

中微子物理*

李学潜

赵传贤

(南开大学物理系 天津 300071)

(成都无缝钢管厂大学 成都 610066)

摘要 近十几年来积累的数据表明,有相当数量的太阳中微子流在从太阳到地球探测器的漫长旅程中丢失了.最新的大气中微子实验结果指出,宇宙射线引起的大气中 ν_μ 与 ν_e 的比例不是原有理论预言的2:1,而是接近1:1,而且发现从上而下的 ν_μ 数目比从下而上的多, ν_e 的数量却基本不变.这两种现象可能是源于中微子振荡或其他的机制,然而这些机制并没有包含在20世纪最成功的理论——最小标准模型中.换言之,要合理解释所观测到的中微子实验就一定存在超越标准模型的新物理.人们期望在21世纪通过对中微子物理的进一步研究,对物质世界的结构、宇宙的演化以及基本相互作用获得更新的理解.

关键词 中微子振荡,太阳中微子流丢失,大气中微子

INTRODUCTION TO NEUTRINO PHYSICS

LI Xue-Qian

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin, 300071)

ZHAO Chuan-Xian

(University of the Chengdu Steel Company, Chengdu, 610066)

Abstract The data accumulated in the past decades indicate that a certain fraction of neutrino flux radiated from the Sun is lost on the way to the Earth detectors. Recent experiment on atmospheric neutrino show that the ratio of ν_μ and ν_e particles produced due to cosmic rays is not 2:1, as predicted by the present theory, but almost 1:1. Moreover, the upward flux of ν_μ is less than the downward flux but for ν_e both are almost equal. These two phenomena may be caused by the neutrino oscillation or other mechanisms which are not included in the minimal Standard Model, the most successful theory of the 20th century. In other words, to reasonably interpret the observed experimental results on neutrinos, one definitely needs some new physics beyond the Standard Model. We can hope that in the 21st century, through further study on neutrino physics, we can gain better understanding about the matter structure, universe evolution and fundamental interactions.

Key words neutrino oscillation, solar neutrino flux loss, atmospheric neutrino

1 为什么要研究中微子物理

中微子物理的研究近年来引起了物理学家越来越大的兴趣,并且在21世纪的前10—20年中将会成为高能物理主要的研究课题之一.为什么人们对这么小而质量那么接近于零的粒子这么感兴趣呢?

科学工作者的一切努力都在于探索大自然的奥秘或应用对自然规律的认识造福于人类.我们物理学家的任务和兴趣是研究这个宇宙最基本的东西,它涉及两方面:一是研究物质结构,即组成物质的最

基本的基石是什么?这当然是一层层深入的,由大到小,分子、原子、原子核、核子、夸克...,再由小到大,地球、太阳系、银河系、星云、星团到整个宇宙;另一个是研究宇宙中支配一切的根本规律,也就是动力学.换言之,什么“力”或“相互作用”使这些物质从大到小,从小到大,按我们今天观察到的那样构成、运动、分解.

事实上运动学是我们通过实验测量的,但动力

* 国家自然科学基金资助项目,国家攀登计划资助项目

1999-12-21收到初稿,2000-02-15修回

学,从牛顿力学、万有引力到爱因斯坦的狭义和广义相对论,从量子力学到今天我们了解的标准模型都是先猜出来的.也即大胆根据已有的事实,推测或假定建立理论模型,然后从中得出对新现象和新测量的预言,并在实验中检验.如果符合,就说明这样建立的理论有一定的合理性,如果与实验不符,就说明了所建立的模型不正确,而要被放弃或修改.经过多次的反复,我们可以认定一个理论的正确性.当然这个正确性是有局限性的,如牛顿力学只适用于低速宏观客体,而狭义相对论也不能把大质量存在引起的时空性质包括进去.

人们对自然的认识在前进,这点是不容置疑的.但进步的程度却不仅取决于科学知识的积累,而且很大程度上与科学技术水平的进展同步.试想没有今天的大加速器,我们根本不可能产生出 174 GeV 这样重的 t 夸克.而在这些加速器上,技术最新的成果如超导技术等都被广泛应用.

今天研究中微子问题的天时、地利、人和均已存在.本课题的成果对理论物理的基本原则的冲击,已使得它在判断我们对自然界基本知识上,即对物质结构和动力学的掌握上有了举足轻重的作用.其次我们今天的实验装备及测量手段,先进的电子学和高速的计算机,已使测量与获取数据,精确的在线及离线的分析成为可能.在这两方面的促进下,在 21 世纪最初 10—20 年中,中微子物理肯定会成为关注的热点之一.

2 中微子物理问题的提出

人们在观测 β 衰变时,见到中子衰变为质子和电子,但质子和电子的总能量和动量并不等于反应前的中子的能量和动量,而且中子、质子和电子均是自旋为 $1/2$ 的费米子.如果末态只有质子和电子,总角动量的守恒一定会破坏,而这是我们所不能允许的.泡利假定有一个质量接近于零的中性费米子伴随产生,费米将它定名为中微子.它的英文 *neutrino* 就是英文“中性”(neutral)与意大利文中“小”的字尾 *ino* 拼成的.

李政道和杨振宁建立了宇称不守恒的弱相互作用理论.他们认为弱相互作用的 $V-A$ 结构是由于二分量中微子的存在.即只有左手的中微子和右手的反中微子.这样的假定必定导致中微子质量严格为零的结论.在 70 年代中建立起来的弱电统一模型中, $V-A$ 结构是由于模型机制所决定的,整个理

论并不要求中微子有质量.

然而进一步的研究,特别是大统一的理论大都预言了右手中微子的存在,同时也确认了中微子是有质量的.当然今天任何超越标准模型的大统一理论都没有得到任何实验的支持,但这毕竟是理论作出的预言,可以在今后的实验中验证.

真正具有冲击效果,促使人们认为中微子有质量的是目前几个重大的实验突破,这就是太阳中微子流测量、大气中微子实验以及反应堆的中微子实验,它们的结果间接地指出中微子有质量.

应该说在这几个实验之前,物理学家们就开始了直接测量中微子质量的实验.当然,直接测量最有说服力,但不幸的是这种实验真的太难了.人们首先从 β 衰变电子谱的尾端行为来测量中微子质量.在尾端的事例数很少,因而统计性很差,实验的误差就远远超过得到结论所需的精确度.另外还有一个严重的问题,因为 β 衰变测量并非用自由的中子衰变,而是测量在某些原子核中的中子衰变,在这种精细的实验中,核介质效应变得非常重要,以至把真正的数据掩盖在强的背景中.有许多实验室发表的数据表明, $m_\nu^2 < 0$ (质量平方小于 0).这显然很荒谬.中国科学院理论物理研究所庆承瑞等的工作指出,正确处理核介质效应可以使实验分析得到的结果合理.(即分析出来的 m_ν^2 不再小于零).但由于原子核是多体集团,正确处理核介质效应是非常困难的.现有的理论还不能做到这么精细的结果,因而目前所有直接测量中微子质量的实验都没有积极的结果.中国科学院高能物理研究所漆纳丁领导的小组正在计划测量 ν_τ 质量,由于 ν_τ 质量可能比较大,而且没有核介质效应,也许直接测量 m_{ν_τ} 会得到比较积极的结果,但 m_{ν_τ} 的测量误差较大,前景并非乐观,需要大量创造性的工作和物理思想.

那么让我们回到 3 个有冲击性的实验.20 世纪末最成功的理论是标准模型.迄今为止,几乎所有的实验结果都与标准模型的预言相吻合.最初,在 Z 衰变中探测费米子代数的实验曾经得到小于 3 的结果,对 R_b 和 R_c 的测量也似乎与标准模型不符.但随着实验误差的降低,新的结果已完全和标准模型一致.只有关于中微子的实验是无论如何不能用标准模型解释的.真的,这 3 个实验对中微子物理来说有点象狭义相对论出现之前的迈克耳孙干涉实验、光行差实验和斐索实验.要合理解释这 3 个实验,爱因斯坦创立了伟大的相对论,那么这 3 个中微子实验会不会也有这么大的冲击效果呢?这是 21 世纪物

理学家的任务了.

首先是太阳中微子实验,太阳是我们地球能量的来源,也是人们研究得很多的客体.今天我们对太阳的结构、温度分布、元素的构成以及正在进行的核反应有了足够清晰的认识.大致上讲,太阳每放出 25 MeV 光能就会放出两个电子中微子 ν_e .而且根据太阳内核反应过程我们可知中微子能量谱.这样根据所谓标准太阳模型,我们很容易计算出到地球的太阳中微子通量,并在地球的探测器中测量这个通量.当然由于中微子只通过弱相互作用和其他物质作用,因而许多科普文章讲它可以很容易地通过地球,而未“碰”到任何东西.但这仅是根据几率来讲的,几率很小,但在大探测器上总可以观测到中微子与物质散射的事例.

世界上许多实验室都对中微子流进行了越来越精确的测量,最近的实验对太阳中微子谱也做了测量.一致的结果是测到的中微子流比预计的少 50% ~ 20%,不同能量的丢失比例也不同.结论是太阳中微子流在从太阳内部产生并放出后,在到地球探测器的漫漫长路上“丢失”了.

第二个实验是日本超神冈(Super Kamiokande)做的大气中微子实验.大气中微子来源于宇宙线中的 π 介子, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ($\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$).根据标准模型, ν_μ 和 ν_e 是不同的,这个反应几乎是 π^\pm 衰变道的 100%, μ^\pm 又会很快衰变,而且也是几乎 100% 通过 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$) 反应同时产生 $\bar{\nu}_\mu$ 和 ν_e ,在 π 和 μ 的衰变中各有一个 ν_μ [不区分(ν_μ 和 $\bar{\nu}_\mu$), (ν_e 和 $\bar{\nu}_e$)],仅在 μ^\pm 衰变中有一个 ν_e ($\bar{\nu}_e$).因而大气中 ν_μ (或 $\bar{\nu}_\mu$) 的数目应是 ν_e ($\bar{\nu}_e$) 的 2 倍,但超神冈的数据表明它们的比例很接近 1:1.那么可能是 ν_μ 减小了(丢失了)或 ν_e 增加了,到底哪个对呢?进一步的实验分析了中微子到达探测器的方向(立体角),结果发现从下面(穿过地球)的 ν_μ 数目比从上面来的少, $A_\nu = \frac{U-D}{U+D} \sim -0.311 \pm 0.043 \pm 0.010$ (其中 U, D 分别表示向上的和向下的流),而 ν_e 的数目两个方向几乎一样.我们似乎可以得到结论, ν_μ 在通过地球距离时丢失了,而 ν_e 大概不在乎地球直径这个“短短”的距离而几乎不变.

第三个实验是在液体闪烁中微子探测器(LSND)上测到在美国 Los Alamos 直线加速器上产生的中微子,他们发现 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 变换的几率为

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = (0.31 \pm 0.09 \pm 0.06) \times 10^{-2},$$

即在 30 m 的距离中有千分之三 $\bar{\nu}_\mu$ 中微子变成了

电子中微子 $\bar{\nu}_e$.

下面我们来分析理论上是如何看待这些实验事实的.

3 中微子物理问题的“解决”

我们测量到了中微子流的丢失,那么,什么物理机制成了流的短缺呢?最简单的也是比较合理的假设是中微子振荡,也就是我们测量的某种属性的中微子(ν_e 或 ν_μ 等)在传播过程中振荡到别的种性.因为我们的探测器对新的种性不敏感,因而“看不见”它们,而表现出中微子流的丢失.

中微子振荡的机制是什么呢?标准模型告诉我们,中微子在与物质相互作用时是按弱相互作用本征基作用的,即在相互作用的过程中(产生、散射或吸收),基本量是 ν_e, ν_μ 和 ν_τ 即电子型、 μ 型及 τ 型中微子(以及它们的反粒子),但传播时是以质量的本征基形式传播的,即传播的物理粒子是 ν_1, ν_2, ν_3 . ν_1, ν_2, ν_3 是有确定质量的中微子,因而是物理的实粒子.用量子力学的语言,弱相互作用的本征基和质量的本征基(物理本征基)不同.这两种本征基可以用一个简单的么正变换关联起来.要使这个变换不是平庸的,那中微子必须有非零质量,否则 3 种中微子在质量上简并,而使么正变换无意义.这变换就导致了各种不同种性中微子的混合.

假如,中微子是按某特定种性产生的(比如说 ν_e),它可以写成质量本征基中分量(ν_1, ν_2, ν_3)的线性组合,其中系数是确定的.但在传播时它却不能保持原有的种性.由于不同质量的中微子有不同的传播性质,原有的系数在传播过程中会改变.也就是说,产生了不同的线性组合.在从太阳到地球的漫漫长路上,这 3 种不同质量的中微子就不再是同步的,而产生不同的相位差.当它们到达探测器时就再也回不到原有的种性去与物质相互作用了.以两代中微子为例,我们假定在太阳中产生 ν_e ,即 $t = 0$ 时刻 $|\phi\rangle = |\nu_e\rangle$,我们来看看传播会改变什么(这时我们有 $\langle \nu_e | \nu_\mu \rangle = \langle \nu_1 | \nu_2 \rangle = 0$ 的正交性):

$$\begin{aligned} |\phi(t=0)\rangle &= |\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle \rightarrow \\ |\phi(t \neq 0)\rangle &= \cos\theta e^{i\frac{m_1^2 t}{2p}} |\nu_1\rangle + \sin\theta e^{i\frac{m_2^2 t}{2p}} |\nu_2\rangle, \end{aligned}$$

从而得到

$$|\langle \nu_e | \phi(t \neq 0) \rangle|^2 =$$

$$1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left| 1 - \cos \frac{\Delta m^2 L}{2 p \hbar c} \right|$$

其中 $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$, L 为传播的距离, p 为中微子动量, θ 为混合角. $|\langle \nu_e | \phi(t) \rangle|^2$ 即为 t 时刻后 ν_e 保持为 ν_e 的概率. 显然, 只有 $\theta=0$ 或 $\frac{\Delta m^2 L}{2 p \hbar c} = 2 n \pi$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 时这个概率才为 1. 当它小于 1 时, 即表示有一部分电子中微子 ν_e 振荡到 ν_μ , 成为丢失的中微子流. 当然, 如果这个机制是对的, $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2 \neq 0$, 至少有一个中微子具有非零质量.

当然还有另一个解释, 在太阳的强磁场下, 中微子的反常磁矩可以翻转过来, 形成右旋中微子. 由于弱相互作用是左旋的, 这样翻转过来的中微子就可以“逃过”探测器的眼睛而形成丢失. 研究表明, 在这个机制中, 中微子也必须具有质量.

对大气中微子流来说, 由于 ν_e 未丢失(当然也未增加), 那么是 ν_μ 振荡掉了. 它能到哪儿去呢, 标准模型告诉我们, 还存在第三代 ν_τ , 因而 ν_μ 只能振荡到 ν_τ . 还有一种理论预言存在一种 Sterile 中微子 ν_s , 它不直接参与任何相互作用, 但可以通过与其他中微子的混合, 对物理过程有贡献, ν_μ 很可能振荡到 ν_s 而不被探测器观测到.

对太阳中微子问题, 由于 ν_e 是产生在太阳的高温高密的环境下, 并在太阳中传播了一定的距离. 这和真空中的传播不同, 由于介质效应, 在太阳中某一局部区域可能产生一个共振效应, 使原来的真空中混合角 θ 变成有效的 θ' , $\sin \theta$ 可能很小, 但 $\sin \theta'$ 却可以很接近于 1. 这种典型的共振效应以预言了这个机制的 3 位科学家的名字命名, 称为 Mikheyev Smirnov-Wolfenstein (MSW) 机制, 它被认为是解决太阳中微子流丢失的一种可能机制. 当然还有一些别的可能机制, 但均非主流, 我们就不多谈了.

4 未解决的问题

我们上面谈了许多理论上如何解释这些观测到的中微子现象, 这些理论均要求中微子有非零质量, 但是否能解决上述的三个实验问题呢? 我们看看根据这些机制并拟合数据时, 对中微子质量的要求为:

(1) 对大气中微子问题: 如果是 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, $\Delta m^2 = 3.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2 / c^2$; 如果是 $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$, $\Delta m^2 = 4.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2 / c^2$.

(2) 对太阳中微子问题: $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ (或 ν_τ), $\Delta m^2 = 7.1 \times 10^{-6} \text{eV}^2 / c^2$ (对小混合角的 MSW 机制), $\Delta m^2 = 2.8 \times 10^{-5} \text{eV}^2 / c^2$ (对大混合角的 MSW 机制), $\Delta m^2 = 4.3 \times$

$10^{-10} \text{eV}^2 / c^2$ (真空振荡).

(3) 根据 LSND 实验, $0.3 < \Delta m^2 < 1 \text{eV}^2 / c^2$.

这些数据表明, 现有的理论很难同时满足 3 个实验结果. 由于 LSND 实验的数据很少, 一般认为它的结果不太可靠, 还要进一步研究.

最近许多研究者提出一种称为二代最大混合模型的理论, 即在 ν_e 和 ν_μ 中有最大的混合角 (45°), ν_μ 与 ν_e 的混合也比较大, 这样的理论可以比较合理地解释太阳中微子流丢失和大气中微子问题, 这里的关键是 $\Delta m_{\text{sun}}^2 = m_\mu^2 - m_e^2$ 比较小, 但太阳到地球的距离很大 (光需要几乎 8.3 min 才能从太阳到达地球, 而光通过地球直径的时间为 0.04s), 这保证了 $\Delta m_{\text{sun}}^2 L$ 并不很小. 对大气中微子问题, $\Delta m_{\text{atm}}^2 = m_\tau^2 - m_\mu^2$ 或 $\Delta m_{\text{atm}}^2 = m_\tau^2 - m_s^2$ 比较大. Barger 等人的研究认为, $\delta m_{\text{atm}}^2 \cong 4 m^2$, $\delta m_{\text{sun}}^2 = 8 \sqrt{2} \epsilon m^2$, 而 $m^2 \sim (0.035)^2 \text{eV}^2$, $|\epsilon| \approx 10^{-8}$, 因而 $\delta m_{\text{sun}}^2 \ll \delta m_{\text{atm}}^2$. 这说明 ν_τ 的质量应远远大于 ν_μ 和 ν_e 的质量. 这当然仅是一种可能的解释, 而且不能包括 LSND 的实验结果.

即使该理论是正确的, 它也给现有理论 (标准模型) 很大的冲击. 原因有 2 个: 其一, 在标准模型中, 费米子的质量来源于真空的自发破缺, 真空期待值通过汤川 (Yukawa) 相互作用给予费米子质量, 该理论在解释夸克的质量与混合上比较成功, 但如果应用到中微子就不太好了. 似乎中微子间的混合与夸克之间的混合不是来自于同一个机制. 那么它是由什么机制决定的呢? 这对目前非常成功的标准模型是一个冲击.

此外, 我们还不能解释为什么中微子的质量那么小, 在标准模型的框架下, 夸克与轻子在基本粒子领域内是相同的, 如果我们测量得到的结果是正确的 (见上面给出的 Δm^2 数据), 夸克质量至少要比中微子大百万、千万或几亿倍. 是什么造成中微子的质量那么小呢? 目前一种理论是 See-Saw 机制. 由于存在着另外的重中微子, 它们可以把观测到的中微子质量压下去 (通过质量矩阵对角化). 但我们目前还没找到这样的中微子.

5 展望

中微子不仅是我们当前的几个重要实验中的主角, 而且在宇宙论中, 它们很可能是宇宙热暗物质的候选者. 几年前的流行理论认为, 宇宙中热暗物质约占整个宇宙物质质量的 40% 左右. 而最近的研究表明, 热暗物质也许并不多, 它的作用让位于真空能量. 但即使如

此,大量的中微子充斥于宇宙空间,它们构成了热暗物质(即它们的速度接近光速).问题是它们在宇宙物质中成分是多少.宇宙学的精确测量对中微子质量会有一个限制.相应的理论都与早期宇宙物理过程相关联,甚至与早期宇宙中物质形成、演化、CP破坏、正反物质的不对称性有关联.因而弄清中微子的性质以及它们在高温高压下的行为对建立新的理论至关重要.

另外还有一个实验是 $2n \rightarrow 2p + 2e^-$ 的无中微子末态的双 β 衰变.如果此反应能发生,即打破了轻子数守恒定律,而且存在所谓的马约拉纳(Majorana)中微子,[我们一般讨论的中微子是狄拉克(Dirac)中微子].目前世界各地(包括我国)有许多实验室在测量这种反应.

我们上述的实验都是间接地证明中微子有质量.当然最好找到中微子有质量的直接证据.天上的东西,如太阳和大气中的宇宙线,我们都无法控制,我们能直接控制实验条件的是在加速器或反应堆上.然而从我们上面的公式中看出,如果要让 $\cos \frac{\Delta m^2 L}{2 p h c}$ 明显偏离 1,那么 L 要足够长,为了做这样的实验,人们设计了长基线中微子实验.

目前正在筹备的长基线有 3 条:第一条是在日本,由筑波的反应堆放出中微子,在 2500km 以外的超神冈探测器上接收,据报道,已经有事例被观测到了;另一条是从美国费米实验室发射中微子,由明尼苏达州的苏坦矿井中的探测器接收;第三条是在瑞士的欧洲中心发射中微子,而由意大利的矿井中的探测器测量,这样的中微子要飞过好几个欧洲国家,难怪物理学家开玩笑说,中微子要带上护照了.

一个最吸引人的建议是将来在中国建立一个大的探测器,同时测量来自 3 个方向的中微子.这样我们不仅可以测量振荡效应,还可以测量到达的中微子能谱,精确的测量结果可与实验相比.

这些当然不是简单地说说就可以做到的,因为中微子与物质相互作用很弱,对它的测量是极为困难的.这些实验要花费大量的人力和物力,需要世界范围的合作,特别是理论物理学家与实验物理学家的合作,特别需要理论物理学家给出新的思想.

当然有时也要有些运气.如 1987 年对超新星爆炸

的观测(1987A).各大实验室测到了不寻常的中微子流,从而使我们对中微子物理有了许多新认识.

与之共同存在的理论问题还很多,例如我们研究的新的物质对中微子振荡的影响,以及大爆炸后留下来的小黑洞也会使量子力学纯态变成混态,造成信息丢失,从而影响中微子振荡.这个研究说明,许多新物理机制都可能在这里产生作用.

人类探索自然的脚步从未停止过,这个过程是无止境的.我们今天已经知道了那么多,可以说上知天,下知地,也有了原子能,有了高性能计算机.但事实上,宇宙中的奥秘还多得很,我们今天对自然的认识还仅仅是窥视到了冰山的一角.在改造自然和利用自然方面还仅仅是开端.中微子物理研究的过去、现状和将来,是必然和偶然结合的结果.它对已知理论的冲击,对建立新理论的作用正是我们这个探索过程的意义所在.

我们国内也有许多理论物理学家在从事中微子物理的研究.中国科学院理论物理研究所庆承瑞、陶志坚,在中微子质量的起源、振荡机制、超越标准模型理论方面做了许多研究.中国科学院理论物理研究所吴岳良深入研究了許多超越标准模型的理论,并对中微子质量以及特性作了理论预言.中国科学院理论物理研究所孙昌璞对三代中微子振荡的非绝热跃迁做了很有影响的工作.中国科学院理论物理研究所张肇西和南开大学李学潜等人研究了微黑洞及环境产生的量子力学破坏对中微子振荡的影响.辽宁大学的马凤才等也做了关于中微子振荡中 CP 破坏方面的研究.在实验物理方面,中国原子能科学研究院孙汉城、梁东麒等在 β 衰变中测量 $\bar{\nu}_e$ 质量.最近中国科学院高能物理研究所漆纳丁领导的小组也在进行测量 ν_e 质量的工作.此外,中国科学院高能物理研究所叶铭汉等进行了双 β 衰变测量等.关于下世纪初,在北京建立长基线实验探测器的工作已在何祚庥院士领导下进行可行性的研究.总之我国的高能物理学家们在中微子物理的研究上作出了很大努力,给予了足够的关注,并通过与国外同行的合作,保持与世界上先进水平的研究同步.

我们希望在 21 世纪能在这个问题上得到真正的突破,我们国家年轻科学家应在这世纪之交的时刻作出自己的贡献.