

中微子物理若干前沿问题

郭万磊

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

在过去的几年间,大量的实验结果已经表明中微子有非零质量以及轻子味混合。这一进展为我们打开了一个全新的值得探索的基本粒子世界。关于中微子我们已经知道了多少,我们想要发现什么?本文将从理论与唯象的观点进行阐述。

目前中微子物理的前沿问题主要包括:

- ® 中微子真的发生味转化吗?
- ® 有几代中微子? 存在惰性中微子吗?
- ® 中微子的质量是多少?
- ® 中微子是马约拉纳粒子还是狄拉克粒子?
- ® 轻子味混合矩阵的混合角有多大?
- ® 轻子味混合矩阵包含 CP 破坏位相吗? 如果包含,那么在中微子振荡和无中微子双 β 衰变中,这些位相会导致可探测的 CP 破坏效应吗?
- ® 在早期宇宙,重子反重子不对称可以通过轻子的 CP 破坏产生吗?
- ® 中微子和反中微子的性质破坏 CPT 守恒吗?
- ® 中微子能告诉我们天体物理和宇宙学方面的信息吗?

隔振装置、测试质量、光学系统及多数监控设备都被封闭在不锈钢的罩壳和管道内。罩壳和管道内抽高真空至 10^{-7} Pa, 这使封闭系统内的单位体积气体分子数下降至一个大气压时的 10^{-12} , 大大减少了热噪声, 对 LIGO 的一个基地而言, 两臂相加就有 8 千米长以上的封闭管道, 管道直径 1.2 米, 真空系统容积就达一万立方米, 被称为“地球上最大的真空实验室”。

激光和光学系统是探测器的核心部分。LIGO 激光选用低噪声的 Nd: YAG 激光(波长 1.064 μ m), 用激光二极管作泵浦源, 目前输出功率为 10W。对激光的频率、强度和模数均有很高的稳定要求, 频率不稳定性小于 10^{-7} 。分光镜和组成谐振腔的反射镜均由超纯度的融化硅磨制而成。反射镜通常也称检测质量, 直径 25 厘米, 厚 10 厘米, 重 10.7 千克。分光镜和检测质量的损耗均小于万分之一。

目前 LIGO 的探测灵敏度达到 10^{-20} , 已经进行了两次科学运行。科学家们还在紧张地调试中, 有

® 中微子能作为额外维(超出我们熟悉的 3 维)的探针吗?

® 中微子是否衰变? 衰变产物是什么?

® 中微子味物理的起源是什么? 它是高能标下的新物理吗? 如果

是, 那个标度是多少? 在那个标度下存在什么样的新物理? 中微子质量是通过跷跷板(seesaw)机制产生的吗? 中微子质量与混合的背后存在什么样的对称性? 轻子味物理和夸克味物理之间的联系是什么?

我们将讨论上述问题中的一部分, 这里我们已经考虑了最新的实验结果。

中微子真的发生味转化吗

现在, 有非常强的实验证据支持中微子从一种味变到另外一种味。在 2002 年 4 月, 真正令人兴奋的证据是来自关于太阳中微子的 SNO 实验。我们先回顾一下, 在太阳的核反应过程中产生的中微子仅有电子中微子 ν_e 。而 SNO 的结果清晰地显示到达地球的太阳中微子流中含有 μ 中微子 ν_μ 和/或 τ 中微子 ν_τ 。中微子味转化并不会改变总的中微子流量, 仅仅是在不同味之间重新分配而已。如果我们考虑惰性(sterile)中微子, 由于它不参加正常的弱作用, 所以味转化总体上会减少活性的、可探测的中微子流。现在让我们仅考虑没有惰性中微子的情况。

可能在 2003 年底实现 10^{-21} 的一期设计目标。二期项目(Advanced LIGO)已开始前期的研究, 预计 2008 年左右实现 10^{-23} 的探测灵敏度。

德国和英国的激光干涉引力波探测器联合项目 GEO600 进展比美国的 LIGO 慢一些, 尚未能进行科学运行。法国和意大利的联合项目 VIRGO 进展比 GEO600 还要慢一些。日本的 TAMA300 虽然已经科学运行 1000 小时以上, 但是探测器的臂长只有 300 米, 而且是建在城市之中, 背景噪声较高, 实际探测灵敏度不够好。日本科学家还在争取资金, 希望能在野外建立 3 千米臂长的激光干涉引力波探测器。

世界上从事引力波探测研究的科学家们已经形成了一个非常紧密的合作关系。顺利的情况下, LIGO、GEO600 和 VIRGO 会在今后的几年内组成一个激光干涉引力波天线阵联合运行, 极有可能捕捉到引力波。4 个独立的引力波天线的信号就可以确定四维时空中引力波源的位置。到那时, 人们就能更清楚地认识宇宙的去、现在和将来。

现代物理知识

SNO 实验用 3 种反应探测来自 ^8B 衰变产生的高能太阳中微子,发现 3 种中微子之和在误差范围内正好与标准太阳模型所预言的值相吻合。这个迹象表明我们正确理解了太阳中微子的产生,同时也使中微子的味转化更加引人注目了。

SNO 的实验数据显示到达地球的 ν_e 只占总中微子数目的 1/3,也就是说太阳内部 ^8B 产生的大部分 ν_e 在飞行到地球的过程中发生了味转化。

不包括非标准中微子与物质的相互作用,中微子味转化暗示中微子存在质量与混合。这意味着轻子,包括中微子,像夸克一样发生混合。在夸克部分有一个幺正矩阵 V 来描写夸克混合,同样在轻子部分也有一个幺正矩阵 U 来描写轻子混合。 V 和 U 矩阵中的复位相能够导致 CP 破坏。

在 SNO 实验后的一段时间里,几种能够解释太阳中微子味转化的候选机制也被重新考虑。候选机制包括受太阳内部物质效应(MSW 效应)影响的不同振荡形式、真空中的中微子振荡和一些非标准的方案。物质效应是指中微子在物质中传播时会与物质发生相互作用,由于物质中只含有电子(没有 μ 子和 τ 子),所以只有电子中微子会与其发生带电流相互作用,这样就会在中微子的哈密顿量中增加一个势能项,该势能项会影响中微子的味混合。世界上的几个小组通过整体拟合所有的太阳中微子实验数据发现与物质效应相关联的“大角度混合解”(LMA)形式是最被看好的标准候选者,然而此时其他的候选者并没有被排除掉。“大角度混合解”意味着增加的势能项起主导作用。

在 2002 年 12 月,太阳中微子背后的物理被 KamLAND 实验阐明。KamLAND 实验是研究核反应堆产生的反电子中微子流,它的探测器可以测量周围 180 千米开外日本和南韩 20 多个核电站反应堆的中微子。假设 LMA 是太阳中微子味转化的物理机制。然后假设 CPT 不变,根据中微子和反中微子的性质 KamLAND 实验应该看到反应堆产生的反中微子流会有一部分消失。另一方面,如果与物质效应有关的其他解或真空振荡是太阳中微子味转化的物理机制,那么 KamLAND 实验不应该看到中微子流的减少。KamLAND 实验实际上看到了有一部分中微子流的消失。一些科学家已经比较了 KamLAND 实验结果和与这些候选机制相应的中微子参数,发现相应于 LMA 的参数非常好地符合 KamLAND 实验数据和其他太阳中微子实验数据,而其他标准解释

在很高的可信度下被排除掉了。LMA 已经被认为是太阳中微子味转化的最合理机制。

在确定太阳中微子味转化之前,超神冈(Super-K)实验就给出了大气中微子味转化的证据。超神冈实验是探测高能宇宙线与大气层反应产生的 ν_e 和 ν_μ 。发现向上穿过探测器的 ν_μ 总数仅为向下穿过探测器的 ν_μ 总数的一半左右,两者的差别在于前者到探测器的距离比后者长了大约 13000 千米(地球直径),如果 ν_μ 不发生味转化则两者的比值为 1,这表明 ν_μ 在穿过地球的过程中发生味转化。中微子振荡能够非常好地解释这一现象(包括其他探测器的数据),那么 ν_μ 究竟振荡到哪一代中微子呢?超神冈实验同时发现向上和向下穿过探测器的 ν_e 是对称的,这告诉我们 ν_μ 主要是振荡到 ν_e ,整体拟合实验数据显示其混合角 θ_{atm} 非常大也许是最大即 $\sin^2(2\theta_{\text{atm}}) = 1$,相应的质量平方差 $\Delta m_{\text{atm}}^2 \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ (最好拟合值)。另外在 2002 年 12 月长基线中微子实验 K2K 也发现了 ν_μ 发生振荡的证据。K2K 实验是探测加速器产生的 ν_μ ,加速器到探测器的距离为 250 千米。如果 ν_μ 不发生振荡 K2K 实验将发现 80 个事例,而实验只发现了 56 个,中微子振荡能够成功地解释这一现象,同时 K2K 实验数据显示中微子不发生振荡的几率小于 1%。通过拟合 K2K 实验数据发现 $\Delta m_{\text{K2K}}^2 \approx 2.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2$,其混合角是 $\sin^2(2\theta_{\text{K2K}}) = 1.0$,与超神冈实验的拟合结果吻合得非常好!由于超神冈和 K2K 是两种不同性质的实验,这种吻合使人们更加相信中微子发生振荡。未来的 MINOS 和 CNGS 实验(建造中)将进一步加强这方面的证据。

在真空中中微子振荡到其他味的几率关于 L/E 有一个波动形式,具体表现为与 $\sin^2 2\theta \cdot \sin^2[1.27\Delta m^2 L/E]$ 有关,这里 L 代表中微子从产生到被探测的距离, E 代表中微子的能量, Δm^2 为两种中微子质量平方差, θ 就是实验测到的混合角。目前中微子味转化已经有令人信服的证据,但还没有观察到特征性的波动现象,这种波动是真空中中微子振荡的典型特征,观察到这一现象对于确认中微子振荡至关重要。随着 KamLAND 实验的进行,可能对这一目标有所帮助。未来的长基线实验有希望观察到加速器中微子振荡的波动性质。也许未来的地下探测器能够看到大气中微子振荡的波动现象。

这里我们有必要讲一下 LSND 实验,它是短基线中微子实验,探测 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ (和 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) 振荡,中微子

源到探测器中心的距离为 30 米, 实验显示相应的中微子质量平方差的范围是 $(0.2 \sim 2.0) \text{eV}^2$ 。目前与太阳、大气和 LSND 实验相应的质量平方差 Δm^2 的量级分别为 10^{-5}eV^2 、 10^{-3}eV^2 和 1eV^2 。如果只有 3 代中微子, 则只有两个独立的质量平方差, 另一个可以用这两个来表达, 而目前实验数据显示这 3 个质量平方差是相互独立的。如果 LSND 实验被证实, 就会有新的物理: 或者存在第 4 代惰性中微子 ν_s , 或者存在非标准中微子相互作用, 或者 CPT 破坏。目前费米实验室的 MiniBooNe 实验正在获取数据, 它将能够确认或排除 LSND 实验。目前绝大多数科学家都在怀疑 LSND 实验的可靠性, 另一方面其他一些实验也在很大的程度上排除了第 4 代惰性中微子的存在, 所以本文后面部分将不考虑 LSND 实验。

中微子是其本身的反粒子吗

在标准模型中中微子是无质量的, 是由于在标准模型中只有左手中微子, 没有右手中微子, 在拉氏量中不能写出狄拉克质量项(在夸克部分是可以的), 从而不能获得质量。而现在的中微子实验表明中微子有质量, 所以就要扩展标准模型, 扩展的方法之一就是引入右手中微子, 这样我们就能写出中微子的狄拉克质量项, 使得中微子有质量, 但通过计算可以发现这项的 Yukawa 耦合常数非常小, 大约为 10^{-13} , 这样小的耦合常数是自然不自然的, 也许就不是问题的本质。另一方面当我们引入右手中微子时, 完全可以写出不破坏 $SU(2)_L$ 规范对称性的马约拉纳质量项, 因为中微子是电中性的, 而在夸克部分我们不能写出这样的质量项, 由于夸克带有电荷, 这样的质量项会破坏电荷守恒。如果拉氏量中只有狄拉克质量项中微子将是狄拉克粒子, 中微子不同于反中微子, 狄拉克质量项保证轻子数守恒, 这样我们就能区分中微子与反中微子; 如果拉氏量中既包括狄拉克质量项又包括马约拉纳质量项, 这时中微子是马约拉纳粒子, 中微子是其自身的反粒子, 同时破坏轻子数守恒。

下面我们简要谈一下著名的跷跷板机制。在跷跷板机制中, 拉氏量既包括狄拉克质量项又包括右手中微子的马约拉纳质量项, 且马约拉纳质量项非常大。通过计算可知左手中微子的质量与右手中微子的质量(来自马约拉纳质量项)成反比, 自然就解释了左手中微子为什么有这么小的质量。如果跷跷板机制是正确的, 那么中微子一定是马约拉纳粒子。目前很多科学家都相信中微子是马约拉纳粒子, 有

很大的原因是来自跷跷板机制的完美。

如果中微子是马约拉纳粒子, 将有一个重要的物理现象: 无中微子双 β 衰变。无中微子双 β 衰变过程是 $A(Z, N) \rightarrow A(Z+2, N-2) + 2e^-$, 即原子核 $A(Z, N)$ 衰变到原子核 $A(Z+2, N-2)$ 和两个电子, 过程中要交换马约拉纳中微子。如果中微子是狄拉克粒子那么将不会有无中微子双 β 衰变现象。所以观测到无中微子双 β 衰变就能使我们确定中微子是马约拉纳粒子。目前无中微子双 β 衰变的有效质量 m_{ee} 的实验上限为 0.35eV , 而将来计划进行的实验的精度为 $0.01 \sim 0.1 \text{eV}$, 如果中微子质量谱是 $m_3 < m_1 < m_2$ (两种质量谱之一, 后面将详细讨论), 那么无中微子双 β 衰变的有效质量 m_{ee} 要大于 0.0085eV , 所以未来的无中微子双 β 衰变实验对于确定中微子是否是马约拉纳粒子及中微子质量谱有着重要的作用。

本文后面部分将只讨论马约拉纳中微子的情况。

中微子质量谱与味混合矩阵

近来的超神冈, SNO, KamLAND 和 K2K 等实验已经给我们提供了有力的证据表明中微子发生振荡, 即中微子有质量和混合。中微子有质量和混合则在相互作用的拉氏量中含有非零的质量项。在带电轻子(包括电子、 μ 子和 τ 子)取味基下, 轻子(包括带电轻子及相应的 3 代中微子)味混合来源于中微子质量矩阵(与狄拉克质量项和马约拉纳质量项有关)的非对角性, 即中微子的味道本征态(相互作用本征态)与质量本征态不一致。能够对角化中微子质量矩阵的幺正矩阵 U 就是轻子味混合矩阵, 对角化后的对角矩阵的 3 个对角元就是 3 种中微子的质量 (m_1, m_2, m_3) 。

根据实验和理论可知太阳中微子实验测到的是 $\Delta m_{\text{sun}}^2 \approx m_2^2 - m_1^2$, 而大气中微子实验测到的是 $\Delta m_{\text{atm}}^2 \approx |m_3^2 - m_2^2|$, 所以只有两种可能的质量谱: $m_1 < m_2 < m_3$ 和 $m_3 < m_1 < m_2$ 。目前还没有办法确定 m_2 与 m_3 谁大谁小, 将来的加速器长基线中微子实验(穿过地球物质)将能确定这一关系。

在 3 代中微子情况下, 轻子味混合矩阵 U 是 3×3 的幺正矩阵。 U 矩阵可以用 3 个混合角 $(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23})$ 和 3 个位相 (δ, ρ, σ) 来表达, 其中 $\theta_{12} \approx \theta_{\text{sun}}$ 和 $\theta_{23} \approx \theta_{\text{atm}}$, 根据 CHOOZ 实验可知 $\sin^2 \theta_{13} \leq 0.03$ 。目前我们对 3 个位相的值一无所知, 将来的长基线

实验能够确定狄拉克位相 δ , 而马约拉纳位相 ρ 和 σ 只能通过无中微子双 β 衰变实验来部分了解, 但无法完全确定。

轻子味混合矩阵与夸克味混合矩阵有很大的不同, 轻子味混合矩阵含有 2 个大的混合角, 而夸克味混合矩阵的 3 个混合角都较小, 这可能暗示着新的物理, 但现在我们还无法解释。

未来的实验将更加精确地测量中微子质量平方差及混合角, 这对我们很重要, 例如如果大气中微子的混合角是最大即 $\sin^2(2\theta_{\text{atm}}) = 1$ 则暗示着存在某种味对称性, 如果偏离最大则暗示这种对称性的破坏。另一方面将来的中微子实验也许能够确定中微子的绝对质量, 如氬 β 衰变实验 KATRIN 及宇宙学方面的观测 WMAP。2003 年 2 月 WMAP 实验给出了 $\sum_i m_i < 0.71 \text{ eV}$, 这一限制说明单个中微子的质量要小于 0.24 eV 。

中微子破坏 CP 对称性吗

CP 破坏意味着物质和反物质或一个反应过程和它在 CP 变换下的相应过程是可以区分的。夸克存在 CP 破坏, 轻子存在 CP 破坏吗? 中微子的 CP 破坏来自轻子味混合矩阵中的 CP 破坏位相。这部分我们将讨论以下几个方面: 中微子振荡中的 CP 破坏, 无中微子双 β 衰变和轻子反轻子不对称机制 (leptogenesis), 最后我们将简要地讨论一下 CPT 破坏。

中微子振荡中的 CP 破坏与轻子味混合矩阵中的狄拉克 CP 破坏位相 δ 和混合角 θ_{13} 有关, 而与马约拉纳 CP 破坏位相 ρ 和 σ 无关。目前我们只知道 $\sin^2\theta_{13}$ 的上限为 0.03, 这个值是否为零对于确定中微子振荡中是否存在 CP 破坏至关重要, 如果这个值为零则中微子振荡中不存在 CP 破坏。未来的各种中微子振荡实验把测量 θ_{13} 的值作为一个主要的目标。如前所述我们对狄拉克 CP 破坏位相 δ 一无所知, 确定它的值还需要未来的长基线中微子实验。

如果中微子是马约拉纳粒子即中微子是它自身的反粒子, 则存在马约拉纳 CP 破坏位相 ρ 和 σ , ρ 和 σ 并不影响中微子振荡中的 CP 破坏强度, 但它们影响无中微子双 β 衰变的有效质量 m_{ee} 。在研究中微子物理过程中, 寻找无中微子双 β 衰变非常重要, 如果我们观测到无中微子双 β 衰变, 那么我们就能确定中微子是马约拉纳粒子, 同时对于确定中微子的绝对质量和马约拉纳 CP 破坏位相有帮助。

今天宇宙中的重子比反重子多。对称性暗示在

宇宙大爆炸时重子与反重子数目应该是相等的, 如果没有 CP 破坏这种不对称将不会发生。而夸克的 CP 破坏不足以产生所要求的不对称度。令人兴奋的是重子与反重子 (或物质与反物质) 的不对称可以通过轻子与反轻子不对称来产生。我们先简要地看一下轻子反轻子不对称机制。1967 年苏联物理学家萨哈洛夫 (A. D. Sakharov) 在假设宇宙开始时处于重子数对称状态的情况下提出解释宇宙中物质反物质不对称的 3 个必要条件: (1) 存在重子数破坏的反应过程; (2) C 和 CP 都不守恒; (3) 远离热平衡, 即重子数破坏过程和 CP 破坏过程的反应率要小于宇宙的膨胀率。轻子反轻子不对称机制是重的右手中微子远离热平衡衰变 (破坏 CP 守恒), 产生轻子反轻子不对称, 然后通过反常的电弱过程 (sphaleron 过程) 把轻子反轻子的不对称转化到重子与反重子的不对称。如果轻子反轻子不对称机制是正确的, 则轻子一定存在 CP 破坏。中微子振荡中的 CP 破坏与轻子反轻子不对称是相互独立的现象。只有在具体模型下两者才可能联系起来。不过, 如果轻子反轻子不对称机制是正确的则中微子振荡中的 CP 破坏很可能发生。相应的如果我们观测到中微子振荡中存在 CP 破坏, 这将会增加我们对轻子反轻子不对称导致宇宙中重子反重子不对称的物理机制的信心。

CPT 破坏将导致中微子质量与反中微子质量的不同, 这就使中微子振荡不同于反中微子振荡。目前观测到的太阳中微子振荡和 KamLAND 反应堆反中微子振荡可以用一组共同的参数来描述, 这暗示了不可能存在大的 CPT 破坏。但现在的实验数据仍然允许微小的 CPT 破坏, 即有两组质量谱分别描写中微子和反中微子。

目前支持中微子发生味转化的证据是丰富的和引人注目的, 这些证据已经给出了中微子质量谱和轻子味混合矩阵的初步信息, 然而还有很多是我们不知道的: 中微子的绝对质量, 混合角 θ_{13} 有多大, 中微子破坏 CP 吗……, 在这些现象背后的物理是什么? 当前有很多中微子实验正在运行或建造中, 这些实验将精细测量中微子质量和轻子味混合的有关参数, 这有助于我们探索超出标准模型之外的新物理。中微子物理正处于一个大发展的时期, 中微子的明天将更加令人兴奋。

(文中部分内容编译自 B. Kayser, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 118(2003) 425)