



利用宇宙学和粒子物理实验数据限制中微子质量

史旭晨*, 夏俊卿*

北京师范大学天文系, 北京100875

*联系人, 史旭晨, E-mail: 202021160021@mail.bnu.edu.cn; 夏俊卿, E-mail: xiajq@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-02-22; 接受日期: 2022-03-30; 网络出版日期: 2022-07-19

国家自然科学基金(编号: 11690023)资助项目

摘要 本文利用目前最新的宇宙微波背景(CMB)温度、极化、透镜的测量, Ia型超新星(SN Ia)的光度距离和重子声学振荡(BAO)尺度相关测量的宇宙学数据, 以及NuFit5.1的中微子振荡实验全球拟合的实验室结果, 对中微子质量进行了研究. 首先, 在考虑中微子质量为常数的情况下, 针对中微子质量顺序为正序(NH)和反序(IH)两种情况, 分别得到对于中微子质量的限制结果为: $\Sigma m_\nu < 0.133$ eV和 $\Sigma m_\nu < 0.160$ eV (95%置信区间). 进而得到相应的最轻的一个中微子质量的95%置信区间为: $m_{\nu_0} < 0.035$ eV (NH)和 $m_{\nu_0} < 0.046$ eV (IH), 这是目前对于最轻中微子质量最严格的限制之一. 最后, 考虑可以随宇宙学红移演化的中微子质量模型, 在将整个红移分为三段后, 得到的结果显示目前观测数据的精度并不足以检验中微子质量随红移变化的模型, 还需要后续更高精度的宇宙学实验观测.

关键词 中微子质量, 中微子振荡, 宇宙学观测

PACS: 14.60.Pq, 95.85.Ry, 98.80.-k, 98.80.Es

1 引言

在粒子物理标准模型中, 中微子仅具有左手性, 所以不能像其他轻子一样, 通过希格斯机制来产生质量项. 反应堆实验、加速器实验、太阳实验、大气实验观测到的中微子振荡行为表明, 在中微子的三个质量本征态中至少有两个是有质量的, 所以中微子质量的存在要求有超越粒子物理标准模型的新机制. 然而现在还没有可以单独测量单个中微子质量的方法和探针, 最方便的方法是通过最轻的质量 m_{ν_0} ^[1-3]和中微子质量本征态的平方差将三个中微

子质量进行参数化, 其中中微子振荡实验可以测量出两个中微子质量本征态之间的平方差, 如太阳实验可给出 Δm_{21}^2 而大气实验可给出 $|\Delta m_{31}^2|$, 因为 $|\Delta m_{31}^2|$ 的符号不能确定, 所以这里有两种质量顺序的可能, 正序(Normal Hierarchy, NH)和反序(Inverted Hierarchy, IH), 在正序的情况下 $m_1 < m_2 \leq m_3$, 在反序的情况下 $m_3 \leq m_1 < m_2$. 以最轻的质量 m_{ν_0} 进行参数化, 即对于正序(反序) $m_{\nu_0} \equiv m_1(m_3)$, 中微子物理质量分别为^[4]
NH: $(m_1^2, m_2^2, m_3^2) = m_{\nu_0}^2 + (0, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{3\ell}^2)$,
IH: $(m_3^2, m_1^2, m_2^2) = m_{\nu_0}^2 + (0, |\Delta m_{3\ell}^2| - \Delta m_{21}^2, |\Delta m_{3\ell}^2|)$,
这里1, 2, 3代表 ν_e, ν_μ, ν_τ 在质量本征态的最大分量.

引用格式: 史旭晨, 夏俊卿. 利用宇宙学和粒子物理实验数据限制中微子质量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 289511
Shi X-C, Xia J-Q. Constraints on the neutrino masses from particle physics experiments and cosmological observations (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 289511, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0079

$\Delta m_{3\ell}^2$ 代表中微子最轻的质量和最重的质量之间的质量平方差, 其中 $\ell = 1$ 代表正序, $\ell = 2$ 代表反序. 所以对于正序的情况, 三代中微子质量总和为 [3,5]

$$\begin{aligned}\Sigma m_\nu &\equiv \sum_{i=1}^3 m_i \\ &= m_{\nu_0} + \sqrt{\Delta m_{21}^2 + m_{\nu_0}^2} + \sqrt{\Delta m_{31}^2 + m_{\nu_0}^2}.\end{aligned}\quad (1)$$

相应地, 对于反序的情况, 三代中微子的质量总和为

$$\begin{aligned}\Sigma m_\nu &\equiv \sum_{i=1}^3 m_i \\ &= m_{\nu_0} + \sqrt{|\Delta m_{31}^2| + m_{\nu_0}^2} + \sqrt{|\Delta m_{21}^2| + \Delta m_{31}^2 + m_{\nu_0}^2} \\ &= m_{\nu_0} + \sqrt{|\Delta m_{32}^2| + m_{\nu_0}^2} + \sqrt{|\Delta m_{21}^2| - \Delta m_{32}^2 + m_{\nu_0}^2}.\end{aligned}\quad (2)$$

从 NuFit5.1 [6] 得到目前最新的中微子质量平方差 $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$ 的值:

$$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2} = 7.42_{-0.20}^{+0.21} (1\sigma), \quad (3)$$

$$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2} = \begin{cases} +2.510_{-0.027}^{+0.027} (1\sigma), & \text{NH}, \\ -2.490_{-0.028}^{+0.026} (1\sigma), & \text{IH}, \end{cases} \quad (4)$$

其中, 当最轻的中微子质量本征态 $m_{\nu_0} = 0$ 时, 由公式(1)–(4)得到两种情况下中微子质量总和 Σm_ν 的下限, $\Sigma m_\nu^{\text{NH}} > 0.059 \text{ eV}$, $\Sigma m_\nu^{\text{IH}} > 0.099 \text{ eV}$.

虽然现在中微子振荡实验在统计上略微倾向于正序的中微子质量排序, 但是中微子振荡实验还不足以打破两种质量顺序之间的简并. 从宇宙学角度看, 中微子质量总和可以通过宇宙学实验数据来给出限制, 因为质量在 eV 量级的中微子占了当前宇宙中热暗物质的很大一部分, 它们在宇宙学观测中留下了清晰的遗迹. 暗能量的状态方程、宇宙的曲率、相对论自由度、宇宙的膨胀历史、宇宙结构的生长和宇宙微波背景辐射等宏观尺度的宇宙学现象都与中微子总质量存在一定的关联性, 如中微子总质量决定了中微子变得非相对论时的红移. 相对于中微子质量的直接测量, 宇宙学方法在限制中微子质量时需要基于一个宇宙学模型, 通常是 Λ CDM 模型. 由于不同数据集的使用, 以及剩余宇宙学模型的不同假设, 中微子质量限制会在一个范围内波动, 目前宇宙学限制的中微子质量正在慢慢接

近反序的最小质量下限, 故宇宙学数据有可能帮助我们更好地了解中微子质量的顺序.

2 宇宙学和粒子物理实验数据

本工作中用到的贝叶斯统计分析采用的是公开的爱因斯坦-玻尔兹曼代码 CAMB [7] 和与它对应的蒙特卡罗-马尔可夫链宇宙学程序包 CosmoMC [8], 可以从 <http://cosmologist.info/cosmomc/> 获得. 本工作中使用的中微子振荡实验室数据来自 NuFit5.1 [6], 它的最新拟合结果可以在网站 <http://www.nu-fit.org> 获得. 本文中使用了最新可获得的宇宙学观测数据, 介绍如下.

Planck 宇宙微波背景(CMB)温度和极化功率谱来自 Planck 的 2018 年最终版 `plikTTTEEE + lowl + lowE` [9,10]. 中微子质量的一些关键效应会影响 CMB 探针, 如中微子和哈勃常数之间有很强的简并 [11]. 而再电离的光深 τ 是和标量原初扰动的振幅 A_s 有简并的, 因为宇宙结构成团性的强度和 Σm_ν 有联系, 导致 τ 和 Σm_ν 之间也存在一定的简并, 因此 CMB 的极化测量对中微子质量有较强的限制 [12].

CMB lensing 物质的扰动通过引力透镜效应可以导致 CMB 光子极化平面的偏转 [13], 这将在 CMB 温度和极化的各向异性功率谱上留下痕迹, 并且产生一个 CMB 透镜的信号 $C_\ell^{\phi\phi}$. 通过宇宙微波背景(CMB)的数据分析获得宇宙微波背景透镜信号(CMB lensing)的功率谱重建数据 [14], 其红移范围在 $0 < z \leq 1100$.

SN Ia 采用目前最新的 Pantheon 样本 [15] 中的 1048 个 Ia 型超新星的数据点, 其红移范围是 $0.01 < z < 2.3$, 包含的数据来自 Pan-STARRS, SDSS, SNLS 和 HST. 从超新星爆炸测量得出的光度距离 $D_L(z)$ 对中微子性质不是非常敏感, 但是它可以被用来约束暗物质和暗能量参数 [16,17], 即暗物质能量密度 Ω_m , 暗能量密度 Ω_Λ , 和暗能量状态方程参数 ω , 显著地打破它们和中微子质量之间的简并性.

BAO 在 CMB 退耦之前, 重子和光子耦合在一起, 在再复合时期, CMB 光子和重子退耦, 于是重子-光子流的振荡被冻结在 CMB 的各向异性中. 除了对于 CMB 有影响, BAO 在宇宙的大尺度结构中的横向和视线方向也都留下了显著的结构 [18,19], 沿着视线方向, BAO 给出了红移独立测量的哈勃常数 $H(z)$, 垂直于视线方向, BAO 数据可以转换成测量角直径距离,

这时的角直径距离是宇宙膨胀速率 $H(z)$ 的积分. 因为BAO的尺度是已知的, 所以BAO可以被当作标准尺来推断 $H(z)r_s(z^*)$ 和 $D_A/r_s(z^*)$, 这里的 D_A 是角直径距离, $r_s(z^*)$ 是在退耦红移 z^* 的声学视界. 这些量都对物质的能量密度 $\Omega_m h^2$ 很敏感. BAO的测量可以限制大质量中微子对于物质能量密度的贡献, 其特征已经由星系团^[20–22]和低红移类星体^[23,24]等测得. 这里采用的BAO数据来自6DF^[25]和斯隆数字巡天计划(SDSS)第7次发布的主星系样本(MGS)^[26]和SDSS第12次发布(DR12)^[27]的重子振荡光谱巡天计划. 在分析中我们还添加了eBOSS DR14的样本对于宇宙学的限制, eBOSS^[28]的研究开始于2014年, 运营周期为5年, 这次光谱研究的目标为亮红星系(LRGs)、发射线星系(ELGs)和类星体(QSOs), 这些观测的宇宙学解释可在参考文献^[29]中找到, 其红移范围在 $0.106 < z < 2.35$ 之间.

不同的宇宙学数据侧重的红移有所不同, 根据文献^[10]中使用不同数据组合对于中微子质量的限制结果, 可以看出, 在宇宙学观测精度允许的范围内, 使用更多的实验数据会对中微子质量给出强的限制结果, 因此在本工作中我们选取尽可能多的不同红移处的观测数据, 来对中微子质量进行拟合. 当然由于不同的宇宙学观测中可能存在不同的系统误差, 而与观测相关的宇宙学模型参数之间也可能存在简并性, 因此使用过多的宇宙学观测数据也可能会导致限制结果反而不太好.

NuFit5.1 提供了在标准模型框架内和三个有质量中微子的基础上, 以及一些其他扩展的中微子振荡实验的最新拟合结果, 通过全球分析给出了轻子混合矩阵和中微子质量. 它使用的中微子振荡实验的数据涵盖了几乎全球所有类型的中微子振荡实验的数据, 其中包括太阳实验(Homestake chlorine^[30], Gallex/GNO^[31], SAGE^[32], SNO^[33], Super-Kamiokande^[34–37], Borexino^[38–40]、大气实验(IceCube/DeepCore^[41], Super-Kamiokande^[42]、反应堆实验(KamLAND^[43,44], DoubleChooz^[45], Daya Bay^[46], Reno^[47])以及加速器实验(MINOS^[48,49], T2K^[50], NOvA^[51])等, 其拟合结果使用的数据分为不包含超级神冈合作(Super-Kamiokande Collaboration)和包括超级神冈合作两大类, 考虑到超级神冈是目前世界上最大的地下中微子探测器, 本工作中使用的数据为包括超级神冈合作的数据.

另外一些中微子振荡参数(如混合角 θ_{ij} 和CP相位 δ_{CP})与本文的研究无直接关联, 这里不再将它们考虑进来.

3 计算结果与分析

3.1 常数的中微子质量

首先考虑中微子质量为常数的情况. 在最小的 Λ CDM模型的6个参数(Ω_b , Ω_{cdm} , $\ln 10^{10} A_s$, n_s , h , τ_{reio}): 冷暗物质密度 $\Omega_{cdm} h^2$ 、重子密度 $\Omega_b h^2$ 、标量光谱指数 n_s 、原初扰动振幅 A_s , 在电离光深 τ_{reio} 框架内(先验分布见表1), 使用各类宇宙学实验结果和来自NuFit5.1的最新实验室全球拟合数据对中微子质量参数进行拟合.

在NuFit5.1的拟合结果中, $\Delta m_{3\ell}^2$ 为三代中微子的质量本征态中最大质量与最小质量之间的差值, 即当正序时 $\ell = 1$, 而当反序时 $\ell = 2$. 考虑到本工作使用CosmoMC程序中理论计算部分CAMB仅支持 $|\Delta m_{31}^2|$, 所以对于质量模型为反序的情况, 我们通过NuFit5.1给出的 Δm_{21}^2 和 Δm_{32}^2 的实验结果, 反推得到在反序时 Δm_{31}^2 的中心值: $\Delta m_{31}^2 = -2.416 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$. 结合公式(3)和(4)的结果, 可以得到当取最新实验室全球拟合数据的中心值时, 采用正序和反序两种方式来拟合中微子质量总和, 得到的95%置信区间的限制结果分别是

$$\Sigma m_\nu < 0.133 \text{ eV (NH)}, \Sigma m_\nu < 0.160 \text{ eV (IH)}. \quad (5)$$

表1 宇宙学模型参数选取的先验分布

Table 1 Flat priors of cosmological parameters selected in this work

参数	先验
$\Omega_b h^2$	[0.005, 0.1]
$\Omega_c h^2$	[0.001, 0.99]
$100\theta_{MC}$	[0.5, 10]
τ	[0.01, 0.8]
$\ln(10^{10} A_s)$	[1.61, 3.91]
n_s	[0.8, 1.2]
ω	[-1.5, 1]
N_{eff}	[0.05, 10]
ξ_1	[0.05, 5]
ξ_2	[0.05, 5]

这一结果和目前文献[4]中的其他工作结果类似, 该文中的宇宙学数据相较于本文, 增加了大爆炸核合成(BBN)的数据, BBN的数据有助于限制 N_{eff} , 然而文献[5]已经证明增加BBN的数据对于中微子质量参数的限制结果没有显著的影响, 另外文献[5]中使用的实验室数据是旧版的Nufit4.1.

在此结果的基础上, 可以通过公式(1)和(2)反解出正序与反序时的三个中微子质量分别为多少. 正序时最轻的中微子质量的95%置信区间上限为

$$m_{\nu_0}(m_1) < 0.035 \text{ eV}, \quad (6)$$

相应地, 其余两个中微子质量95%置信区间上限为: $m_2 < 0.036 \text{ eV}$, $m_3 < 0.061 \text{ eV}$. 同样地, 对于反序的情况, 三个中微子质量95%置信区间的上限分别为: $m_{\nu_0}(m_3) < 0.046 \text{ eV}$, $m_1 < 0.067 \text{ eV}$, $m_2 < 0.068 \text{ eV}$. 其中我们对于最轻中微子质量 m_{ν_0} 的限制结果, 相较于同类型文献[4]给出的95%置信区间上限结果 $m_{\nu_0} < 0.037 \text{ eV}$ (NH), $m_{\nu_0} < 0.042 \text{ eV}$ (IH)是基本相同的, 而对比文献[5]给出的正序和反序两种质量模型所得到的结果 $m_{\nu_0} < 0.086 \text{ eV}$, 我们的计算结果有了显著的提升, 文献[5]相较于本文假设了更多不同质量模型对于中微子质量的影响, 如考虑大质量中微子的个数 N_ν , 结果显示, 中微子模型的选择会略微影响中微子质量总和的上限. 此外, 在实验室数据选择上, 该文没有使用最新的Nufit5.1的数据.

在CAMB程序的计算过程中, 两个中微子质量平方差 Δm_{21}^2 和 Δm_{31}^2 的取值固定在实验室数据给出的最佳中心值, 但是实际上实验室数据给的结果(公式(3)和(4))同样存在一定的误差. 为了简单分析一下该误差是否会对中微子质量限制产生明显影响, 我们简单选取 Δm_{21}^2 和 Δm_{31}^2 限制结果的 3σ 范围内的最小值与最大值分别进行分析. 其中 Δm_{21}^2 的 3σ 范围内的最小值与最大值分别为: $\Delta m_{21}^2 = 6.82 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\Delta m_{21}^2 = 8.04 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, 而在正序时 Δm_{31}^2 的 3σ 范围内的最小值与最大值分别为: $\Delta m_{31}^2 = 2.430 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\Delta m_{31}^2 = 2.593 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$. 对于反序时 Δm_{31}^2 的取值, 采用之前反推法可得其 3σ 范围内的最小值和最大值分别为 $\Delta m_{31}^2 = -2.506 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\Delta m_{31}^2 = -2.329 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$. 因此, 将这些 3σ 最大值和最小值分别放入CAMB中, 利用宇宙学实验数据限制中微子总质量, 得到的结果显示, 不管是正序还是反序, 最终给出的三代中微子总

质量的95%置信区间上限的变化是很小的, 如图1所示, 这说明目前中微子振荡实验的测量误差精度远远高于宇宙学实验的观测数据.

Λ CDM模型认为组成我们当前宇宙的大部分能量密度是负压, 即暗能量, 满足 $P_\Lambda = -\rho_\Lambda$. 而可以用更一般的方程 $P_\Lambda = \omega \rho_\Lambda$ 来扩展 Λ CDM模型, 这类模型已经被广泛地研究过了, 考虑到在宇宙演化的起初阶段, 中微子是相对论粒子, 并且作为早期宇宙中的辐射成分, 随着不断膨胀的宇宙导致宇宙温度随着时间的演化在不断降低, 以至于中微子的动能最后低于中微子的质量, 最后中微子经历退耦过程变成了非相对论粒子. 所以, 当中微子密度 Ω_ν 变大, 为了产生相同的功率谱, 物质的能量密度也必须相应地变大^[52], 这导致了暗能量和中微子质量的简并, 所以我们增加参数空间中的参数, 将暗能量状态方程中的 ω 和有效中微子相对论自由度数量 N_{eff} 作为自由参数进行整体拟合. 利用宇宙学观测和实验室数据, 我们得到三代中微子总质量95%的置信区间上限的结果分别为

$$\Sigma m_\nu < 0.159 \text{ eV (NH)}, \Sigma m_\nu < 0.187 \text{ eV (IH)}. \quad (7)$$

对比 $\omega = -1$ 的情况, 中微子总质量的上限有明显的增加, 如图2所示, 这就是暗能量和中微子总质量之间的

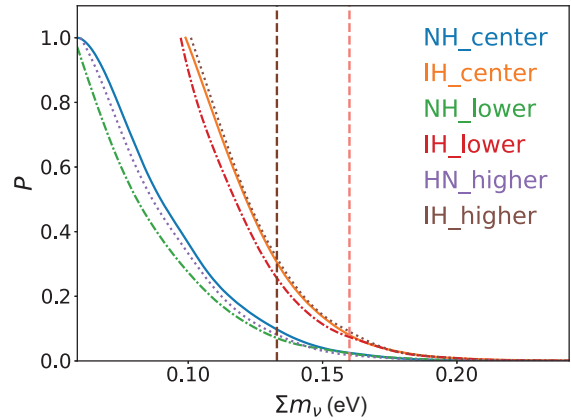


图1 正序和反序质量模型在实验室数据取中心值与 3σ 置信区间最大值和最小值时给出三代中微子总质量的一维分布结果图, 标签中的_center代表中心值, _lower表示最小值, _higher表示最大值, 两条竖直的虚线代表中心值的95%质量限

Figure 1 One-dimensional distributions of total neutrino masses from the different datasets in normal and inverted hierarchy models. _center in the label represents the center value, _lower represents the minimum value and _higher represents the maximum value. Two vertical dashed lines represent the center value of 95% masses limit.

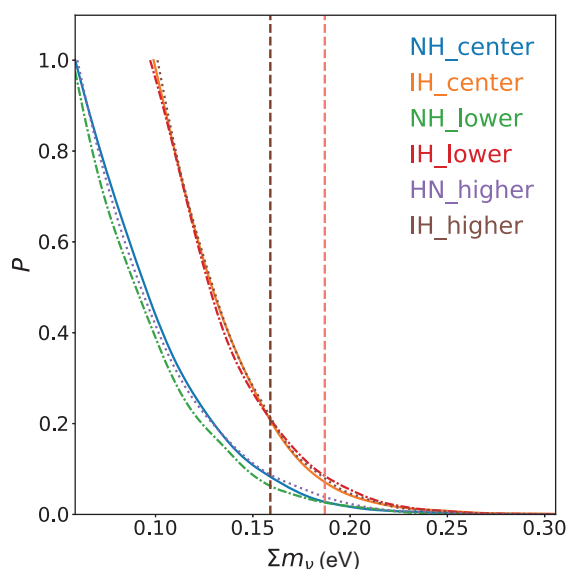


图 2 考虑暗能量状态方程非常数的情况下, 正序和反序质量模型在实验室数据取中心值与 3σ 置信区间最大值和最小值时给出三代中微子总质量的一维分布结果图, 标签中的_center代表中心值, _lower表示最小值, _higher表示最大值, 两条竖直的虚线代表中心值的95%质量限

Figure 2 One-dimensional distributions of total neutrino masses from the different datasets in normal and inverted hierarchy models, when including the constant equation of state of dark energy. _center in the label represents the center value, _lower represents the minimum value and _higher represents the maximum value. Two vertical dashed lines represent the center value of 95% masses limit.

简并性带来的影响. 在考虑不同实验室数据的变化时, 引入常数状态方程的暗能量导致中微子质量的限制变弱, 使得实验室数据的变化对于中微子质量限制结果的影响相对更小.

3.2 随红移变化的中微子质量

在宇宙演化的起初阶段, 中微子是相对论粒子, 并且作为早期宇宙中的辐射成分, 但是宇宙的不断膨胀导致宇宙温度随着时间不断降低, 以至于中微子的动能最后低于中微子的质量, 中微子经历退耦过程变成了非相对论粒子. 这个红移的转换节点与中微子质量成反比: 小质量中微子变得非相对论时的转换红移比大质量中微子的时间晚. 因此在不同的宇宙阶段, 中微子质量可以影响宇宙学观测, 反过来我们可以探究在不同红移处的中微子质量. 接下来, 考虑中微子质量随宇宙学红移变化的情况. 我们将中微子总质量参数化为一个阶梯函数, 即假设在每一红移区间, 中微子总质

量是一个常数, 然后根据宇宙中物质组分在演化过程中特殊的转换节点和提供数据来源的这些探针侧重的红移区间考量, 使用三个红移区间将中微子质量参数化, 形式如下:

$$\Sigma m_\nu(z) = \begin{cases} \Sigma m_{\nu,0}, & (0.01 < z \leq z_1), \\ \Sigma m_{\nu,1} = \xi_1 \times \Sigma m_{\nu,0}, & (z_1 < z \leq z_2), \\ \Sigma m_{\nu,2} = \xi_2 \times \Sigma m_{\nu,0}, & (z_2 < z \leq z_3), \end{cases} \quad (8)$$

这里我们选择 $z_1 = 0.5$, $z_2 = 3$, $z_3 = 1100$: 第一个低红移区间的选择是由于此时处于暗能量占主导的时期, 第二个红移区间考虑到使用的BAO的数据覆盖整个区间, 最后一个区间包含着CMB等高红移时期的宇宙学信息. 为此我们引入两个额外的自由参数 ξ_1 , ξ_2 , 假设在三个红移区间内, 中微子质量的比例为 $1 : \xi_1 : \xi_2$, 这两个参数的平坦均匀先验分布范围是 $\xi_1 \in [0.05, 5]$, $\xi_2 \in [0.05, 5]$.

利用目前的宇宙学观测和粒子物理实验室数据, 我们可以得到在正序时, 三个红移区间内中微子总质量的95%置信区间上限为: $\Sigma m_{\nu,0} < 0.173$ eV, $\Sigma m_{\nu,1} < 0.439$ eV, $\Sigma m_{\nu,2} < 0.130$ eV, 而反序时的结果为: $\Sigma m_{\nu,0} < 0.220$ eV, $\Sigma m_{\nu,1} < 0.550$ eV, $\Sigma m_{\nu,2} < 0.146$ eV, 如图3所示. 在第一个和第三个红移区间, 由于超新星数据和高红移CMB和CMB透镜数据的限制, 对于中微子总质量的限制依然比较严格, 而在第二个红移区间, 主要是BAO的数据, 其限制能力可能相对较弱, 导致在第二个红移区间里, 中微子总质量的限制略微宽松一点. 但是由于目前三个红移区间的中微子质量的限制都没有下限, 都是和最小中微子质量是自洽的, 因此无法说明中微子质量一定会存在随红移变化的情况, 即目前的宇宙学实验数据, 由于精度的限制并不足以检验中微子质量随红移变化的模型, 还需要后续更高精度的宇宙学实验观测.

4 结论与展望

在本文中我们利用最新的宇宙学数据: Planck CMB卫星的CMB温度、极化、透镜, SDSS-III和SDSS-IV星系团研究的BAO和Pantheon的Ia型超新和来自Nufit5.1的中微子振荡实验的全球拟合数据对中微子质量进行限制, 得到如下结论.

(1) 基于最简单的6个参数 Λ CDM模型, 正序和反

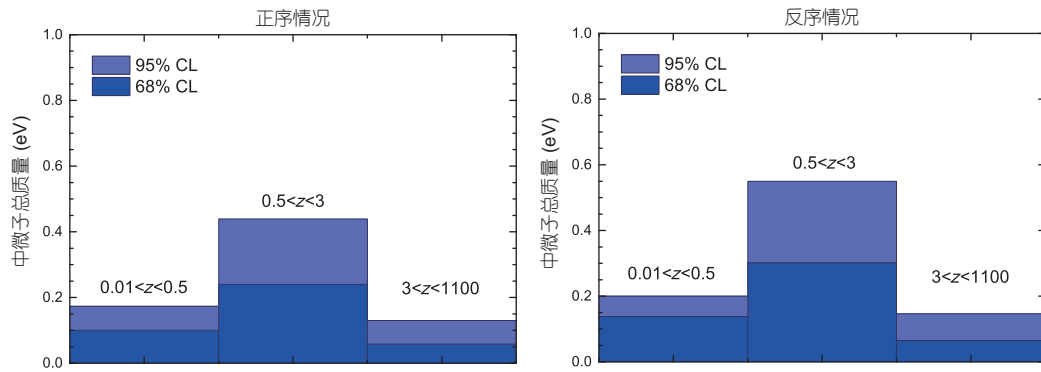


图3 在正序和反序情况下, 根据宇宙学数据和实验室观测所得到的中微子总质量在不同红移区间里的限制情况

Figure 3 Constraints on the evolution of total neutrino masses as a function of redshift from cosmological and particle physics experiments in the normal and inverted hierarchy models.

序时中微子总质量95%置信区间上限分别为: $\Sigma m_\nu < 0.133 \text{ eV}$ 和 $\Sigma m_\nu < 0.160 \text{ eV}$, 这一结果和其他研究工作一致.

(2) 根据公式(2)可得, 最轻一代中微子质量的95%置信区间上限为: $m_{\nu_0}(m_1) < 0.035 \text{ eV}$ (NH) 和 $m_{\nu_0}(m_3) < 0.046 \text{ eV}$ (IH), 这是目前对于最轻中微子质量的最强限制之一.

(3) 考虑到中微子质量与暗能量的简并性, 引入常

数的暗能量状态方程后, 三代中微子总质量的95%置信区间上限扩大为: $\Sigma m_\nu < 0.159 \text{ eV}$ (NH) 和 $\Sigma m_\nu < 0.187 \text{ eV}$ (IH).

(4) 最后我们考虑中微子质量随红移改变的模型, 将中微子质量演化分为三个红移区间, 限制结果显示目前的宇宙学实验数据由于精度的限制, 并不足以检验中微子质量随红移变化的模型, 还需要后续更高精度的宇宙学实验观测.

参考文献

- Heavens A F, Sellentin E. Objective Bayesian analysis of neutrino masses and hierarchy. *J Cosmol Astropart Phys*, 2018, 2018(4): 047
- Hamann J, Hannestad S, Wong Y Y Y. Measuring neutrino masses with a future galaxy survey. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 2012(11): 052
- Hannestad S, Schwetz T. Cosmology and the neutrino mass ordering. *J Cosmol Astropart Phys*, 2016, 2016(11): 035
- Stöcker P, Balázs C, Bloor S, et al. Strengthening the bound on the mass of the lightest neutrino with terrestrial and cosmological experiments. *Phys Rev D*, 2021, 103: 123508
- Loureiro A, Cuceu A, Abdalla F B, et al. Upper bound of neutrino masses from combined cosmological observations and particle physics experiments. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 081301
- Esteban I, Gonzalez-Garcia M C, Maltoni M, et al. The fate of hints: Updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations. *J High Energy Phys*, 2020, 2020(9): 178
- Lewis A, Challinor A, Lasenby A. Efficient computation of cosmic microwave background anisotropies in closed friedmann-robertson-walker models. *Astrophys J*, 2000, 538: 473–476
- Lewis A, Bridle S. Cosmological parameters from CMB and other data: A Monte Carlo approach. *Phys Rev D*, 2002, 66: 103511
- Aghanim N, Akrami Y, Ashdown M, et al. Planck 2018 results. *Astron Astrophys*, 2020, 641: A6
- Aghanim N, Akrami Y, Ashdown M, et al. Planck 2018 results. *Astron Astrophys*, 2020, 641: A5
- Archidiacono M, Brinckmann T, Lesgourgues J, et al. Physical effects involved in the measurements of neutrino masses with future cosmological data. *J Cosmol Astropart Phys*, 2017, 2017(2): 052
- Allison R, Caucal P, Calabrese E, et al. Towards a cosmological neutrino mass detection. *Phys Rev D*, 2015, 92: 123535
- Lewis A, Challinor A. Weak gravitational lensing of the CMB. *Phys Rep*, 2006, 429: 1–65
- Aghanim N, Akrami Y, Ashdown M, et al. Planck 2018 results. *Astron Astrophys*, 2020, 641: A8
- Scolnic D M, Jones D O, Rest A, et al. The complete light-curve sample of spectroscopically confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and cosmological constraints from the combined pantheon sample. *Astrophys J*, 2018, 859: 101

- 16 Goobar A, Leibundgut B. Supernova cosmology: Legacy and future. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2011, 61: 251–279
- 17 Lorenz C S, Funcke L, Löffler M, et al. Reconstruction of the neutrino mass as a function of redshift. *Phys Rev D*, 2021, 104: 123518
- 18 Eisenstein D J, Zehavi I, Hogg D W, et al. Detection of the baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of SDSS luminous red galaxies. *Astrophys J*, 2005, 633: 560–574
- 19 Cole S, Percival W J, Peacock J A, et al. The 2dF galaxy redshift survey: Power-spectrum analysis of the final data set and cosmological implications. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 362: 505–534
- 20 de Carvalho E, Bernui A, Carvalho G C, et al. Angular baryon acoustic oscillation measure at $z=2.225$ from the SDSS quasar survey. *J Cosmol Astropart Phys*, 2018, 2018(4): 064
- 21 Metin A, Falk B, Julian B, et al. The clustering of the SDSS-IV extended baryon oscillation spectroscopic survey DR14 quasar sample: First measurement of baryon acoustic oscillations between redshift 0.8 and 2.2. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 473: 4773–4794
- 22 Hou J, Sánchez A G, Ross A J, et al. The completed SDSS-IV extended baryon oscillation spectroscopic survey: BAO and RSD measurements from anisotropic clustering analysis of the quasar sample in configuration space between redshift 0.8 and 2.2. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 500: 1201–1221
- 23 McDonald P, Eisenstein D J. Dark energy and curvature from a future baryonic acoustic oscillation survey using the Lyman- α forest. *Phys Rev D*, 2007, 76: 063009
- 24 Bautista J E, Busca N G, Guy J, et al. Measurement of baryon acoustic oscillation correlations at $z=2.3$ with SDSS DR12 Ly α -Forests. *Astron Astrophys*, 2017, 603: A12
- 25 Beutler F, Blake C, Colless M, et al. The 6dF galaxy survey: Baryon acoustic oscillations and the local Hubble constant. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 416: 3017–3032
- 26 Ross A J, Samushia L, Howlett C, et al. The clustering of the SDSS DR7 main Galaxy sample—I. A 4 per cent distance measure at $z = 0.15$. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 449: 835–847
- 27 Alam S, Ata M, Bailey S, et al. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III baryon oscillation spectroscopic survey: Cosmological analysis of the DR12 galaxy sample. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 470: 2617–2652
- 28 Dawson K S, Kneib J P, Percival W J, et al. The SDSS-IV extended baryon oscillation spectroscopic survey: Overview and early data. *Astron J*, 2016, 151: 44
- 29 Alam S, Aubert M, Avila S, et al. Completed SDSS-IV extended baryon oscillation spectroscopic survey: Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory. *Phys Rev D*, 2021, 103: 083533
- 30 Cleveland B T, Daily T, Davis Raymond J, et al. Measurement of the solar electron neutrino flux with the homestake chlorine detector. *Astrophys J*, 1998, 496: 505–526
- 31 Kaether F, Hampel W, Heusser G, et al. Reanalysis of the Gallex solar neutrino flux and source experiments. *Phys Lett B*, 2010, 685: 47–54
- 32 Abdurashitov J N, Gavrin V N, Gorbachev V V, et al. Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III. Results for the 2002–2007 data-taking period. *Phys Rev C*, 2009, 80: 015807
- 33 Aharmim B, Ahmed S N, Anthony A E, et al. Combined analysis of all three phases of solar neutrino data from the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys Rev C*, 2013, 88: 025501
- 34 Hosaka J, Ishihara K, Kameda J, et al. Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-I. *Phys Rev D*, 2006, 73: 112001
- 35 Cravens J P, Abe K, Iida T, et al. Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-II. *Phys Rev D*, 2008, 78: 032002
- 36 Motoyasu I. Superkamiokande (solar). In: Proceedings of the XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2018). Heidelberg, 2018
- 37 Abe K, Hayato Y, Iida T, et al. Solar neutrino results in Super-Kamiokande-III. *Phys Rev D*, 2011, 83: 052010
- 38 Bellini G, Benziger J, Bick D, et al. Precision measurement of the ^7Be solar neutrino interaction rate in borexino. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 141302
- 39 Bellini G, Benziger J, Bonetti S, et al. Measurement of the solar ^8B neutrino rate with a liquid scintillator target and 3 MeV energy threshold in the Borexino detector. *Phys Rev D*, 2010, 82: 033006
- 40 Borexino Collaboration. Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun. *Nature*, 2014, 512: 383–386
- 41 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Determining neutrino oscillation parameters from atmospheric muon neutrino disappearance with three years of IceCube DeepCore data. *Phys Rev D*, 2015, 91: 072004
- 42 Abe K, Bronner C, Haga Y, et al. Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV. *Phys Rev D*, 2018, 97: 072001
- 43 Gando A, Gando Y, Hanakago H, et al. Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND. *Phys Rev D*, 2013, 88: 033001

- 44 An F P, Balantekin A B, Band H R, et al. Improved measurement of the reactor antineutrino flux and spectrum at Daya Bay. *Chin Phys C*, 2017, 41: 013002
- 45 Bezerra T. New results from the double chooz experiment. In: *Proceedings of the XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics*. Chicago, 2020
- 46 Adey D, An F P, Balantekin A B, et al. Measurement of the electron antineutrino oscillation with 1958 days of operation at Daya Bay. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 241805
- 47 Bak G, Ju K, Kim W, et al. Measurement of reactor antineutrino oscillation amplitude and frequency at reno. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 201801
- 48 Adamson P, Anghel I, Backhouse C, et al. Measurement of neutrino and antineutrino oscillations using beam and atmospheric data in MINOS. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 251801
- 49 Adamson P, Anghel I, Backhouse C, et al. Electron neutrino and antineutrino appearance in the full MINOS data sample. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 171801
- 50 Dunne P. Latest Neutrino oscillation results from T2K. In: *Proceedings of the XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics*. Chicago, 2020
- 51 Acero M A, Adamson P, Aliaga L, et al. First measurement of neutrino oscillation parameters using neutrinos and antineutrinos by NOvA. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 151803
- 52 Hannestad S. Neutrino masses and the dark energy equation of state: Relaxing the cosmological neutrino mass bound. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 221301

Constraints on the neutrino masses from particle physics experiments and cosmological observations

SHI Xu-Chen* & XIA Jun-Qing*

Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Combining the cosmic microwave background temperature, polarization and lensing data with distance measurements from baryonic acoustic oscillations and type Ia supernovae, as well as the laboratory results of the global fitting of neutrino oscillation experiment in NuFit5.1, we investigate the constraints on the total neutrino masses in detail. First, considering the neutrino mass as constant, we obtain the tight constraints on the total neutrino masses in the normal hierarchy (NH) and inverted hierarchy (IH) cases: $\Sigma m_\nu < 0.133$ eV (NH) and $\Sigma m_\nu < 0.160$ eV (IH) (95% confidence level). Then we can determine the lightest neutrino mass straightforwardly: $m_{\nu_0} < 0.035$ eV (NH) and $m_{\nu_0} < 0.046$ eV (IH) at 95% confidence level. Notably, this is one of the tightest limits on the lightest neutrino mass. Finally, we consider a neutrino model demonstrating that its masses can evolve with the cosmological redshift. After dividing the entire redshift into three ranges, all constraints are consistent with zero, implying that the current cosmological data do not support the neutrino model with varying masses.

neutrino masses, neutrino oscillation, cosmological observation

PACS: 14.60.Pq, 95.85.Ry, 98.80.-k, 98.80.Es

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0079](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0079)