

# 揭开中微子神秘面纱的 理论物理学家

邢志忠

中微子从宇宙大爆炸开始就充斥于整个物质世界，但是直到20世纪30年代人类才意识到它的存在。经过多年的理论和实验研究，科学家们终于逐步揭开了中微子的神秘面纱，尽管依然无法完全看清它的真面目。在这一考验灵感和耐心的求是之旅中，有一些理论物理学家的名字注定成为中微子科学史的丰碑。正是由于他们基于实验事实的天才思辨，才使得我们了解了中微子的基本性质及其与物质的相互作用。本文将简要介绍几位理论先行者在中微子物理学发展过程中所做出的举足轻重的贡献。

沃尔夫冈·泡利



众所周知，中微子的概念最早是由奥地利理论物理学家沃尔夫冈·泡利于1930年底提出的。为了解释当时 $\beta$ 衰变实验中的电子能

量分布疑难，泡利做了一个铤而走险的假设： $\beta$ 衰变的末态粒子中可能包含一个无法直接被探测的电中性、自旋为二分之一的微小粒子，它随同电子出现并带走了一部分能量和动量。泡利将这个假想的新粒子称作“中子”，但他那时却不敢正式发表这个大胆的猜想。直到著名的索尔维会议于1933年10月在布鲁塞尔召开之际，泡利才有足够的勇气向与会的那个时代最顶尖的物理学家们通报了他的解决 $\beta$ 衰变实验能量不守恒之谜的方案。

恩里科·费米



也参加了1933年的索尔维会议的意大利理论物理学家恩里科·费米当即接受了泡利的“中子”假说。不过，为了和真正的中子（即质量与质子相当并和质子一道组成原子核的电中性粒子，1932年被英国物理学家詹姆斯·查德威克发现）相区别，费米把泡利的假想粒

子改称为“中微子”。基于泡利的假设以及当时刚刚发展起来的原子核理论与量子场论，天才的费米于1933年年底建立了描述 $\beta$ 衰变的有效理论。这是费米对理论物理学最杰出的贡献，因为它引领了全世界科学家对原子核衰变的研究并最终导致了标准弱相互作用理论的建立。但是当年《自然》杂志的编辑毫不客气地拒绝了费米关于 $\beta$ 衰变的论文，认为它不过是一些远离物理现实的猜想。于是费米只好将他的思想先发表在意大利一家极不起眼的《研究》杂志，次年又在德国的《物理学杂志》上发表了一篇更为翔实的理论文章。

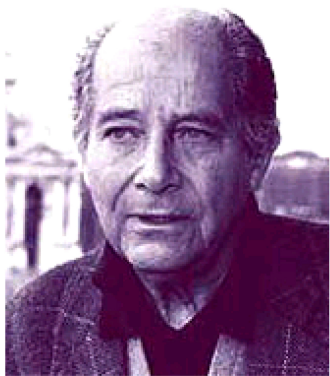
埃托雷·马约拉纳



1937年，费米的学生埃托雷·马约拉纳指出：中微子很可能不同于其他带电荷的、自旋等于二分之一的基本粒子（即通常所谓的狄拉

克粒子)，其反粒子也许就是它本身。人们把反粒子等于自身的中微子叫做“马约拉纳中微子”，它与“狄拉克中微子”最大的区别在于它会导致轻子数破坏，从而引发诸如无中微子的双 $\beta$ 衰变过程。虽然马约拉纳的猜想至今尚未得到实验的证实，但是它得到了绝大部分基本粒子物理学理论家的青睐。比方说，在基于SO(10)群对称性的大统一理论模型中，中微子自然而然地具有马约拉纳粒子的特性。因此目前有很多无中微子的双 $\beta$ 衰变实验正在进行中，力图确定中微子到底是奇特的马约拉纳粒子还是常见的狄拉克粒子。

### 布鲁诺·庞蒂科夫



泡利中微子假说直到1956年才得到实验的证实。美国科学家克莱德·科温和弗雷德里克·莱因斯等人利用核反应堆做实验，首次探测到了来自核裂变的反电子中微子，即 $\beta$ 衰变过程中出现的那种神秘粒子。反电子中微子被发现一年之后，意大利理论物理学家布鲁诺·庞蒂科夫立即意识到：如果中微子是马约拉纳粒子，那么一个反电子中微子就有可能转化为一个电子中微子。这是最早的“中微子—反中

微子”振荡的概念，类似于中性K介子及其反粒子之间的相互转化。由于正反中微子之间相互振荡的振幅受到螺旋度改变的强烈压低，实际上很难在实验中被观测到。直到1968年，庞蒂科夫及其合作者才发展出不同种类的中微子（或反中微子）之间相互振荡的理论，成为今天解释各种振荡实验现象的理论基础。

### 牧二郎、中川昌美 与坂田昌一

1962年，利昂·莱德曼、梅尔文·施瓦茨和杰克·斯坦博格三位科学家在美国布鲁克海文国家实验室的加速器上发现了一种不同于电子中微子的新型中微子，即 $\mu$ 中微子。这一重要的实验发现促使日本理论物理学家牧二郎、中川昌美和坂田昌一提出了一个重要猜测：电子中微子和 $\mu$ 中微子在自由传播时的状态（即具有确定质量的状态）可能不同于它们参与弱相互作用时的状态，两者之间的关联由一个欧拉角来描述，叫做味混合角。这就是轻子味混合的基本思想，可以推广到三种不同类型的带电轻子和中微子之间的味混合，而描述该物理效应的矩阵被称为MNSP混合矩阵，其中四个字母分别代表三位日



牧二郎



中川昌美

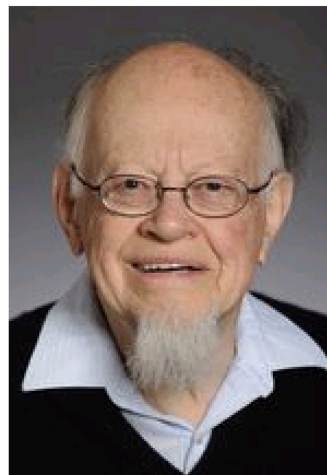


坂田昌一

本理论家和庞蒂科夫的姓氏英文字母头。正是由于三种中微子具有极其微小、互不相同的静止质量，而且它们之间存在味混合，才会发生中微子振荡这样的量子相干现象。与轻子类似，不同的夸克之间也存在味混合。

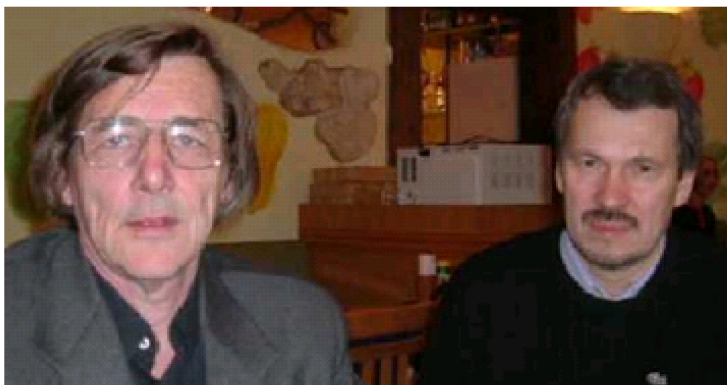
### 林肯·沃芬斯坦与 阿列克谢·斯米尔诺夫

对于实际的太阳、大气、反应堆和加速器中微子振荡实验而言，中微子束流都是在物质中传播的，因此它们不可避免地会与物质中的电子和原子核发生相互作用。1978年，美国理论物理学家林肯·沃芬斯坦注意到，电子中微子或反电子中微子在地球或太阳内部传播时，会由于带电流相互作用而被物



林肯·沃芬斯坦





斯坦尼斯拉夫·米赫耶夫

阿列克谢·斯米尔诺夫

质散射。如果这种散射效应不改变中微子的行进方向，也不破坏不同质量的中微子之间的量子相干条件，那么它就会修正中微子的振荡行为，使其不同于在真空中的振荡行为。这就是中微子振荡的物质效应。1986年，苏联实验物理学家

斯坦尼斯拉夫·米赫耶夫与理论物理学家阿列克谢·斯米尔诺夫将沃芬斯坦的想法用于解释雷蒙德·戴维斯所观测到的太阳中微子反常现象，发现物质效应能够显著增强太阳中微子的振荡几率，即所谓的MSW共振效应。类似的物质效应

也会出现在超新星中微子振荡以及人工可控的长基线中微子振荡过程中，因此它也为我们利用中微子探针研究各种星体的内部结构提供了可能性。

毫无疑问，很多理论物理学家对理解中微子质量起源、轻子味混合机制、中微子的电磁性质、中微子在宇宙和天体演化过程中的重要作用、宇宙的物质-反物质不对称等基本问题也做出了杰出贡献。对于这些尚未得到实验完全证实的重要理论工作，我们将另行撰文给予详细的介绍。

（中国科学院高能物理研究所 100049）



## 科苑快讯

### 风电场提高周边夜间气温

最新研究表明，大型风电场会显著影响周边的气候，尤其是提升夜间的气温。利用与城市热岛相同的分析技术，研究者详细审阅了得克萨斯州中西部1万平方千米区域的卫星图像。得克萨斯州弗卢万纳（Fluvanna）的风电场（如图）是世界最大的风电场之一，研究组分析了2003~2011年这9年间的气温数据，当这一地区竖立95%的风电涡轮机时，该地夏季数月夜间地表的平均温度提高了0.65℃，远超风机竖立之前的水平。



研究组发表在《自然气候变化》（*Nature Climate Change*）网站上的论文说，入夜后，地平面的空气比几十米高处的更凉，风电涡轮机搅动温暖的空气下行加热地面。研究中测量的加热率来自于卫

星数据，而不是计算机模拟。研究者注意到，风电场区域气温有一个快速上升的过程，但随着风机数量不再增加，周边的气温将不再提高。

（高凌云编译自2012年4月29日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)）