

惰性中微子

李玉峰

(中国科学院高能物理研究所 100049)

2015 年度诺贝尔物理学奖授予日本科学家梶田隆章 (T. Kajita) 和加拿大科学家麦克唐纳 (A. McDonald)，奖励他们分别在实验中发现大气和太阳中微子的振荡现象，从而证明中微子具有非零的静止质量。

最近 20 余年中微子振荡实验研究表明，包含电子中微子、缪中微子、陶中微子的三味中微子混合和振荡的图像可以非常完美地描述绝大多数的中微子振荡实验数据，包括太阳中微子、大气中微子、反应堆中微子和加速器中微子实验。三味中微子振荡的图像可以用两个质量平方差：

$$\Delta m_{21}^2 \simeq 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad |\Delta m_{31}^2| \simeq 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2,$$

三个混合角：

$$\sin^2 \theta_{12} \simeq 0.30, \quad \sin^2 \theta_{23} \simeq 0.45, \quad \sin^2 \theta_{13} \simeq 0.022,$$

以及一个 CP 破坏相位 δ 来描述。截止到现在，两个质量平方差和三个混合角都已经知道，唯有中微子质量的顺序和 CP 破坏相位亟待未来的测量，也就是需要测量 Δm_{31}^2 的符号和 δ 的具体数值。

20 世纪 50 年代中微子螺旋度的测量结果表明自然界只包含左手的中微子态和右手的反中微子态，无法构造满足条件的费米子质量项，因此粒子物理的标准模型预测中微子质量为零。但是中微子振荡表明中微子具有非零的质量，构成了唯一具有确凿实验证据的超出标准模型的新物理效应。为解释中微子质量的产生机制，科学家引入不同性质的超出标准模型的新物理自由度，提出了不同类型的“跷跷板”机制 (Seesaw)，其中绝大多数跷跷板模型都包含标准模型单态的中性费米子，被称为“惰性中微子”。

自然界是否存在标准三味中微子以外的新型中微子？如果存在它的质量和相互作用强度有多大？这些都是中微子物理研究的未解之谜。这些问题的答案对于理解中微子质量和味道混合的起源、宇宙反物质消

失之谜、暗物质的本质，以及寻找超出标准模型的新物理等基本问题都具有重要意义。

传统的跷跷板模型假设惰性中微子的质量位于大统一能标附近，而其与普通中微子的相互作用强度在弱电能标。由于“跷跷板”机制的效应，普通中微子获得有效性质量为

$$M_\nu = M_d^2 / M_s,$$

其中 M_s 是惰性中微子质量， M_d 是惰性中微子和普通中微子之间的相互作用强度。从公式可以看到普通中微子质量受到惰性中微子质量的压低，因此可以满足太阳和大气中微子振荡数据的限制。但是极高的质量使得惰性中微子很难被实验直接探测，只能通过间接的方法来检验。大型强子对撞机 LHC 可直接产生 TeV 能标的惰性中微子，从而来检验这类低能跷跷板模型，但是需要额外压低惰性中微子与普通中微子的相互作用强度才能获得合理的普通中微子质量。

更轻的惰性中微子还包括 eV 质量和 keV 质量的惰性中微子。其中 eV 质量的惰性中微子可以解释短基线中微子实验的一些反常结果；keV 质量的惰性中微子构成宇宙温暗物质的有效候选者，能够避免传统冷暗物质模型带来的一些困难。本文我们只考虑这两种轻惰性中微子，着重介绍这些惰性中微子在理解中微子振荡机制、影响宇宙演化行为等方面的作用。此外我们还简述惰性中微子在未来实验和观测方面的研究前景。

一、eV 质量惰性中微子

近 20 年来，除了证明三味中微子振荡框架的一系列太阳、大气、反应堆和加速器中微子实验，科学家在一些短基线 (SBL) 中微子实验也观测到了“疑似”中微子振荡的信号，被称为短基线中微子实验的反常。

20 世纪 90 年代美国的 LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector) 实验，利用静止衰变的加速器中微

中微子研究与进展

子束流，观测到反缪中微子到反电子中微子的转换，其转化概率为 $(0.264 \pm 0.067 \pm 0.045) \%$ 。LSND 实验的中微子能量范围是 $20 \sim 60 \text{ MeV}$ ，传播距离为 30 米左右。因此要使用中微子振荡来解释中微子转化的信号，需要的质量平方差大小为

$$\Delta m_{\text{LSND}}^2 \sim 0.5 \text{ eV}^2.$$

考虑太阳 (SOL) 与大气 (ATM) 中微子振荡给出的质量平方差分别是 10^{-5} 和 10^{-3} eV^2 ，三个质量平方差存在较强的等级关系：

$$\Delta m_{\text{SOL}}^2 \ll \Delta m_{\text{ATM}}^2 \ll \Delta m_{\text{LSND}}^2,$$

因此要解释太阳中微子、大气中微子以及 LSND 实验的振荡数据，至少需要 4 个中微子质量本征态来提供 3 个独立的质量平方差。所以至少存在一个超出标准模型的新中微子： eV 质量的中微子。又根据 Z 玻色子的衰变宽度限制，自然界只存在三种参与弱相互作用的中微子，所以这种新中微子为 eV 质量的惰性中微子。惰性中微子和三个标准模型中微子有较大的质量差距，如图 1 所示。

由于 LSND 实验中微子振荡的解释来自于更大的质量平方差，因此需要在比标准中微子振荡更短的基线长度或更高的中微子能量条件下才能观测到信号，这种中微子振荡模式常被称为短基线中微子实验 (SBL)。图 2 以反应堆中微子为例说明这种振荡模式与标准情况的比较。图 2 中 10^3 m 附近的数据点是对 θ_{13} 测量的实验结果； 10^2 m 甚至更短基线的数据点是短基线中微子的测量，三条曲线分别代表不同质量平方差的振荡曲线。

为检验 LSND 的振荡信号正确与否，美国的费米实验室进行了另一个短基线的加速器中微子实验 MiniBooNE。其设计的基线为 541 米，相应的中微子能量为 $200 \text{ MeV} \sim 3 \text{ GeV}$ ，都比 LSND 实验高出一个量级，但保持相

同的基线能量比值 (L/E)，从而可以检验 LSND 的信号是否来自中微子振荡。从 2007 年开始，MiniBooNE 陆续给出中微子振荡的测量结果，未能对 LSND 给出决定性的结论。其 475 MeV 以上的能量范围未观测到中微子超出的信号，但由于误差较大，只排除 LSND 实验的部分参数允许区间。另一方面，MiniBooNE 在小于 475 MeV 的能量范围发现出人意料的超出事例。因为这些事例和 LSND 的信号处于不同的 L/E 范围，所以无法使用同一振荡机制来描述。进一步分析其他类型中微子振荡数据发现 MiniBooNE 低能超出的事例根本无法用振荡来解释，其参数空间已经被排除。一种可能的解释是由于探测器无法有效区分低能的电子和光子信号，从而把一些本底事例误判当成了中微子信号。但是这种猜测还需要进一步的实验验证，费米实验室已经运行的 MicroBooNE 就以这方面的研究为首要目标，期望不久的将来能对这一问题给

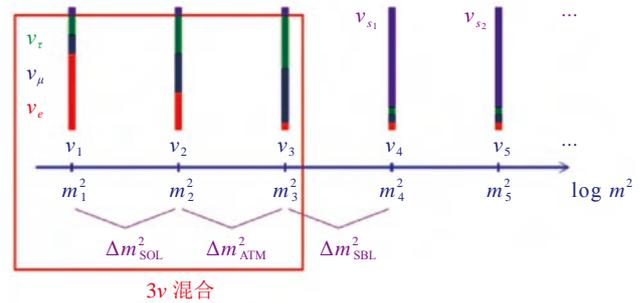


图 1 包含标准和惰性中微子的中微子质量与混合框架。方框内为三味中微子图像

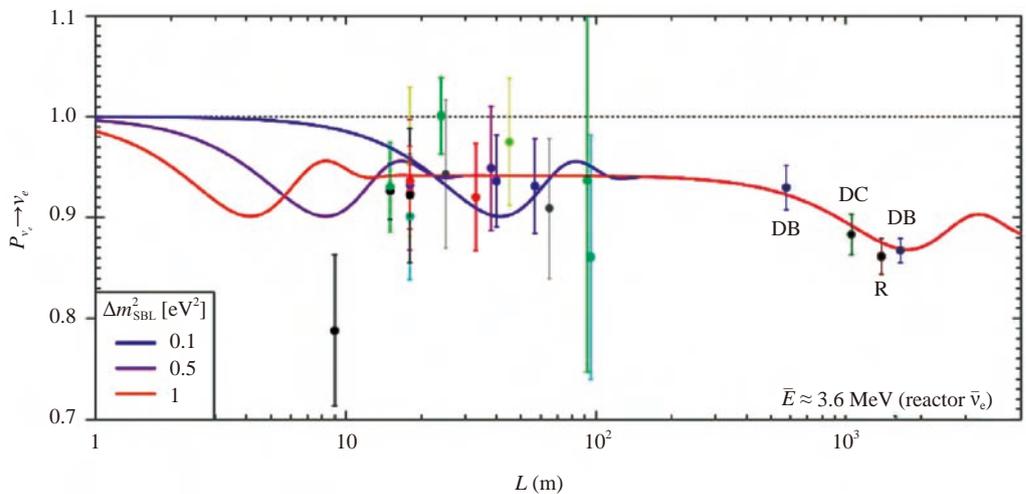


图 2 反应堆中微子的短基线中微子振荡图像

出确定的答案。

除了短基线 LSND 和 MiniBooNE 实验对惰性中微子的存在与否展开探索。最新的反应堆中微子反常以及镓 (Gallium) 放射性源实验的反常也可以用 eV 质量的惰性中微子来解释。

2011 年, 米勒 (Th. A. Mueller) 等人重新计算了反应堆发射中微子的理论预期, 发现中微子束流比之前反应堆中微子模型的计算超出 3%。考虑中微子反应截面后, 预测可探测的反应堆中微子事例数增加 6% ~ 7%。所以早前短基线反应堆中微子实验的数据就会有 6% ~ 7% 的消失, 这称为“反应堆中微子反常”。

太阳中微子实验 GALLEX 和 SAGE 都使用镓元素作为探测中微子的靶粒子。两个实验都用电子俘获衰变的放射性中微子源来测试中微子探测器的性能。考虑放射源的活度、中微子的产率以及中微子探测截面及其误差后, 两个实验发现观测到的中微子数目总是少于理论的预测值。四次放射源测量的平均值是 0.84 ± 0.05 , 这称为“镓放射性源实验的反常”。

反应堆中微子和放射性源中微子消失的反常现象都可以用 eV 质量的惰性中微子来解释。电子型中微子 / 反中微子在从产生到探测之间的较短距离内发生了振荡效应, 所以只能探测电子型中微子 / 反中微子的探测器就会发现中微子的消失现象。

情况似乎很美好, 我们在标准三味中微子振荡框架之外发现新物理存在的迹象, 并且几个反常的实验信号都指向 eV 质量的惰性中微子。但是现实情况在综合所有短基线中微子实验数据以及其他实验限制的全局拟合分析后变得很让人费解。

分析表明所有消失实验的结果和产生实验的信号 (LSND 和 MiniBooNE) 之间存在明显的矛盾之处。甚至包含多个 eV 质量的惰性中微子的模型也不能很好的描述所有的实验数据。矛盾的焦点来自两个方面。首先, 前面提到的 MiniBooNE 实验的低能事例需要更轻的惰性中微子以及更大的相互作用强度, 这已经被其他实验数据所排除。其次, 短基线缪中微子的消失实验并没有观测到任何振荡的信号, 这与 LSND 以及反应堆和镓放射性源中微子反常的结果相矛盾。排除 MiniBooNE 的低能事例的最新拟合结果如图 3 所示,

紫线代表电子中微子消失实验限制, 绿线代表缪中微子消失实验限制, 红线和绿线分别是消失实验和产生实验的拟合结果。阴影是全局拟合的结果。

这个参数的允许区间也是下一代短基线中微子实验要检验的范围。为了检验 eV 质量的惰性中微子的存在性, 未来将有不同类型的短基线中微子实验运行。包括放射源中微子实验 CeSOX (Italy), 短基线的反应堆中微子实验 PROSPECT (USA)、STEREO (France)、SoLid (Belgium)、DANSS (Russia)、NEOS (Korea), 以及短基线加速器中微子实验 SBN (FNAL, USA) 和 nuPRISM (J-PARC, Japan)。此外贝塔衰变的 KATRIN 实验也可以检验 eV 质量的惰性中微子的参数空间。所以未来几年将会对是否存在 eV 质量的惰性中微子给出确定的结论。

二、keV 质量惰性中微子

天文和宇宙学的观测表明宇宙中除了普通的重子物质以外, 还存在大量不发光的暗物质, 以及更加神秘的暗能量。它们占宇宙能量密度的比例分别是重子物质 (5%)、暗物质 (26%)、暗能量 (69%)。暗物质粒子作为超出粒子标准模型的新物理, 对宇宙演化、大尺度结构形成等问题都有重要意义。

前面提到的标准中微子也是暗物质, 但是它们只构成热暗物质成分, 占宇宙能量密度的 0.1%, 前面提

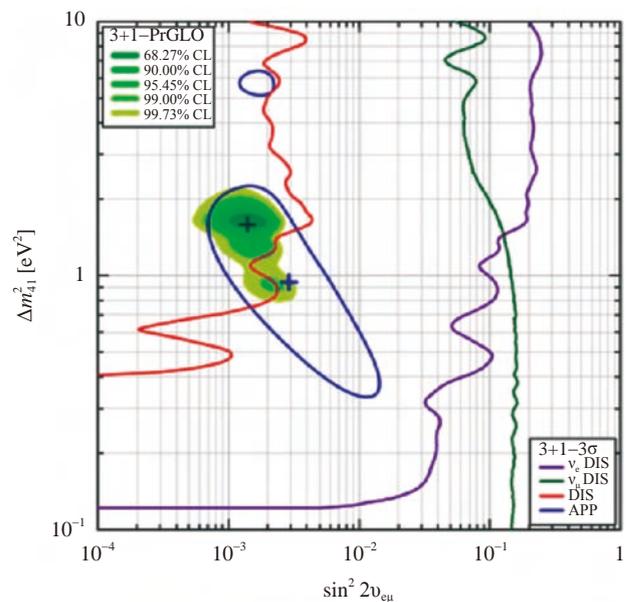


图 3 短基线中微子实验全局拟合

到的占宇宙四分之一成分的是冷暗物质或温暗物质。主流的候选者是构成冷暗物质的超对称模型的大质量弱相互作用粒子 (WIMP)。但研究表明冷暗物质在小尺度结构的观测和数值模拟方面存在一些缺点。温暗物质与冷暗物质相比, 在各个尺度都可以满足观测和数值模拟的要求, 因此受到很多科学家的钟爱。温暗物质方面最流行的候选者就是 keV 质量的惰性中微子。

首先我们介绍 keV 惰性中微子在宇宙早期的产生机制, 主要包括标准与惰性中微子间的共振和非共振转化机制, 以及标量粒子的衰变产生机制等方面。非共振的转化机制的物质效应被压低, 需要足够大的真空混合才能产生合适的暗物质丰度, 因此参数空间受到实验和观测最严格的限制; 而共振转化机制假设宇宙早期存在较大的中微子反中微子不对称, 带来普通与惰性中微子间的共振转化, 较小的真空混合也能产生足够的暗物质丰度。对于衰变产生的 keV 惰性中微子, 其产生丰度主要依赖与标量粒子的相互作用强度, 跟混合参数没有直接关系。最近的观测表明非共振产生机制所需的参数空间已经很难满足观测和实验的限制, 而后两种产生机制还可以满足所有限制, 是 keV 惰性中微子形成温暗物质的可能机制。

keV 惰性中微子是一种衰变的暗物质候选, 需要考察其在宇宙年龄的时间尺度是否稳定。keV 惰性中微子衰变到三个普通中微子是其占主导的衰变模式, 相应的寿命可写为

$$\tau \approx 2.88 \times 10^{27} \left(\frac{M_s}{1 \text{ keV}} \right)^{-5} \left(\frac{\theta^2}{10^{-8}} \right)^{-1} \text{ sec}.$$

其中 M_s 和 θ 分别是惰性中微子的质量以及其与普通中微子的混合角。从中我们可以看到 keV 惰性中微子的寿命远远大于宇宙的年龄 ($\sim 10^{17}$ sec)。另一个更有趣的衰变模式是 keV 惰性中微子衰变到一个普通中微子和一个光子。这个衰变倒比三中微子衰变慢 128 倍, 但其产生的单能光子可作为寻找此中微子存在的主要工具。由于普通中微子的质量非常轻, 此光子的能量正好是惰性中微子质量的 1/2。因此, 天文学可使用 X

射线望远镜在暗物质可能的密集区域寻找 keV 能量的 X 射线单能谱线。最近关于 3.55 keV 区域 X 射线的观测结果引起了科学家的普遍关注。

2014 年初, 两个独立的研究组分别在多个星系团的观测中发现无法标记的单能谱线, 其能量都位于 3.55 keV 处。虽然学术界对这条谱线的来源还没有形成定论, 有些人把它归结到无法标定的 K 元素特征谱线, 有些人认为还无法排除仪器本底的可能性, 但是如果最终确认, 将是 keV 惰性中微子温暗物质存在的有力证据。图 4 蓝色的点给出了能解释此单能谱线的惰性中微子参数空间, 其中质量是 7.1 keV, 与标准中微子的混合角 θ 在 10^{-5} 量级, 红色和绿色阴影区域是两种 X 射线观测的限制, 两侧灰色阴影之间是满足 100% 暗物质丰度的允许参数空间。

除 X 射线天文观测外, 还有其他检验 keV 惰性中微子存在的方法。首先, 通过观察贝塔衰变能谱的可能畸变, 我们可以检验是否存在惰性中微子和贝塔衰变的电子中微子混合, 同时亦能检验其参数空间是否和构成暗物质的要求相一致。即将运行的 KATRIN 实验能够分辨这种可能的畸变, 并对 5 ~ 10 keV 质量附近的惰性中微子给出限制, 其混合角的分辨率在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 左右, 从而有机会检验 X 射线测量的结果。其次, 如果宇宙的暗物质确实由 keV 惰性中微子组成, 还有一种直接探测地球周围暗物质粒子的方法, 就是利用贝塔衰变的原子核去直接俘获现在温度只有 1.9K 的暗物质粒子。keV 惰性中微子的俘获在衰变能谱的特征信号是位于 Q_β 值之外 M_s

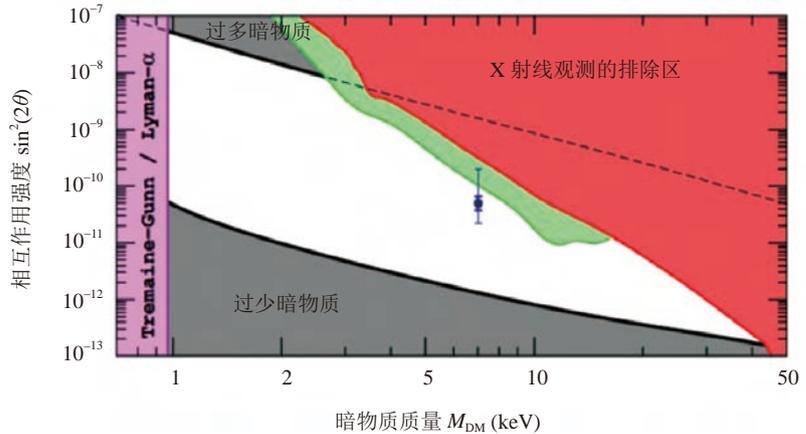


图 4 满足 3.55 keV 单能谱线观测的惰性中微子参数范围以及相应的限制条件

中微子质量的起源

周 顺

(中国科学院高能物理研究所 100049)

日本东京大学的梶田隆章 (T. Kajita) 教授与加拿大女王大学的麦克唐纳 (A. McDonald) 教授分享了 2015 年的诺贝尔物理学奖, 因为他们分别领导超级神冈实验和萨德伯里中微子观测站实验并发现了大气和太阳中微子振荡现象, 该现象证明中微子具有静止质量。这一重大发现同时也表明粒子物理学标准模型并不完整, 我们需要超出标准模型的新物理来解释中微子质量起源和轻子味混合。本文的主要目的是总结我们目前对中微子质量的认识, 指出中微子物理学中仍未解决的重大基本问题, 强调中微子质量对粒子物理学和宇宙学研究的重要性。

一、绪论

我们已经知道自然界存在三种不同类型的中微子, 即电子中微子 ν_e , 缪中微子 ν_μ , 陶中微子 ν_τ , 分别对应与它们一起参与带电流弱相互作用的带电轻子, 即电子 e , 缪轻子 μ , 陶轻子 τ 。中微子振荡实验发现一种类型的中微子传播一段距离后会转变成另外一种类型。对这种现象最简单和最令人信服的解释就是三种中微子具有不同的静止质量且存在轻子味混合。更准确地讲, 有质量的中微子具有三种质量本征

态 ν_1 , ν_2 和 ν_3 , 它们的质量分别为 m_1 , m_2 和 m_3 。如果存在轻子味混合, 那么中微子的质量本征态与弱相互作用本征态 ν_e , ν_μ 和 ν_τ 就不相同, 后者是前者以不同的方式进行线性叠加后产生的量子态。当某种类型的中微子在弱相互作用中产生, 这种相互作用本征态是三种质量本征态的相干叠加。中微子产生之后, 将以质量本征态的形式传播, 经过一段距离, 质量本征态之间产生一定量子相位差。当中微子到达探测器时, 质量本征态的叠加方式与产生时的不一样, 所以初始的中微子相互作用本征态存在一定的概率转变成另一种相互作用本征态。中微子振荡实验就是通过测量这种转变概率来确定中微子的质量差别和轻子味混合的大小。因此, 中微子振荡就是有非简并质量的中微子呈现出的一种宏观量子相干现象。

过去的二十多年里, 我们不仅发现了太阳和大气中微子振荡现象, 而且还利用反应堆和加速器产生的中微子束流进一步验证了该现象的存在。在这些实验中, 虽然中微子源、中微子能量、传播距离和中微子探测方法都不相同, 但实验观测结果却都可以用中微子振荡来解释。所以, 我们有确凿无疑的证据显示中

位置的单能电子。信号幅度主要依赖于与标准中微子的混合角 θ , 以及地球附近的暗物质密度。通过计算发现使用 10 kg 的氙原子核可以获得每年大于 1 的俘获事例数。从这个角度来说此方法还有很长的路要走。

三、结论与展望

中微子振荡效应的确立表明中微子具有非零的质量, 这构成了唯一有确凿实验证据的超出标准模型的新物理。为解释中微子质量产生机制而引入的跷跷板机制大部分都包含标准模型单态的惰性中微

子自由度。根据惰性中微子的质量及其相互作用强度来区分, 可分为大统一能标的惰性中微子、TeV 惰性中微子、keV 惰性中微子以及 eV 惰性中微子等。本文以后两种轻惰性中微子为例, 介绍了他们在调制中微子振荡、构成宇宙的温暗物质候选方面的作用。为检验这两种自由度是否存在, 未来的短基线中微子实验能够对 eV 质量的惰性中微子给出回答, 而 X 射线天文观测、贝塔衰变实验可以探测 keV 惰性中微子的存在性。希望在不久的将来中微子物理在这些方面能有所突破。