






Ч.Р. Дас¹ , Н. Турсунбаев^{1,2} , Ж. Құрманалиев^{1,2} , Е. Райымбеков³ , Р. Ахат³ ,
 Д. Солдатхан^{3*} , Т. Мауей^{1,2} , А. Парасат³ , А.Г. Кунсафина³ 

¹Біріккен ядролық зерттеулер институты, Ресей Федерациясы, Дубна қ.

²Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

³Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ.

*e-mail: soldathan.dauren@mail.ru

НЕЙТРИНО МАССАСЫНЫҢ АСТРОФИЗИКАЛЫҚ, ФЕНОМЕНОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК БОЛЖАМДАРЫ, ЖАҢА ФИЗИКАНЫҢ ІЗДЕРІ

Стандарттық модельдің бірнеше проблемаларының (нейтрино массалары және осцилляциялары, қараңғы материя, Ғаламдағы бариондық асимметрия, лептонды CP-бұзылуы) шешімін табуға жол сілтейтін жаңа физиканың аса маңызды феноменологиялық және эксперименталды болжамдары келтірілген. Ерте ғаламдағы деректер және лабораториялық зондтардағы мәліметтер бойынша космологиялық нейтрино массаларының шкаласындағы ұқсастық, және де жаңа физика мен құбылыстар зерттеуі талқыланған. Космологиядан жеке нейтринолардың массаларын тікелей өлшеу мүмкін емес, бірақ нейтринолардың нөлдік емес толық массасын болашақта нейтринолардың массалық иерархиясы ретінде қарастырғанда табылатыны сөзсіз. Қазір нейтрино физикасы дәл өлшеу дәуіріне енді. Катрин эксперименті нейтрино массасы 0,20 эВ-тан асатын болса, оның дәл массасын 2025 жылға дейін тікелей өлшеуге толық мүмкіндігі бар. Қазіргі уақытта нейтриносыз қос бета ыдырау процессін бақылау бойынша бірнеше тәжірибелер жүргізілуде.

Болашақта, егер космологиялық деректер тербелістер рұқсат ететін минимумнан нейтрино массасының кішірек мәнін немесе нейтрино массаларының қосындысынан кіші мән көрсетсе, бұл сәйкессіздік жаңа физика пайдасына маңызды дәлел болады. Әрқашан космологиялық және зертханалық нәтижелерді мұқият салыстыру арқылы ғана оларды бірге талдау жасауға болады.

Түйін сөздер: астрофизика, нейтрино массасы, нейтринолық фон, нейтринолық эксперименттер.

C.R. Das¹, N. Tursunbayev^{1,2}, Zh. Kurmanaliyev^{1,2}, Ye. Raiymbekov³, R. Akhat³,
 D. Soldatkhan^{3*}, T. Mauyey^{1,2}, A. Parasat³, A.G. Kunsafina³

¹Joint Institute for Nuclear Research, Russian Federation, Dubna

²Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

³L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan

*e-mail: soldathan.dauren@mail.ru

Astrophysical, phenomenological and experimental predictions of neutrino masses, traces of new physics

The crucial phenomenological and experimental predictions for new physics are outlined, where the number of problems of the Standard Model (neutrino masses and oscillations, dark matter, baryon asymmetry of the Universe, leptonic CP-violation) could find their solutions. The analogies between the cosmological neutrino mass scale from the early universe data and laboratory probes are discussed and the search for new physics and phenomena. It will be impossible to directly measure the masses of individual neutrinos from cosmology, but the discovery of a nonzero total neutrino mass in a future review is inevitable, as is the case with the neutrino mass hierarchy. Now neutrino physics has entered the era of precise measurements. The KATRIN experiment is known for directly measuring the neutrino mass until 2025 if its mass exceeds 0.20 eV. Several experiments are currently underway to observe double beta decay without neutrinos. In the future, if cosmological data indicate a smaller neutrino mass or a smaller sum of neutrino masses than the minimum allowed by the oscillations, this discrepancy will become an important argument in favor of new physics. A careful comparison of cosmological and laboratory results should always be made before combining them for a joint analysis.

Keywords: astrophysics, neutrino's mass, neutrino background, neutrino experiments

Ч.Р. Дас¹, Н. Турсунбаев^{1,2}, Ж. Курманалиев^{1,2}, Е. Райымбеков³, Р. Ахат³,
Д. Солдатхан^{3*}, Т. Мауей^{1,2}, А. Парасат³, А.Г. Кунсафина³

¹Объединенный институт ядерных исследований, Российская Федерация, г. Дубна

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан

³Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: soldathan.dauren@mail.ru

Астрофизические, феноменологические и экспериментальные предсказания масс нейтрино, следы новой физики

Очерчены важные феноменологические и экспериментальные предсказания для новой физики, где ряд проблем Стандартной модели (массы и осцилляции нейтрино, темная материя, барионная асимметрия Вселенной, лептонное CP-нарушение) могли бы найти свое решение. Обсуждаются аналогии между космологической шкалой масс нейтрино по данным ранней Вселенной и лабораторными зондами, а также поиски новой физики и явлений. Непосредственно измерить массы отдельных нейтрино из космологии будет невозможно, но открытие ненулевой полной массы нейтрино в будущем неизбежно, как и в случае с иерархией масс нейтрино. Сейчас нейтринная физика вступила в эпоху точных измерений. Эксперимент KATRIN известен прямым измерением массы нейтрино до 2025 года, если его масса превышает 0,20 эВ. В настоящее время проводится несколько экспериментов по наблюдению двойного бета-распада без нейтрино. В будущем, если космологические данные укажут на меньшую массу нейтрино или меньшую сумму масс нейтрино, чем минимум, допускаемый осцилляциями, это несоответствие станет важным аргументом в пользу новой физики. Всегда следует проводить тщательное сравнение космологических и лабораторных результатов, прежде чем объединять их для совместного анализа.

Ключевые слова: астрофизика, масса нейтрино, нейтринный фон, нейтринные эксперименты.

Кіріспе

Бүгінгі күнде Стандарттық модельдің элементар бөлшектер физикасының ең сәтті теориясы болса да, бұл теория мінсіз емес. Стандарттық модельде нейтрино массасы бөлшектер саналады. Нейтринолық осцилляцияның эксперименттері негізінде нейтриноның массасы бар екендігін көрсетті. Нейтриноның Дирак немесе Майорана фермиондарының қайсысы екендігін білмегендіктен, біз оны Стандарттық модельге қоса алмаймыз. Бірақ егер сіз Стандарттық модельден шықсаңыз және эксперименттік деректерге сүйене отырып нейтриноға масса берсеңіз, онда бұл модель дұрыс және ең түсінікті болуға лайық.

Нейтрино осцилляцияларын зерттейтін эксперименттер атмосфералық және күн нейтриноларының массаларының жіктелуін, сонымен қоса нейтринодағы CP-бұзылуды θ_{23} октантамен бірге анықтауға өте жақын. Дегенмен нейтрино осцилляцияларының эксперименттерінде нейтриноларды толық массаларының суммасы Σm_ν жөнінде ақпараттар жоқ.

Бакылау космологиясы Галамның құрылымы мен эволюциясын зерттеу үшін келесідей екі әдісті пайдаланады:

- температурасы 2.7 К болатын ғарыштық микротолқынды фонды құрайтын байырғы фотондар, $z = 1400$ болатын қызыл ығысдан бастап Үлкен жарылыстан шамамен 300 000 жылдан кейінгі космологиялық тарихты зерттеуге мүмкіндік береді;

- нейтралды газтекес сутегінің толқын ұзындығы 21 см болатын сәулеленуі материя мен қараңғы материяның ірімасштабты таралуы. Ал бұл ақпараттар нейтриноның массасы және қараңғы энергияны зерттеуге мүмкіндік береді.

Нейтрино массасын анықтауда тек ғарыштық бакылаулармен шектелмейміз, лабораториялық β -ыдыраудағы және нейтриносыз екілік β -ыдыраудағы ($0\nu 2\beta$) кинетикалық өлшемдер қосымша ақпараттар береді.

Нейтриноның абсолют массасының шкаласын космология арқылы анықтау басқа да зондтардағы мәндермен салыстыруда аса маңызды рөл ойнайды. Нәтижелер сәйкес келсе, бәрі керемет, басқа жағдайда жаңа физиканың қызық белгісі болар еді [1].

Эксперименттер

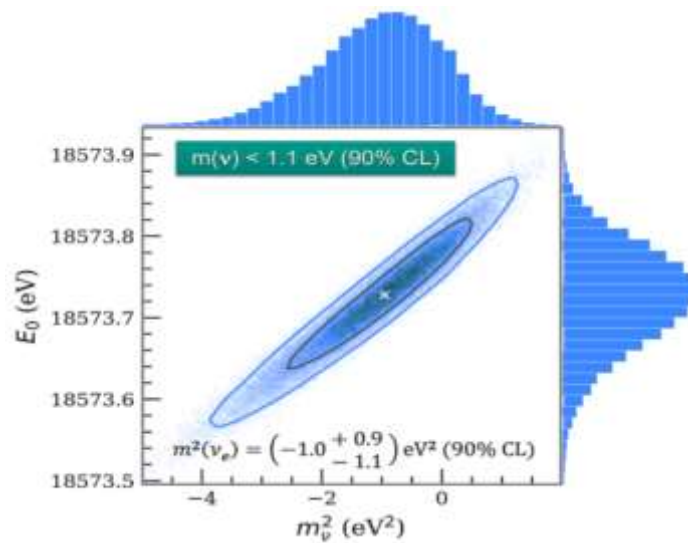
КАТРИН эксперименті

Қазіргі таңда нейтрино физикасында дәл өлшеу дәуірі басталды. КАТРИН тәжірибесі нейтриноның массасы 0.20 эВ-тен жоғары болса (егер ол 0.35 эВ-тан жоғары болса 5σ) оны тікелей өлшеуге 2025 жылға дейін қол жеткізуге мүмкіндігі бар. КАТРИН экспериментінің алғашқы төрт аптадағы өлшеген мәліметтерін талдау нәтижесі (2019ж көктем ішінде) нейтрино массасы 90% CL кезінде 1.1 эВ-тан аз екенін көрсетті. Бұл алдыңғы осы типтес эксперименттік нәтиже дәлдігінен 2 есе асып түсті (2003 жылғы Троицк тәжірибесінде 2.3 эВ болған). Әрине, бұл шама жанама космологиялық тәсілдермен бәсекелесе алмайды. Планк өлшеу қондырғысының 2018 жылғы мәліметінде бұл сан 0.12 эВ-тан төмен деп бағаланған (шын мәнінде үш нейтриноның массаларының қосындысы шектеулі мән). Сонымен, соңғы нәтижеге қатысты ең маңызды ақпарат КАТРИН тамаша жұмыс істеп тұрған сияқты. Мұндай

күрделі және өте сезімтал эксперимент үшін бұл жаман көрсеткіш емес.

Жаңа нәтижедегі ең таңғаларлық нәрсе нейтрино массасының квадраты 90% CL кезінде $m_\nu^2 = -1_{-1.1}^{+0.9} \text{eV}^2$ теріс мәнге ие болуы. Шын мәнінде, КАТРИН қондырғысы тек нейтрино массасының квадратын тікелей өлшей алады. Бұл нейтриноның ең массалық күйінің мәнін бағалауға мүмкіндік береді. Әрине, бұл теріс мән деректерді талдау үшін қолданылатын Монте-Карло әдісіне жарамсыз (ол мән оң болуы керек деп талдауды бұрмаламайды). Өлшемдердің белгісіздігі азайған кезде орталық мән нөлге жақындайды және ақырында ол оң болады (1-суретті қараңыз).

m_ν^2 теріс мәнді шамасы туралы көп жазылғаны белгілі. 1993 жылғы LLNL немесе 2011 жылғы OPERA эксперименттерінен нейтриноның тахиондық табиғаты туралы жазылғанды. Дегенмен нейтрино тахион бөлшек болса біз ол туралы міндетті түрде білетін едік. Кез келген эксперименттің сапасы оның жүйелілігінде [2,3,4].



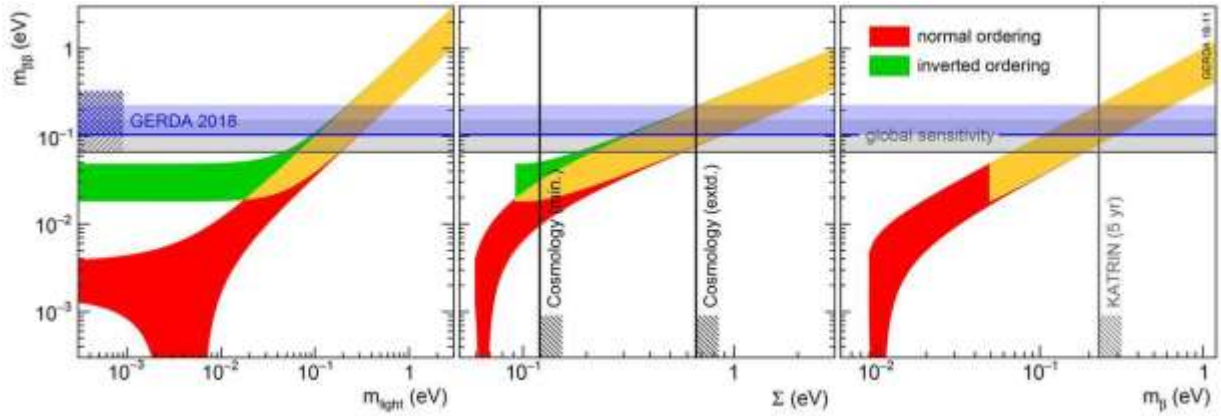
Сурет 1 – КАТРИН: $m(\nu) < 1.1 \text{ eV}$ (90% CL).

Жаңа нәтиженің маңызы КАТРИН-нің тамаша жұмыс істеп тұрғанын білдіреді.

Gerda тәжірибесі

Қазіргі уақытта нейтриноларсыз ($0\nu 2\beta$) қос бета ыдырау процессін байқау арқылы осы маңызды мәселені нақтылауға тырысатын бірнеше тәжірибелер жүргізілуде. Солардың GERDA эксперименті өзінің соңғы нәтижесін Science журналында жариялады. Онда жартылай ыдырау периоды $T_{1/2}(0\nu 2\beta) > 0.9 \times 10^{26}$ years (90% CL) болатынын басқа эксперименттер нәтижесімен салыстыра бағалады. Егер нейтрино Майоран бөлшегі болса оның

массасының жоғарғы шегі 0.07 – 0.16 eV -қа тең болады. GERDA бұл нәтижелерге Германия-76 детекторының 82.4 кг · жыл [5] экспозициясынан кейін ешбір сигналды байқамаған соң қол жеткізді. GERDA экспериментіндегі ең маңызды нәрсе – оның шу фоны өте таза, бұл оның шегінің (тіпті ол тек 2.4σ жетсе де) сенімді болуын қамтамасыз етеді (2-суретті қараңыз).



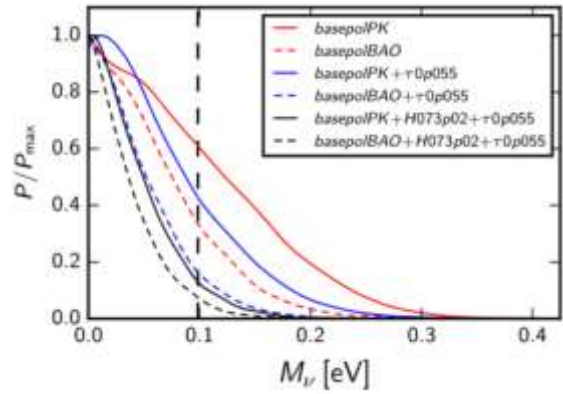
Сурет 2 – GERDA: Майорандық нейтрино массасының жоғарғы шегі 0.07 эВ - 0.16 эВ.

Айтпақшы, испандық NEXT-100 экспериментінде жартылай ыдырау периоды мәні (бес жыл деректер жинаудан кейін) $T_{1/2} \sim 1.1 \times 10^{26}$ жыл. Бұл GERDA нәтижесінен сәл жақсырақ және осы уақытқа дейінгі нәтижелердің де ең жақсысы [6]. Шындығында, $(0\nu 2\beta)$ оқиғалары нейтрино Майорана бөлшектері болған жағдайда ғана болуы мүмкін.

Планк деректері бойынша нейтрино массасы

Нейтриноның массасының да ғарыш үшін мағынасы бар. Оның массасының өте аздығына қарамастан, Үлкен жарылыс уақытында олардың көп туындағаны соншалықты, олардың коллективтік гравитациясы материяның Ғаламда қалай жұлдыздар мен галактикаларға жиналуына әсер етті. Ғарыштық тығыздықты өлшеу арқылы космологтар нейтриноның массасын анықтай алады. Қазіргі космологиялық бақылаулар нейтрино массаларының қосындысының ең жоғарғы шекарасын беріп жатыр, оның массалары жоғарғы шекараны асып кете алмайтыны анық. $k \gg k_{fs}$ болған кезде жылулық жылдамдығы үлкен нейтрино құрылымдардың кластерленуіне жағдай жасамайды, бірақ $k \ll k_{fs}$ болғанда нейтрино өзін салқын қаранғы материяның компоненті ретінде ұстайды. Бұл жердегі $k_{fs} = 0.018 \Omega_m^{\frac{1}{2}} \left[\Sigma \frac{m_\nu}{(1eV)} \right] h M pc^{-1}$ нейтриноның еркін ағымының шкаласы.

BOSS DR12 галактикаларының қуат спектрін өлшеулер және Planck 2015 [7] шығарылымынан ғарыштық микротолқындық фонды (CMB) өлшеулермен қосқандағы 2017 жылдың басына дейінгі жиналған ғарыштық деректердің әр-түрлі комбинацияларының жиынынан алынған нейтрино массаларының қосындысының апостериорлық таралуылары, 3-ші суретте келтірілген.



Сурет 3 – Ескі Планк 2015 деректерінің шығарылымы.

Планктың ғарыштық микротолқынды фонды (CMB) және бариондық тербелістердің спектроскопиялық шолу деректерінің (BOSS) (2019), ақырғы шығарылымының біріккен талдауынан шығатын нейтрино массаларының жалпы шекарасы [8]:

$$\Sigma m_\nu < 0.18 eV \text{ (NH, Planck+FS),} \quad (1)$$

$$\Sigma m_\nu < 0.21 eV \text{ (IH, Planck+FS)} \quad (2)$$

бұл мәндерді Planck + BAO нәтижелерімен салыстыруға болады:

$$\Sigma m_\nu < 0.15 eV \text{ (NH, Planck+BAO),} \quad (3)$$

$$\Sigma m_\nu < 0.18 eV \text{ (IH, Planck+BAO).} \quad (4)$$

Нәтижелер және талқылау

Нейтриноның массасын анықтаудағы болашақ космологиялық зондтар

Космологиялық деректер бізге N_{eff} саны мен жылулық тепе-теңдікте тұрған ултрарелятивистік бөлшектер (вакуумда жарық жылдамдығына

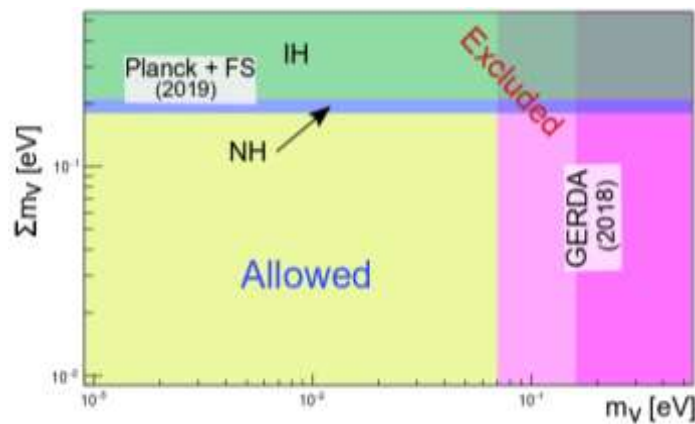
жуық жылдамдықпен қозғалатын массасы аз бөлшектер) массаларының жалпы қосындысын Σm_ν бағалауға мүмкіндік береді. Бізге белгілі бөлшектердің арасындағы жалғызы - нейтринолар. Осы себепті, N_{eff} және Σm_ν нейтрино үшін ғарыштық микротолқынды фонды линзалаудан алынатын ғарыштық бақыланатын өлшем ретінде жиі қарастырады. Галактикалардың кластеризациясын жаңаша зерттеулер (Саймсон обсерваториясы [9] немесе CMB-S4 [10]), массивті нейтринолардың сызықтық емес масштабтағы әсерлері нейтриноның массаларының қосындысы үшін ең қатаң шектеулерді анықтауды қамтамасыз ете алады.

Сонымен қатар, галактикалардың кластеризациясы және ғарыштық микротолқынды фонды линзалауға қосымша оптикалық линзалау стандартты емес қараңғы материядағы нейтриноның массасының жоқтығынан туындайтын эффектін жоя алады. Суняев-Зельдовичтің жылулық (tSZ) сигналдары арқылы ғарыштық микротолқынды фонның кластерлерін болашақта анықтау Σm_ν туралы пайдалы ақпарат бере алады. Жаңаша түсірілімдерде екі калибровка қолданылатын болады: ғарыштық микротолқынды фонды гало-линзалау көмегімен ішкі және оптикалық әлсіз линзалау көмегімен сыртқы. Систематикалық анықталмағандықтар азайып, Σm_ν үшін жіңішке шектеулер беретін болады, сондай-ақ Σm_ν және

қараңғы материя параметрлерінің арасындағы физикалық өзгешеленуді азайта алады. Суняев-Зельдовичтің кинематикалық (kSZ) эффектін сигнал/шум сапасы өте жоғай етіп өлшеу Λ CDM моделін және нейтрино массаларының қосындысын шектеуін жақсарта алады.

Жер мен алыс орналасқан квазарлар арасында алыс орналасқан квазарлардан жарық біге қарай қозғалғанда ультратфиолет жарықты жұтатын газ-тәрізді сутегі бұлттары орналасқан, бұл құбылыс Лаймана- α орманы деген атпен белгілі. Бұл эффект құрылымдардың өсуін аз масштабта зерттеудің бірегейі болып табылады. Ол галактикаларды ағымдағы зерттеулерге қол жетімсіз қызыл ығысу аймағын қамтиды. Бұл Σm_ν үшін ең қатаң шектеулерді болашақ DESI [11] сияқты зерттеулерде қамтамасыз ететін болады.

Ғарыштық қуыстардың статистикалық қасиеттері Σm_ν және σ_8 арасындағы өзгешеленуді $8h^{-1}Mpc$ масштабтағы материяның тербеліс амплитудасы арқылы шешуінде қолданыныла алады. Сонымен, болашақ жарқын көрінеді, 4-суретті қараңыз. Космология үшін қатаң жоғарғы шектеуден Σm_ν шамасын анықтауға өтетін алғашқы жолдардың бірі болуы ықтимал. Геоматриялық акустикалық бариондық тербелістер мен кеш уақыттағы ғаламды томографиялық өлшеулерге сезімтал қызыл ығысу тәелділігі $\sigma(\Sigma m_\nu)$ және ω параметрлі күйдегі қараңғы материя теңдеулері арасындағы өзгешеленуді жоятын болады.



Сурет 4 – Зертханалық эксперименттермен салыстыру. LSS және CMB (tSZ & kSZ)-мен бірге болашақ жарқын көрінеді!

Бұл нейтрино массаларын космологиядан анықтау тиімділігін арттыратын болады. Ғарыштық нейтринолық фонды тура анықтауда эксперименттік талпыныстар болып жатыр(мысалы, PTOLEMY эксперименті [12]). Болашақ ғарыштық микротолқындық фонды зерттеулер және алпауыт масштабты құрылымдар

(LSS) нейтрино массаларының қосындысын 3σ дерлік шамада, $\sigma(\Sigma m_\nu) \sim 14$ МэВ дәлдікпен анықталуына кепілдік беріп отыр. Бұл дегеніңіз стандартты модель аясынан тыс физиканың барлығының дәлеліне нұсқайды және [1] жұмыспен оның ішіндегі сілтемелерге қарасаң болады.

Қорытынды

Космологиядағы жеке нейтрино массаларының өзіндік күйлері

Космологиядан нейтриноның жекелеген массаларын тікелей өлшеу мүмкін емес, дегенмен, нейтрино массаларының иерархиясы және нейтриноның жалпы массасының нөл еместігінің болашақ зерттеулерде анықталатыны сөзсіз [13,14].

Болашақта космологиялық деректер массасыз нейтриноны немесе массалар қосындысы минималды қолжетімді тербелістерден төмен екендігін анықталатын болса, бұл сәйкессіздік жаңа физика үшін өте маңызды аргумент болғалы тұр. Бірлескен талдау мақсатында оларды біріктірместен бұрын космологиялық және зертханалық нәтижелерді мұқият салыстыру қажет (мысалы, LEGEND-200 [15]).

Әдебиет

- 1 Dvorkin C., Gerbino M., Alonso D., Battaglia N., Bird S., Rivero A. D., Font-Ribera A., Fuller G., Lattanzi M., Loverde M., Muñoz J.B., Sherwin B., Slosar A., Villaescusa-Navarro F. Neutrino mass from cosmology: probing physics beyond the Standard Model //arXiv preprint arXiv:1903.03689. – 2019. – 15 p.
- 2 Aker M., Altenmüller K., Arenz M., Babutzka M., et al. (KATRIN Collaboration). Improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN //Phys. Rev. Lett. –2019. – Vol.123(22). – P. 221802.
- 3 Aker M., Altenmüller K., Arenz M., Baek W.J., et al. (KATRIN Collaboration). First operation of the KATRIN experiment with tritium //The European Physical Journal C. – 2020. –Vol.80(3). – P.1-18.
- 4 Aghanim N., Akrami Y., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi et al. (Planck Collaboration). Planck 2018 results-VI. Cosmological parameters //Astronomy & Astrophysics. – 2020. –Vol.641(A6). – P.67.
- 5 Agostini M., Bakalyarov A.M., Balata M., Barabanov I., et al. (GERDA collaboration). Probing Majorana neutrinos with double- β decay// Science. – 2019. – Vol.365(6460). – P.1445-1448.
- 6 Ferrario P. The NEXT double beta decay experiment //arXiv preprint arXiv:1710.03022. – 2017. – 5 p.
- 7 Vagnozzi S., Giusarma E., Mena O., Freese K., Gerbino M., Ho S., Lattanzi M. Unveiling ν secrets with cosmological data: neutrino masses and mass hierarchy //Phys. Rev. D – 2017. –Vol.96(12). – P.123503.
- 8 Ivanov M.M., Simonović M., Zaldarriaga M. Cosmological parameters and neutrino masses from the final Planck and full-shape BOSS data //Phys. Rev. D. – 2020. – Vol.101(8). – P.083504.
- 9 Abitbol M.H., Adachi S., Ade P., Aguirre J., et al. (TSO Collaboration). The simons observatory //Astro2020 decadal project whitepaper. – 2019. – arXiv preprint arXiv:1907.08284.
- 10 Abazajian K., Addison G., Adshead P., Ahmed Z., et al (CMB-S4 Collaboration). CMB-S4 decadal survey APC white paper //arXiv preprint arXiv:1908.01062. – 2019. – 14 p.
- 11 Font-Ribera A., McDonald P., Mostek N., Reid B.A., Seo H.J., Slosar A. DESI and other dark energy experiments in the era of neutrino mass measurements //Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2014. – Vol.5. – Art.No.023.
- 12 Betti M.G., Biasotti M., Boscá A., Calle F., et al. Neutrino physics with the PTOLEMY project: active neutrino properties and the light sterile case // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2019. – Vol.747. – Art.No.047.
- 13 Archidiacono M., Hannestad S., Lesgourgues J. What will it take to measure individual neutrino mass states using cosmology? //Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2020. – Vol.9. – Art.No.021.
- 14 Choudhury S. R., Hannestad S. Updated results on neutrino mass and mass hierarchy from cosmology with Planck 2018 likelihoods //Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2020. – Vol.7. – Art.No.037.
- 15 López-Castaño J. M., Guinn I. Current status of LEGEND: Searching for Neutrinoless Double-Beta Decay in ^{76}Ge : Part II //arXiv preprint arXiv:1912.03308. – 2019.

References

- 1 C. Dvorkin C, M. Gerbino, et al., arXiv preprint arXiv:1903.03689 (2019).
- 2 M. Aker, K. Altenmüller, M. Et al., Phys.Rev.Lett., 123(22), 221802 (2019).
- 3 M. Aker, K. Altenmüller, M. Arenz, W. J. Baek, et al. (KATRIN Collaboration) The European Physical Journal C, 80(3),1-18 (2020).
- 4 N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, Baccigalupi, et al., Astronomy & Astrophysics, 641(A6), 67 (2020).
- 5 M. Agostini, A.M. Bakalyarov, M. Balata, I. Barabanov, et al. (GERDA collaboration), Science, 365(6460), 1445-1448 (2019).
- 6 P. Ferrario, arXiv preprint arXiv:1710.03022 (2017).
- 7 S. Vagnozzi, E. Giusarma, O. Mena, K. Freese, M. Gerbino, S. Ho, M. Lattanzi, Phys.Rev. D, 96(12),123503 (2017).
- 8 M.M. Ivanov, M. Simonović, M. Zaldarriaga, Phys.Rev. D, 101(8), 083504 (2020).

- 9 M. H. Abitbol, S. Adachi, P. Ade, J. Aguirre et al. (TSO Collaboration), arXiv preprint arXiv:1907.08284 (2019).
- 10 K. Abazajian, G. Addison, P. Adshead, Z. Ahmed et al (CMB-S4 Collaboration), arXiv preprint arXiv:1908.01062 (2019).
- 11 Font-Ribera, P. McDonald, N. Mostek, B.A. Reid, H.J. Seo, A. Slosar, JCAP, 5(23) (2014).
- 12 M.G. Betti, M. Biasotti, A. Bosca, F. Calle, et al, JCAP, 7(47) (2019).
- 13 M. Archidiacono, S. Hannestad, J. Lesgourgues, JCAP, 9(21) (2020).
- 14 S.R. Choudhury, S. Hannestad, JCAP, 7(37) (2020).
- 15 J. M. López-Castaño, I. Guinn, arXiv preprint arXiv:1912.03308 (2019).