太阳中微子丢失”之谜给出多种解释。其中, 庞蒂科夫 1968 年提出的中微子振荡是理论和实验的差异之源。太阳中微子发生振荡, 即由电子中微子变成 μ 子中微子或 τ 子中微子。Homestake 太阳中微子探测实验持续几十年。尽管期间也发表初步结果^[32], 但最终结果于 1998 年发表。论文中指出采用庞蒂科夫于 1946 年提出的方法^[33]。同时期开展的意大利的 GALLEX 实验和苏联的 SAGE 实验(探测中微子材料为 Ge)也与 Homestake 实验结果一致。

GALLEX、SAGE 等放射性化学探测器具有较低的能量探测阈值, 对太阳中微子光谱的不同部分敏感。与此不同, 小柴昌俊等人在 20 世纪 80 年代利用水切伦科夫技术建造了一台同样放置于矿井中的中微子探测器, 即神冈实验(Kamiokande, 3 千吨水)。到 20 世纪 90 年代中期该实验又升级为超级神冈实验(Super-Kamiokande, 5 万吨水和 1 万多个光电倍增管)。实验利用光电倍增管探测中微子在水池中发生碰撞产生的高能电子随后在水中产生的切伦科夫光子。神冈实验和超级神冈实验的实时探测器可以辨别中微子的入射方向, 确定中微子确实来自太阳并发生短缺, 观测到与戴维斯实验的类似结果。此外, 神冈实验还在 1987 年与 IMB 一起首次观测到超新星 SN1987A 爆发产生的中微子, 开启中微子天体物理学的新领域。不过, 这些实验只证明探测的太阳中微子少于理论预言值, 尚不确定本质原因是由中微子振荡引起还是标准太

阳模型存在问题。

户冢洋二(T.Yōji)和梶田隆章(T.Kajita)领导的团队将小柴昌俊开创的工作推向成熟,将大型水切伦科夫探测器技术应用于中微子物理和天体物理研究。1998年,梶田隆章在中微子国际会议上报告超级神冈实验发现大气中微子存在振荡现象。该实验是中微子振荡存在的确凿证据,也解决了大气中微子反常问题。实验显示大气中的中微子从源传播到地下探测器的消失现象,是首个中微子振荡证据,同时意味着中微子具有质量。大气中微子产生于初级宇宙射线与大气的相互作用中,次级介子衰变为 μ 子和 ν_μ (以及反中微子),产生的 μ 子会衰变为 ν_μ 和 ν_e 。超级神冈实验证实,虽然探测的大气 ν_e 数量符合期望,但观测到的 ν_μ 与预期数量有明显偏差(ν_μ 变为其他类型中微子),是中微子能量和它从产生点通过地球到地下检测器的飞行距离的函数。Kamiokande、Soudan2、MACRO、Chooz 和 Palo Verde 实验也观测到类似结果。但强有力确认来自K2K^[34]和MINOS^[35]加速器中微子实验。

2001年至2002年,太阳中微子问题的迎来突破。加拿大的麦克唐纳(A.B.McDonald)领导的SNO(Sudbury Neutrino Observatory)实验利用1000吨重水(D_2O)同时测量 ν_e 、 ν_μ 和 ν_τ 中微子,获得三种中微子同时出现的证据,且三种中微子数之和与巴考尔的标准太阳模型预言一致^[36]。由于太阳中的核聚变只能产生 ν_e ,因此新出现的两种中微子只能是由 ν_e 振荡(或其他机制转换)而来。SNO结果与以前的“太阳中微子”实验结果一起确定了相应的振荡参数。特别地,混合角实际值有力地证明太阳内部发生MSW(Mikheev-Smirnov-Wolfenstein)物质振荡现象^[37]。KamLAND反应堆实验利用人工中微子源发现中微子消失现象,其特性与太阳中微子消失相同,最终确认太阳中微子发生振荡,排除了对太阳和大气中微子消失的其他解释。2002年,戴维斯与小柴昌俊凭借“对天体物理学的开创性贡献,特别是探测宇宙中微子”共同分享诺贝尔物理学奖。在SNO和KamLAND实验结果之后,中微子振荡从一

种可能理论变成一个定义明确的物理现象。2015年,梶田隆章和麦克唐纳凭借在发现中微子振荡方面所作的贡献共同分享诺贝尔物理学奖。

2000年7月,美国费米国家实验室的DONUT实验宣布发现第三种中微子— τ 中微子。三种中微子之间存在三种振荡模式,由描述中微子振荡的PMNS矩阵中的三个混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 和 θ_{13} 描述。其中, θ_{23} 和 θ_{12} 已分别由大气中微子振荡和太阳中微子振荡测得。 θ_{13} 则可通过 $\nu_\mu-\nu_e$ 和 $\bar{\nu}_e-\bar{\nu}_\mu$ 两种振荡模式研究。日本T2K和美国Nova实验研究第一种模式,中国大亚湾、韩国RENO和法国Double Chooz等反应堆实验研究第二种模式。

关于 θ_{13} 的首个非零迹象来自T2K。T2K实验自2010年1月开始运行,由位于日本东海的质子同步加速器J-PARC将质子加速到30 GeV,打靶产生 μ 中微子,并将束流对准295公里外的超级神冈探测器。当时CERN因故障停止运行,日本学界认为T2K是当时通过 ν_μ 寻找 ν_e 的最灵敏实验。2011年6月15日,T2K实验宣称首次观察到 ν_μ 转换到 ν_e 现象^[38]。但2011年3月因地震使得加速器设施遭到破坏而被迫停止运行。在此期间,T2K实验共探测到88个中微子事例,其中6个为电子中微子。由于束流中只有 μ 中微子,观察到的电子中微子必然来自振荡。在6个电子中微子事例中预期的本底事例为1.5个, θ_{13} 不为零的概率为99.3%。由此确定的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的中心值约为0.1,90%的置信区间为0.03~0.28。这等效于2.5个标准偏差,略低于3倍标准偏差。此前,法国Chooz实验结果表明在90%置信度下, $\sin^2 2\theta_{13}<0.15$ 。不过,T2K实验当时给出数据统计量较小,未达到确定标准,且由于是加速器实验,振荡几率中有几个未知参数,只能给出 θ_{13} 值的范围。

关于 θ_{13} 最具重要意义的发现由中国大亚湾反应堆中微子实验完成^[39]。2012年3月8日,大亚湾实验宣布以5.2倍标准差的置信度发现第三种中微子振荡模式, $\sin^2 2\theta_{13}=0.092\pm 0.016\pm 0.005$,即 $\theta_{13}\approx 8.8^\circ\pm 0.8^\circ$ 。随后几年,大亚湾实验又多次更新测量

结果。特别是2022年夏,大亚湾中微子实验组在韩国首尔召开的第30届国际中微子与天体物理大会上最新公布了其首个采用全部数据分析的、迄今最精确的中微子振荡测量结果(测量精度达到2.8%),是测量 θ_{13} 最精确的实验。较大的 θ_{13} 值为未来测量中微子质量顺序、宇称和电荷对称性破坏的中微子实验打开大门。

大亚湾实验的成功是中国高能物理学发展历程的一个里程碑。这既得益于实验组首席科学家在实验设计和运行过程中的高效领导和组织能力以及北京正负电子对撞机和北京谱仪运行30年所积累的人才和技术经验,中美科学家在探测器设计、物理分析等方面的国际合作也有助于大亚湾实验在激烈的国际竞争环境下快速获得可靠结果。大亚湾中微子实验是中国首次研制的低能量、低成本、高精度的大型探测器,有力地提升相关领域技术水平,还培养一批高水平青年科研人才,为中国基础科学研究发展打下坚实基础。此外,科研人员和工业界联合解决了实验建设中涉及的分布式延迟爆破、震动检测、大型精密仪器、化学化工、真空、高速读出电子学等关键技术,为江门中微子实验奠定基础。

五、结语

中微子物理研究方兴未艾,且展现出新活力。目前,中微子物理的发展与天体物理结合形成了“中微子天文学”的新兴交叉学科,在宇宙学和粒子物理领域扮演更重要角色。对中微子的深入理解将引领物理学家到达超出标准模型的新物理学领域,将推动理论发展。大型中微子实验建造过程也会伴随更多的关键核心技术突破,为未来高能物理实验提供技术支持。当前,国际上有多项实验利用多种中微子源和探测器研究中微子特性。伴随理论和实验发展,物理学家将重点研究中微子质量顺序、正反物质不对称性并寻找惰性中微子,此外在中微子绝对质量测量、中微子基本属性以及利用中微子研究宇宙结构和演化等方面有望取得新进展。

参考文献

- [1] E. Rutherford. Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. *Philosophical Magazine*, 1899, 47(284):109-163.
- [2] C. D. Ellis, W. A. Wooster. The average energy of disintegration of radium E. *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 1927, 117 (776):109-123.
- [3] N. Bohr. Faraday Lecture. Chemistry and the quantum theory of atomic constitution. *J. Chem. Soc.*, 1932: 349-384.
- [4] E. Fermi. Tentativo di una teoria dell' emissione dei raggi "beta". *La Ricerca Scientifica*, 1933, 4:491-495
E. Fermi. Tentativo di una teoria dei raggi "beta". *Il Nuovo Cimento*, 1934, 2:1-19.
E. Fermi. Radioattività indotta da bombardamento di neutroni. *La Ricerca Scientifica*, 1934, 5:283.
- [5] L. M. Brown. The idea of the neutrino. *Physics Today*, 1978, 31(9): 23-28.
- [6] N. Bohr. Conservation laws in quantum theory. *Nature*, 1936, 138: 25-26.
- [7] H. Bethe, R. Peierls. The "Neutrino". *Nature*, 1934, 133, 532.
- [8] 李炳安,杨振宁,王淦昌先生与中微子. *自然辩证法通讯*, 1986, 05: 34-39.
- [9] Kan Chang Wang. A Suggestion on the Detection of the Neutrino. *Phys. Rev.*, 1942, 61(1-2):97.
- [10] 《浙江大学日报》.1949年复刊新 123, 第 253 页.
- [11] 王淦昌. 无尽的追问. 长沙:湖南少年儿童出版社, 1997:69.
- [12] E. Fermi, E. Amaldi, B. Pontecorvo, F. Rasetti, E. Segre. Azione di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata dai neutroni. *Ricerca scientifica*, 1934, 5(2):282-283.
E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, B. M. Pontecorvo, F. Rasetti, E. Segrè. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. *II. Proc. Roy. Soc.*, 1935, A149:522-558.
- [13] B. Pontecorvo. Recent experimental results in nuclear Isomerism. *Nature*, 1939, 144:212-213.
- [14] B. Pontecorvo. Neutron well logging: a new geological method based on nuclear physics. *Oil and Gas Journal*, 1941, 40:32.
- [15] B. Pontecorvo. Inverse beta processes. *Chalk River Report*, 1946-Pd-205.
- [16] C. L. Cowan, F. Reines, et al. Detection of the free neutrinos: a conformation. *Science*, 1956, 124:103-104.
- [17] V. P. Dzelepov. The genius of Bruno Pontecorvo. <http://pontecorvo.jinr.ru/dzhelepov.html>.
- [18] B. Pontecorvo. Mesonium and anti-mesonium. *Sov. Phys. JETP*, 1957, 33:549-551.
- [19] B. Pontecorvo. Inverse beta processes and non-conservation of

- lepton charge. Sov. Phys. JETP, 1958, 7(1):172-173.
- [20] B Pontecorvo. Electron and muon neutrinos. Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1959, 37:1751.
- [21] M. Schwartz. Possibility of using high energy neutrinos to study the weak interactions. Phys. Rev. Lett., 1960, 4(6):306-307.
- [22] T. D. Lee, C. N. Yang. Theoretical discussions on possible high-energy neutrino experiments. Phys. Rev. Lett., 1960, 4(6):307.
- [23] G. Danby, J. M. Gaillard, K. A. Goulianos, et al. Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos. Phys. Rev. Lett., 1962, 9(1):36-44.
- [24] B. Pontecorvo. Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge. Sov. Phys. JETP, 1968, 26(5):984-988.
V. N. Gribov, B. Pontecorvo. Neutrino astronomy and lepton charge. Phys. Lett., 1969, B28(7):493-496.
- [25] S. Sakata. On a composite model for the new particles. Prog. Theor. Phys., 1956, 16(6):686-688.
- [26] Z. Maki, M. Nakagawa, Y. Ohnuki and S. Sakata. A unified model for elementary particles. Prog. Theor. Phys., 1960, 23(6):1174-1180.
- [27] Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata. Remarks on the unified model of elementary particles. Prog. Theor. Phys., 1962, 28(5):870-880.
- [28] J. N. Bahcall, W. A. Fowler, I. Jr. Iben, R. L. Sears. Solar neutrino flux. Astrophysical Journal, 1963, 137:344-346.
- [29] J. N. Bahcall. Solar neutrinos. I. Theoretical. Phys. Rev. Lett., 1964, 12(11):300-302.
- [30] R. J. Davis. Solar neutrinos. II. Experimental. Phys. Rev. Lett., 1964, 12(11):303-305.
- [31] R. J. Davis, D. S. Harmer, K. C. Hoffman. Search for neutrinos from the sun. Phys. Rev. Lett., 1968, 20(21):1205-1209.
- [32] J. N. Bahcall, R. Davis. Solar neutrinos: a scientific puzzle. Science, 1976, 191(4224):264-267.
- [33] B. T. Cleveland, et al. Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake Chlorine detector. The Astrophysical Journal, 1998, 496(1):505-526.
- [34] M. H. Ahn, et al. (K2K Collaboration). Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment. Phys. Rev. D, 2006, 74(7):072003.
- [35] D.G. Michael, et al. (MINOS Collaboration). Observation of muon neutrino disappearance with the MINOS detectors in the NuMI neutrino beam. Phys. Rev. Lett., 2006, 97(19):191801.
- [36] B. Aharmim et al. Determination of ν_e and total 8B solar neutrino fluxes with the sudbury neutrino observatory phase I data set. Phys. Rev. C, 2006, 75:045502.
- [37] L. Wolfenstein. Neutrino oscillations in matter. Phys. Rev. D, 1978, 17(9):2369-2374.
S. P. Mikheev, A.Y. Smirnov. Resonance amplification of oscillations in matter and spectroscopy of solar neutrinos. Sov. J. Nucl. Phys., 1985, 42:913-917.
- [38] K. Abe, et al., T2K Collaboration. Indication of electron neutrino appearance from an accelerator-produced off-axis muon neutrino beam. Phys. Rev. Lett., 2011, 107(4):041801.
- [39] F. P. An, et al., Daya-Bay Collaboration. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay. Phys. Rev. Lett., 2012, 108(17):171803.

注:

- 1 当时物理学界通常认为原子核由质子和电子构成。
- 2 1933年12月,佩兰(F.Perrin)也独立提出零质量中微子“不预先存在于原子核中”和“像光子一样在发射时被创造出来”的想法。
- 3 NRX反应堆位于安大略省乔克河,于1947年7月22日运行,是当时功率最高的实验用反应堆。
- 4 该讲座于1946年11月20日作为加拿大国家研究委员会原子能部Chalk River Report Pd-205发布,随后立即被美国原子能委员会列为机密,直到1949年10月8日解密。
- 5 反应堆产生的是反中微子,当时尚不清楚中微子和反中微子区别。
- 6 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bruno_Pontecorvo_and_Enrico_Fermi_1950s.jpg
- 7 不过后来发现戴维斯实验结果无效。
- 8 1960年,李政道和杨振宁也讨论了高能中微子实验的理论意义。他们的工作直接启发了1962年布鲁克海文实验室发现 μ 中微子实验。
- 9 反应生成的 ${}^{37}Ar$ 会随着液体中充入氦气产生气泡蒸发并回收。 ${}^{37}Ar$ 经过35天半衰期的特殊 β 衰变又变回原来的 ${}^{37}Cl$ 。这一衰变伴随的离子化效应可使用比例计数管统计。

资助项目:中外科技创新史比较研究——科技自立自强之路