

卡姆兰德实验发现反应堆中微子消失

王 贻 芳

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

由日、美、中科学家组成的卡姆兰德 (KamLAND) 实验组在 2002 年 12 月 6 日宣布发现了核反应堆中产生的电子反中微子消失的现象。这意味着反应堆中产生的电子反中微子发生振荡, 变成了另一种没有被探测到的中微子。这项重要的实验结果确证了太阳中微子振荡, 并确定了中微子振荡的关键参数, 是近年来与中微子有关的一系列重大发现之一, 对粒子物理、天体物理和宇宙学具有重大意义。

1. 中微子及其质量

中微子是一种非常小的基本粒子, 几乎不与任何物质发生作用, 很难发现和探测。1930 年泡利为了解释原子核 β 衰变时能量似乎不守恒的问题时, 提出是一种不可探测的中性粒子带走了能量。这个粒子随后被费米叫做中微子, 以区别于中子。虽然这个猜想泡利只是以一封私信的形式提出且从未正式发表文章, 但由于费米 β 衰变理论的巨大成功, 中微子很快被广泛接受。物理学家探测中微子的尝试在随后的 20 多年中从未间断, 但受条件限制, 绝大部分是间接测量。这其中最重要的成果即是由王淦昌提出的由原子核 K 俘获过程证明中微子的存在。由于中国条件有限, 实验最后由美国人艾伦完成。

20 世纪 50 年代初, 莱因斯 (Reines) 和柯文 (Cowan) 试图用质子反 β 衰变 $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$ 来直接探测中微子。他们用 400 千克掺杂了氯化镉 (CdCl_2) 的水作靶, 测量正电子湮灭而产生的两个 0.511 MeV 的 γ , 以及大约 $15\mu\text{s}$ 后中子为镉俘获后所产生的几个总能量为 9.1 MeV 的 γ 。当时他们最大的问题是到哪儿去找所需强度的中微子源, 莱因斯曾与费米讨论过用原子弹爆炸后产生的中微子。但经过慎重考虑, 他们还是放弃了这个想法, 采用了反应堆, 并于 1953 年初步看到, 1956 年十分清楚地直接探测到中微子。莱因斯为此荣获 1995 年诺贝尔奖。此后中微子的实验研究得到很大的发展, 60 年代初, 斯坦伯格 (Steinberger) 等发现存在两种中微

子: 电子中微子和 μ 中微子, 并因此获得 1988 年诺贝尔奖。1990 年, 位于瑞士日内瓦欧洲核子中心的大型正负电子对撞机 LEP 发现有且只有 3 种中微子 ν_e, ν_μ, ν_τ , 分别对应于 3 代轻子 e, μ, τ 。

在理论上, 50 年代初杨振宁等提出了弱作用中的 V - A 理论, 假设中微子质量为零。V - A 理论随后为弱电统一理论所继承, 成为粒子物理标准模型的一部分。中微子质量不为零要求修改粒子物理的标准模型, 并预示着存在超出标准模型的新物理, 如轻子数不守恒、质子衰变等。由于中微子是最轻的粒子, 是所有粒子衰变的最终产物, 宇宙中积存了大量自大爆炸开始以来产生的中微子, 因此中微子质量如果为零对宇宙学有重要意义。它可以构成宇宙中的热暗物质; 对宇宙结构的形成有重要影响, 而且它可能对理解宇宙中的物质-反物质不对称现象起关键作用。

2. 中微子振荡

60 年代初, 费米的学生, 因信仰共产主义而于二战期间逃到苏联的意大利物理学家庞特科沃 (Pontecorvo) 提出: 如果中微子有质量且其质量本征态与弱作用本征态不简并, 由量子力学波函数的叠加可推知, 不同的中微子之间可发生振荡。其振荡 (即一种中微子在飞行过程中变为另一种中微子) 几率可写为:

$$P = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E) \quad (1)$$

这里, E 为中微子能量, L 为飞行距离, Δm^2 为两种中微子质量平方差, $\sin^2 2\theta$ 为最大振荡几率。这种振荡几率可写成类似于夸克中的 CKM 矩阵的形式, 称作 MNS (Maki-Nagakawa-Sakata) 矩阵。中微子振荡迅速引起人们的兴趣是因为由此可以证明中微子质量不为零。

中微子振荡的首个实验证据很快便于 60 年代末出现了。为了验证巴卡尔 (Bahcall) 提出的太阳模型, 美国布鲁克黑文国家实验室的化学家戴维斯 (Davis) 领导了一个小组来测量太阳核聚变中产生

的中微子,即通过反 β 衰变 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ 中产生的 ${}^{37}\text{Ar}$ 数来推算太阳中微子数。他们令人吃惊的实验结果于1968年首次发表:观测到的太阳中微子只有巴卡尔预言的理论值的1/3,这就是有名的“太阳中微子丢失”之谜。在随后的30年中,戴维斯共探测到约2000个太阳中微子,结论仍然没变。太阳中微子发生振荡,由 ν_e 变成 ν_μ 或 ν_τ ,即是当时许多解释中的一种。依此解释,由式(1)(实际的公式还要复杂一些)人们还不能得出 $\sin^2 2\theta$ 与 Δm^2 的惟一解,而是有4组解,习惯上分别称“大角度混合解”(LMA)、“小角度混合解”(SMA)、“真空解”(Vacuum)和“低端解”(LOW)。

中微子振荡的第二个实验证据即所谓“大气中微子反常”。主要由 π 衰变而来的大气中微子应满足 $\nu_\mu/\nu_e \approx 2$,即 μ 子中微子数应为电子中微子数的两倍。自70年代以来,许多实验均发现此一比例接近于1(虽然误差很大)。由日本科学家小柴昌俊领导的神冈(Kamiokanda)实验在80年代中期建造了一个类似于美国IMB的水基切连科夫成像探测器,也发现了类似结果(误差稍小)。他们并与IMB一起,于1987年首次观测到超新星爆发产生的中微子,也证实了戴维斯的太阳中微子的实验结果。与别人不同的小柴随后又建了一个比原来的探测器大10倍,总重达5万吨的超级神冈(Super-Kamiokande)。这下大家才看清楚, $\nu_\mu/\nu_e \approx 1$ 是由于 ν_μ 消失了,且其消失的百分比随能量与飞行距离的关系与上述振荡几率公式相符。虽然其他解释还不能排除,但中微子振荡似乎是最自然、也是最可能的一种解释。

随后,加拿大的SNO实验用1000吨的重水(D_2O)来同时测量 ν_e 及 ν_μ 和 ν_τ ,获得了 ν_e 消失及 ν_μ 和 ν_τ 出现的证据,且3种中微子之和与巴卡尔的标准太阳模型预言一致。由于太阳中的核聚变只能产生电子中微子,因此新出现的 ν_μ 和 ν_τ 只能是由 ν_e 振荡(或其他机制转换)而来。这个极为巧妙的方法是1985年由美国加州大学尔湾分校的华裔物理学家赫伯·陈(Herbert Chen)提出的,可惜他在1987年去世,未能看到SNO成功的这一天。

由于中微子很难探测,历史上有关中微子振荡的实验结果经常真假混合。如莱因斯在1979年和法国的布杰(Bugey)实验在1984年先后“发现”反应堆中微子消失,即中微子振荡现象,这些结果随后被证明是错误的。目前人们对美国LSND实验所发现

的加速器中微子振荡仍然存疑。而太阳中微子(ν_e 消失)与大气中微子(ν_μ 消失)问题分别都有独立验证,因此结果是可信的。2002年诺贝尔物理学奖授予戴维斯和小柴以表彰他们对“探测宇宙中微子的贡献”,这是因为虽然太阳与大气中微子问题都可以用中微子振荡来解释,但其他解释仍不能完全排除,虽然大家都明白中微子振荡才是他们真正的贡献所在。

3. 卡姆兰德反应堆中微子实验

到目前为止,所有中微子振荡的实验证据均来源于大自然,因此中微子振荡在某种程度上依赖于我们对大自然的理解,如太阳模型、宇宙线在大气中的簇射过程等。所以在人工中微子源中发现中微子振荡才是它的最终证明。人工中微子源有两个可能性:一是加速器,一是反应堆。20世纪90年代末期,日本的KEK实验室用12GeV质子打靶产生中微子并由超级神冈探测,可惜由于超级神冈的光电倍增管爆炸事故而未能获取足够数据。虽然他们似乎看到中微子振荡的现象,但其统计显著性只有两倍均方误差,而一般物理发现均要求至少3倍均方误差,即99.8%的统计显著性。

反应堆中微子实验自20世纪80年代初开始,已进行了好几代。最早的开创者是吴健雄的学生、美国加州理工学院的玻姆(Boehm)教授。自ILL开始,发展至休斯(Chooz)和巴罗威尔德(Palo Verde),这些实验的探测原理与方法与莱因斯所用的基本一样,只是靶由水换成了液体闪烁体,且为了增加对 Δm^2 的灵敏度,与反应堆的距离也由10米增至1千米。由于事例率与距离平方成反比,与靶核数成正比,探测器的重量也由100千克增至10吨。实验的方法是观测反应堆由裂变过程所产生的电子反中微子数,并与预期的中微子数比较,如果发现中微子消失现象,则说明反应堆产生的电子反中微子发生振荡,变成了另一种中微子而没有被探测到。由于过去20年的不懈努力,人们对反应堆所产生的电子反中微子谱了解得很清楚,理论计算与实验比较只有3%的误差。

1994年,当超级神冈决定上马的时候,日本东北大学的铃木厚人教授即在思考神冈所在山洞的出路。到1996年他完成了一个非常大胆的计划:建一个世界最大的液体闪烁探测器,包括周围由水构成的屏蔽层,总共5千吨液体,比当时正在建造中的巴罗威尔德实验大了100倍!它可以测量周围180千

现代物理知识

米开外日本和南韩 20 多个核电站反应堆的中微子, 这些核电站的发电量占全世界核电站的 1/5 左右。这个实验对 Δm^2 的灵敏度将提高 100 倍, 与太阳中微子振荡的大角度混合解刚好一致, 因此可能对太阳中微子问题给出最终回答。1997 年, 本人在与美国斯坦福大学的格拉塔 (Gratta) 教授讨论巴罗威尔德实验的下一步计划时, 提出加入铃木领导的卡姆兰德实验 (当时只有日本参加)。随后在格拉塔教授的积极推动下, 十几个美国大学参加了这个实验, 总共包括日、美、中三国科学家近 100 位物理学家。1998 年本人代表卡姆兰德实验组在国际高能物理学会上报告了这个实验的设想。

卡姆兰德探测器位于日本西部富山市附近神冈镇山下 1000 多米的一个铅锌矿里。整个探测器直径 20 米, 高 25 米, 如图 1 所示。探测器中心直径为 13 米的气球里装了 1000 吨液体闪烁体, 气球外是 2 米厚共 600 吨的矿物油, 装在一个不锈钢圆球内用来屏蔽周围岩石的放射性辐射本底。此一直径 17 米的不锈钢球壁上装了约 2 千只直径为 50cm 的光电倍增管, 以测量粒子在液体闪烁体中的沉积能量。不锈钢球外为 3200 吨水, 用来屏蔽本底及标记宇宙线事例。实验总投资约为 2600 万美元, 其中日本 2000 万, 美国 600 万。

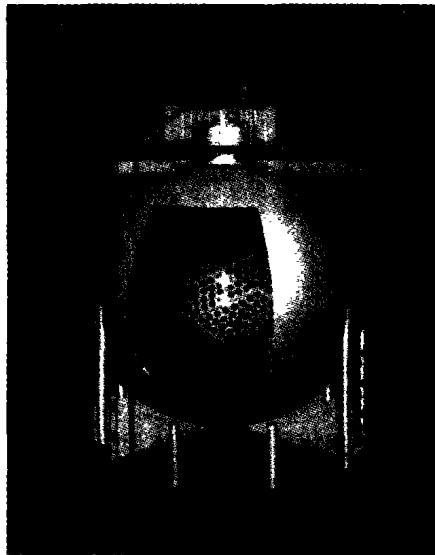


图 1 卡姆兰德探测器示意图

自 1997 年开始建造, 卡姆兰德实验于 2001 年全面建成。经过半年多的调试, 于 2002 年 2 月正式开始取数。经过 8 个多月的努力, 有效取数时间约 145 天, 合作组在 2002 年 12 月 6 日投给《物理评论》15 卷 3 期 (总 87 期)

通讯》(Phys. Rev. Lett.) 的文章中, 报告了引起全球媒体 (如纽约时报、朝日新闻、人民日报等) 及圈内人士关注的重要结果。我们一共观测到 54 个中微子事例, 而预计却有 86.8 ± 5.6 个事例, 减去大约 1 ± 1 个本底事例, 我们得到观测与预计的比例为 $0.611 \pm 0.085(\text{stat.}) \pm 0.046(\text{syst.})$, 如图 2 所示。也即是说, 只观测到预期值的 60%, 其余 40% 的中微子消失了, 或者说振荡为另一种中微子而没有探测到。此一观测结果的统计置信度为 99.95%。图 2 同时也将过去 20 年里其他实验的结果一并画出, 虚线代表太阳中微子没有振荡, 点线代表太阳中微子振荡的“大角度混合解”: $\sin^2 2\theta = 0.833, \Delta m^2 = 5.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, 阴影表示在 95% 的置信度下大角度混合解的允许范围。由此图可以看出, 我们观测到的中微子消失定量上与“大角度混合解”符合, 而其他解不符。

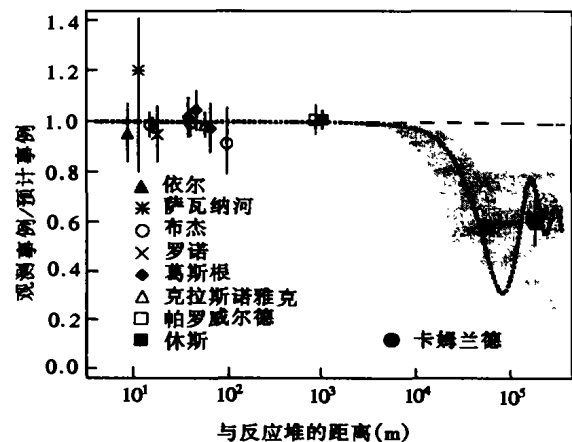


图 2 反应堆实验所得中微子通量的观测值与预期值之比。虚线代表太阳中微子没有振荡, 点线代表太阳中微子振荡“大角度混合解”, 阴影表示在 95% 的置信度下大角度混合解的允许范围

由式(1)可以看到, 中微子振荡几率与能量有关, 因此在不同能量下中微子消失的比率是不同的, 即中微子能谱是畸变的。我们测得的中微子能谱如图 3 所示, 深色实线为没有中微子振荡时的能谱, 带误差棒的点为实验结果。由图 3 可以看出, 实验点不仅普遍偏低 (中微子消失), 而且峰位移动, 与中微子振荡的预期符合得很好。最佳拟合参数为 $\sin^2 2\theta = 1.0, \Delta m^2 = 6.9 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, 与太阳中微子振荡的“大角度混合解”一致。由于中微子是反应堆与太阳惟一共同的东西, 因此中微子消失现象只能用中微子本身的性质来解释。再由于太阳中微子振荡的“大角度混合解”可以定量解释所有观测到的数据, 因此

我们可以肯定地说,太阳中微子发生了振荡,巴卡尔的标准太阳模型是正确的,中微子是有质量的。

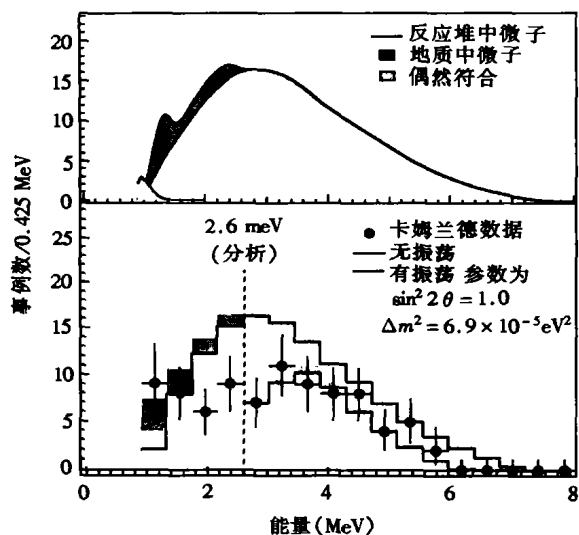


图 3

由图 3 还可以看到,在 2.6MeV 以下区域有除反应堆以外的中微子,这就是人们期待已久、但从未有人探测到过的地球本身发出的中微子,叫做地质中微子。地球的地壳、地幔、甚至可能在地心都含有大量的铀与钍元素,其含量及二者之间的比例反映了地球及行星的形成与演化的历史与规律,对它们的测量是研究地质学、探索地球深处奥秘的一个重要、有时也是惟一的一个手段。铀和钍均可通过级联衰变产生中微子,由图 3 的数据拟合,我们共得到 5 个由铀而来和 4 个由钍而来的中微子。虽然这一数据还不足以说明太多地质学的问题,但这是人类首次探测到中微子。可以肯定的是,与中微子天文学一样,中微子地质学将会得到一个长足的发展。

中国方面在这项实验的贡献主要是早期探测器的设计,包括蒙特卡罗模拟计算和信号与本底数目的估计;触发系统的设计与维护,包括一个概念新颖的主触发系统和一个用来精密测量绝对时间的卫星全球定位系统(GPS,由中国方面部分出资)及其信号传输系统(3000m);以及大量数据分析与文章的讨论。

卡姆兰德实验所获成果的重大意义在于:在人工中微子源中发现中微子消失,且其特性与太阳中微子消失相同,从而确认太阳中微子发生了振荡,排除了对太阳和大气中微子消失的所有其他可能的解释。这是国际上首次用人工中微子源证实太

阳中微子确实发生了振荡,这个实验同时也首次定量给出太阳中微子振荡参数的惟一解,即大角度混合解,验证了标准太阳模型是正确的,得出了中微子质量不为零的结论。这个实验也首次观测到地球本身发出的地质中微子,这或许是中微子地质学的开始。

中微子物理研究是当前粒子物理研究国际前沿的热点。近年来中微子物理研究的一系列重大成果预示着粒子物理研究的新突破。中国方面目前对此也极为重视,已开始投入相当的人力、物力进行前期研究。一个可能的方向就是长基线加速器中微子实验,主要考虑就是将极强的中微子束流由日本打到中国,以精密测量目前未知的几个中微子振荡参数。这些参数对理解宇宙中物质与反物质不对称可能起到决定性的作用。中微子物理正处于一个大发展时期,它对天文学、地质学等其他学科的应用价值正在被越来越多的人所认识。

作者简介



王贻芳 1963 年 2 月生于江苏南京,1984 年毕业于南京大学物理系。1991 年获意大利佛罗伦萨大学博士学位,先后在美国麻省理工学院,斯坦福大学工作。2001 年回国并入选中国科学院高能物理所“百人计划”,获自然科学基金会“国家杰出青年基金”。现任高能物理所学术委员会常委,物理分会副主任,中国高能物理学会常务理事。是卡姆兰德实验的中方参加者,并从事长基线中微子实验的预研工作及北京谱仪重大改进工程的领导工作。

封面照片说明

远望号航天测量船主要承担我国航天飞行器试验的海上测量、控制通信和打捞回收任务,以及我国地球同步通信卫星、气象卫星和外星发射的测控工作。目前测量船队共拥有 4 艘测量船,在飞船的飞行中,分别布置在大西洋、太平洋和印度洋上。“远望一号”船主要负责飞船入轨段的测控,“远望二号”船主要负责飞船变轨的控制,“远望三号”船主要负责飞船的轨道维护、返回调姿、轨道舱与返回舱分离及制动,“远望四号”船主要负责飞船的测控通信。