

УДК 524.8

В. Жданов, д-р фіз.-мат. наук, проф.  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна**МОДИФІКАЦІЇ СТАНДАРТНОЇ КОСМОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ ТА "НОВА ФІЗИКА"**

*Подано огляд проблем, пов'язаних із можливим виходом за межі базової космологічної моделі. Основну увагу надано питанням, пов'язаним переважно з астрономічними спостереженнями та з найпростішими модифікаціями загальної теорії відносності, що включають космологічне скалярне поле або з нелінійними внесками по кривині в гравітаційному лагранжіані.*

*Ключові слова: стандартна космологічна модель, темна енергія, темна матерія, скалярне поле, модифікована гравітація.*

**Вступні зауваження.** Мета цієї статті – дати огляд проблем, пов'язаних із можливим виходом за межі базової космологічної моделі, для фахівців, які безпосередньо не пов'язані з космологічними дослідженнями. Автор не претендує на повний аналіз усього спектра питань, що тут виникають, зокрема, не розглянуто важливі задачі теорії поля та фізики елементарних частинок, теорія суперструн і гравітаційні теорії з додатковими вимірами. Натомість ми концентруємося на задачах, пов'язаних переважно з астрономічними спостереженнями, зокрема з визначенням діаграми Габбла, та з найпоширенішими модифікаціями загальної теорії відносності (ЗТВ).

Зазначимо, що базова модель розширення Всесвіту з холодною темною матерією та космологічною сталою (що відповідає скороченню  $\Lambda$ CDM – Lambda Cold Dark Matter) прекрасно описує практично всі спостережні дані (за винятком, можливо, різних визначень сталої Габбла). Однак ще до відкриття темної матерії (ТМ) і темної енергії (ТЕ) існували міркування щодо необхідності доповнення моделі гарячого Всесвіту, зокрема і введення нових сутностей, які могли б забезпечити існування етапу дуже швидкого роздування Всесвіту (інфляції) у перші миттєвості космологічного розширення. Ці міркування залишаються в силі і після появи  $\Lambda$ CDM-моделі. Нагадаємо, зокрема, про проблеми горизонту та площинності, що звертають увагу на спостережні факти, які важко пояснити в межах цієї моделі.

Проблема горизонту полягає в тому, що за існуючих фізичних взаємодій, які приводять до відомих рівнянь стану матерії в ранньому Всесвіті, області неба, з яких іде реліктове (мікрохвильове) випромінювання (РВ), і які розташовані на відстані в декілька градусів, виявляються причинно незалежними. Маємо велику кількість таких причинно нез'язаних областей на небі, які мають приблизно однакову температуру близько  $T = 2.7\text{ K}$  (існуючі відносні відхилення температури мають порядок  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ ). Не зрозуміло, чому незалежні області, де генерується РВ, мають однакову температуру?

Проблема площинності пов'язана з оцінками  $\Omega$  – параметра, який відповідає за просторову кривину Всесвіту. Значення  $\Omega = 1$  відокремлює значення для відкритої та замкненої моделей Всесвіту. Оцінка за даними місії Planck [1,2] відрізняє  $\Omega$  від одиниці на величину порядку відсотка, але якщо екстраполювати сучасні дані на більш ранні часи, оцінка величини  $|\Omega - 1|$  суттєво зменшується. Зокрема, на планківський час  $10^{-43}$  с отримаємо  $|\Omega - 1| \sim 10^{-60}$  – це дуже тонке налаштування.

Можливий шлях до розв'язання цих та інших проблем лежить через введення інфляційного періоду розширення Всесвіту, який виникає або завдяки певній модифікації теорії тяжіння, або завдяки дії нових полів, що описують взаємодії, додаткові до відомих, – гравітаційної, слабкої, електромагнітної та ядерної. Між цими двома напрямками може бути взаємозв'язок чи об'єднання. Але природно виникає запитання: чи є ефекти, пов'язані з дією залишків цих додаткових полів, які діють на космологічних масштабах, у більш пізню епоху? Це питання корелює з широкою дискусією, яка виникла в останні роки у зв'язку з виявленими відмінностями у результатах визначення сталої Габбла  $H_0$  в епоху, близьку до рекомбінації водню, та в сучасну епоху; комплекс пов'язаних із цим питань отримав назву "Hubble Tension". Уточнення сталої Габбла призвело до статистично значущої різниці між визначенням із використанням, з одного боку, даних Planck та даних щодо баріонних акустичних осциляцій (БАО) (рання  $H_0$ ) [1, 2] та, з іншого боку, незалежними оцінками на основі вимірювань, які відповідають відносно невеликим червоним зміщенням  $z$  (пізня  $H_0$ ) [3, 4].

Можна виокремити два напрямки дослідження проблеми "Hubble Tension". Першочерговим є ретельний аналіз спостережних даних. Далі, порівняння визначень  $H_0$  в різні епохи базується на використанні  $\Lambda$ CDM-моделі, тому не виключено, що порятунком є якраз вихід за межі цієї моделі. До цього зазначимо, що "Hubble Tension" – не єдина проблема в  $\Lambda$ CDM-моделі; є й інші невідповідності. Наприклад, існує невідповідність даних Planck'a з вимірюваннями слабкого лінзування й оглядами червоного зміщення, що дають оцінку густини маси  $\Omega_m$ , а також амплітуду космологічних збурень, пов'язану із швидкістю утворення структури [6, 34].

**"Рання"  $H_0$ .** Колаборація Planck наводить такі значення "ранньої"  $H_0$ , отримані за вимірюваннями кутового спектра потужності анізотропії РВ із залученням незалежних даних по баріонних осциляціях:  $H_0 = (67,36 \pm 0,54)$  км/с/Мпк [1, 2] та  $H_0 = (67,66 \pm 0,42)$  км/с/Мпк [7, 8, 9]. Важливо зазначити, що для оцінки "ранньої" сталої Габбла використовують не тільки дані спостережень спектра анізотропії РВ у межах стандартної космології, які моделюють за допомогою рівнянь для космологічних збурень із початковим степеневим спектром потужності [1, 2], а також незалежні астрофізичні дані по баріонних акустичних осциляціях [7, 8, 9]. Спостережні дані про положення максимумів у спектрі анізотропії дають оцінку кутового розміру звукового горизонту  $\theta_s(z_{rec})$  на момент формування РВ. Для оцінювання лінійного розміру  $r_s(z_{rec})$  використовують акустичний масштаб, вимірний

БАО, що становить приблизно 147 Мпк. Цей масштаб вважають набагато більшим, ніж масштаб віриалізованих структур, в яких проявляється нелінійний характер процесів утворення галактик і скупчень, що робить вимірювання БАО нечутливими до нелінійної фізики. Із цієї причини вимірюванням БАО надають велику вагу порівняно з іншими даними, незалежними від даних місії Planck [2].

Наведемо співвідношення, що використовують для оцінювання "ранньої"  $H_0$  у моделі просторово-плоского Всесвіту з метрикою Фрідмана – Леметра – Робертсона – Уокера, записаною через конформний час  $\tau$ :

$$ds^2 = a^2(\tau)(d\tau^2 - dx^2); \quad a(t_0) = 1. \quad (1)$$

Лінійний супутній розмір  $r_s$ , за допомогою якого задають "стандартну лінійку", можна визначити із співвідношення

$$r_s(z_{rec}) = \int_0^{\eta(z_{rec})} c_s(\tau) d\tau = \int_{z_{rec}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{3(1+3\epsilon_b/4\epsilon_\gamma)}} \frac{dz}{H(z)}, \quad (2)$$

де  $c_s$  – швидкість звуку в баріон-фотонній суміші до рекомбінації, квадрат якого з [10]

$$c_s^2 = \frac{c^2}{3(1+3\epsilon_b/4\epsilon_\gamma)}, \quad (3)$$

$\eta(z)$  – конформний час,  $H(z)$  – параметр Габбла;  $\epsilon_b$ ,  $\epsilon_\gamma$  – інваріантні густини енергії баріонного та фотонного компонентів.

Аналогічне (2) співвідношення записують для супутнього радіуса звукового горизонту  $r_d$  [7, 8, 9] в епоху відриву (drag epoch), дещо пізніше за  $t_{rec}$ , коли втрачається взаємодія між випромінюванням і речовиною. Цей радіус (характерний масштаб кластеризації речовини) визначають за кореляційними функціями в розподілах галактик і квазарів [7, 8, 9]. Зручні наближення для оцінки  $r_d$  можна знайти в [11].

За визначенням відстані за кутовим діаметром  $D_a$  маємо

$$r_s(\eta_r) = \theta_{rec} \int_0^{z_r} \frac{dz'}{H(z')},$$

де  $\theta_{rec}$  – спостережуваний кутовий розмір. За незалежного визначення  $r_s$  та  $\theta_{rec}$  ця формула дає змогу зафіксувати  $H_0$  у стандартній космологічній моделі.

Спостереження БАО визначають величину

$$D_V(z) = \left( D_a^2(z) \frac{cz(1+z)^2}{H(z)} \right)^{1/3}.$$

Ця оцінка базується на порівнянні кластеризації галактик у поздовжньому та поперечному розподілах галактик. В основі оцінок лежить природне припущення статистичної ізотропії розподілу, яке дає змогу також застосувати тест Алкока – Пачинського і визначити параметр

$$F_{AP}(z) = (1+z)D_a(z)H(z)/c.$$

Ці співвідношення містять параметр Габбла і, відповідно, можуть бути використані для визначення  $H_0$ .

"Пізня"  $H_0$ . Оцінки "пізньої"  $H_0$  базуються на використанні "космічних сходів" і спостережень наднових Ia (див., напр., [3, 12, 34]):  $H_0 = (73,5 \pm 1,4)$  (км/с)/Мпк. Наднові Ia можна розглядати як "стандартні свічки", які мають фіксовану світність; тому вимірювання потоку випромінювання дозволяє оцінити фотометричну відстань до цих об'єктів із досить високою точністю. Світність і криві блиску наднових Ia вимірюють експериментально і світність треба калібрувати. У низці робіт (див. огляд [5]) проведено калібрування світності наднових Ia на відносно невеликих  $z$ , де працюють незалежні індикатори відстані (цефеїди, міриди, верхівка гілки червоних гігантів). Оцінки "пізньої"  $H_0$  постійно уточнюють і перевіряють (див., напр. [35]), зокрема і незалежно від  $\Lambda$ CDM-моделі. Зазначимо, що зі значенням "пізньої" сталої Габбла узгоджується цілком незалежна оцінка, основана на використанні сильного гравітаційного лінзування  $H_0 = 73,3_{-1,8}^{+1,7}$  (км/с)/Мпк [13]. Ідея такої оцінки запропонована вперше С. Рефсдалом; вона використовує експериментально визначені часи відносної затримки випромінювання для різних зображень гравітаційно-лінзової системи. Але вона базується на модельному представленні лінзового потенціалу, який залежить від невідомого розподілу маси в лінзовій галактиці. Тому цю оцінку слід сприймати з обережністю. Більш повний огляд і літературні джерела щодо визначення "ранньої" та "пізньої"  $H_0$  можна знайти в [5, 34].

Обговоримо деякі питання, що виникають у випадку визначення "пізньої"  $H_0$ . Для визначення геометрії Всесвіту вихідними є рівняння Фрідмана, які дозволяють, також у межах певних припущень про вміст різних видів матерії, зв'язати червоне зміщення об'єктів, які нерухомі в системі відліку PB, із відстанню, яка визначається через спостережувані величини. Насправді, наднові Ia чи інші об'єкти мають пекулярні швидкості, які важко врахувати. Ключовим є питання, як відокремити негабблівські та пекулярні рухи галактик, що містять наднові Ia, від космологічного розширення. Фундаментальною гіпотезою є принцип Коперника – припущення про статистичну

однорідність та ізотропію Всесвіту, яка підтверджується високим ступенем ізотропії РВ. Утім слід пам'ятати, що це є гіпотеза, яку треба також перевіряти. Важливою обставиною є *локальна* неоднорідність на масштабах декількасот мегапарсек, яка може бути присутня і яку треба враховувати в контексті визначення  $H_0$ . Дослідження великомасштабних течій на відстанях 100–200 Мпк (див., напр., [15]) свідчать про колективні рухи галактик із додатковими швидкостями до декількасот км/с, які пов'язані з існуванням потужних концентрацій маси типу Великого атрактора. У цьому зв'язку зазначимо, що в літературі обговорюється, окрім інших, найпростіша ідея – припустити локальну нестачу густини в околі Локального Надскупчення; це могло б пояснити надлишок швидкості габблівського розбігання [16, 17] і таким чином пояснити відмінності між "ранньою" та "пізньою"  $H_0$ . Така ідея корелює з добре відомим підходом про існування космічних супервоядів і деякими моделями неоднорідного Всесвіту [17, 18, 19, 20]. Аналіз спостережень, виконаний у [16, 17], не дозволяє відкинути чи підтвердити цю гіпотезу. У роботі [21] зроблено спробу побудувати діаграму Габбла "з перших принципів" на основі спостережних даних по наднових, квазарах та гамма-спалахах, не обтяжуючись конкретною фізичною моделлю. Натомість, тут використовується певний розклад параметра Габбла по червоних зміщеннях. На думку авторів, побудована ними незалежна діаграма Габбла на великих  $z$  свідчить про відхилення від стандартної моделі і, можливо, про ефекти "нової фізики". У роботі [22] автори спробували оцінити можливі відхилення від ізотропії при визначенні  $H_0$ ; однак явних доказів такої анізотропії у розглянутій вибірці наднових і квазарів не знайдено.

**Модифікована гравітація.** У космологічних дослідженнях, зокрема, визначенні "ранньої"  $H_0$ , базову роль відіграє залежність параметра Габбла від червоного зміщення. Тому природно, що для розв'язання проблеми "Hubble Tension" активно розглядають численні модифіковані стандартної космологічної моделі, які дають відмінну залежність  $H(z)$ . У цьому огляді ми зосередимося на двох варіантах виходу за межі стандартної теорії, що пов'язані з уведенням додаткових полів, зокрема і скалярних, та з модифікаціями суто гравітаційного лагранжіана. Звичайно, таке розділення є умовним, воно залежить від того, які поля вважати гравітаційними, а які ні. Характерною ознакою гравітаційної взаємодії зазвичай є її універсальність, тобто здатність однаково впливати на частинки та негравітаційні поля, тобто підпорядковуватися принципу еквівалентності.

Розглянемо коротко основні напрямки цих модифікацій [23–33]. Можна виокремити три основні напрямки: (i) введення динамічної ТЕ в межах ЗТВ, (ii) модифікована гравітація (з розширенням ЗТВ чи в межах альтернативних теорій), зокрема, різні варіанти  $f(R)$ -гравітації, а також (iii) розроблення моделей ТМ за допомогою розширень стандартної моделі елементарних частинок. Стилий перелік основних напрямків можна знайти в [5]. Він включає моделі з ТЕ, які допускають варіації космологічної сталої на великих червоних зміщеннях (зокрема і моделі динамічної ТЕ, які вирішують проблему "Hubble Tension" ціною фантомного рівняння стану з параметром  $w < -1$ ), або, навпаки, при червоних зміщеннях  $z < 3000$ ; моделі із взаємодіючими ТЕ і ТМ (окрім як гравітаційно). Низка моделей не залучає динамічну ТЕ, але розглядає варіації фундаментальних констант, або додаткові степені вільності нейтрино, або специфічні властивості частинок ТМ. Як зазначають автори [5], див. також [34], існуючі спостереження, хоча в цілому узгоджуються з просторово-плоскими моделями, демонструють певну напругу в межах моделі холодної темної матерії, яка все ще допускає кілька відсотків відхилень від плоского Всесвіту. Зокрема, спектри Планка віддають перевагу закритому Всесвіту на довірчому рівні більше 99%. Хоча це може бути проявом "нової фізики", зазначена аномалія може бути і результатом неототожнених систематичних помилок або просто статистичних флуктуацій. Однак, оскільки позитивна кривина відповідає збільшенню віку Всесвіту, точне визначення віку найдавніших об'єктів забезпечить підтвердження або заперечення просторово-плоскої моделі з холодною темною матерією.

Нагадаємо, що в ЗТВ рівняння поля є наслідком варіаційного принципу

$$\delta \{ S_{grav} + S_m \} = 0, \quad (4)$$

де  $\delta$  – перша варіація по динамічних змінних,  $S_{grav} = -\frac{1}{16\pi G} \int_{\Omega} d^4x \sqrt{-g} (R + \Lambda)$  – гравітаційна дія Гільберта – Айнштайна;

$S_m = \int_{\Omega} d^4x \sqrt{-g} L_m(\psi, \partial\psi, g^{\mu\nu}, \partial g^{\mu\nu})$  – дія для сукупності негравітаційних полів, позначених умовно через  $\psi$ ;

$g^{\mu\nu}$  – метричний тензор,  $g = \det \|g^{\mu\nu}\|$ ;  $R$  – скалярна кривина, яка відповідає  $g^{\mu\nu}$ .

Для отримання рівнянь Айнштайна варіацію у (4) виконують по змінних  $g^{\alpha\beta}$ . Варіація від

$S_m = \int_{\Omega} d^4x \sqrt{-g} L_m(\psi, \partial\psi, g^{\mu\nu}, \partial g^{\mu\nu})$  дає рівняння негравітаційних полів.

Історично першою конкурентоздатною модифікацією ЗТВ можна вважати теорію Бранса – Дікке – Йордана [36, 37], узагальнений варіант якої з одним скалярним полем запишемо як

$$\delta \int_{\Omega} d^4x \sqrt{-g} \{ A(\varphi)R + B(\varphi)L_m(\psi, \partial\psi, g^{\mu\nu}, \partial g^{\mu\nu}) + C(\varphi, X) \} = 0, \quad (5)$$

де  $X \equiv \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} \varphi_{,\alpha} \varphi_{,\beta}$ . Тут співмножник  $A(\varphi)$  відіграє роль змінної гравітаційної сталої. Варто зазначити, що сучасні експерименти не виявляють якихось змін фундаментальних констант, зокрема і гравітаційної. Але якщо йдеться про космологічні масштаби, не виключена ситуація, коли ефекти, непомітні в сучасних умовах, можуть бути суттєвими в дуже ранньому Всесвіті. З іншого боку, відомо, що  $A(\varphi)$  в (5) можна прибрати за допомогою певної заміни змінних, тоді отримуємо рівняння гравітаційного поля у так званому представленні Айнштайна з перетвореною метрикою.

Найпростішим узагальненням (4) можна вважати теорію з одним скалярним полем, яка базується на варіаційному принципі

$$\delta S_{grav} + \delta \left\{ \int d^4x \sqrt{-g} [X - V(\varphi)] + S_m \right\} = 0. \quad (6)$$

Тут також є степінь вільності, обумовлений наявністю потенціалу  $V(\varphi)$ . У роботі [38] показано, що підбором  $V(\varphi)$  можна отримати задану діаграму Габбла за досить загальних умов.

Інший напрямок модифікації полягає у використанні складнішого виразу для гравітаційної дії, яка включає нелінійні по кривині члени в дії. Найбільш відомим підходом є  $f(R)$ -гравітація, тут гравітаційна складова дії має вигляд

$$S_{grav} = \int_{\Omega} d^4x \sqrt{-g} f(R), \quad (7)$$

а узагальнені рівняння Айнштайна містять похідні вище другого порядку. Утім тут легко перейти до системи другого порядку, якщо записати  $R = R_{\mu\nu} g^{\mu\nu}$ , де

$$R_{\mu\nu} = \partial_{\alpha} \Gamma_{\nu\mu}^{\alpha} - \partial_{\nu} \Gamma_{\alpha\mu}^{\alpha} + \Gamma_{\alpha\sigma}^{\alpha} \Gamma_{\nu\mu}^{\sigma} - \Gamma_{\nu\sigma}^{\alpha} \Gamma_{\alpha\mu}^{\sigma},$$

а коефіцієнти зв'язності  $\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha}$  слід вважати незалежними динамічними змінними. Рівняння для  $\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha}$  та  $g^{\mu\nu}$  містять похідні не вище другого порядку. Цікаво зазначити, що у випадку дії Гільберта – Айнштайна із цих рівнянь випливає, що  $\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha}$  утворюють зв'язність Леві-Чивіті для метрики  $g^{\mu\nu}$ , тобто приводять до звичайних рівнянь Айнштайна.

Важливою обставиною є те, що дію (7) можна звести до форми (5) у представленні Бранса – Дікке – Йордана з одним скалярним полем, а потім звести до представлення Айнштайна шляхом конформного перетворення метрики  $g_{\alpha\beta} \rightarrow \tilde{g}_{\alpha\beta} = f'(R)g_{\alpha\beta}$ . Це встановлює динамічну еквівалентність  $f(R)$ -гравітації і теорії зі скалярними полем; але треба пам'ятати, що фізичною метрикою є  $g_{\alpha\beta}$ . Аналогічно теорії зі скалярним полем, тут також можна підбирати вигляд функції  $f(R)$  для підгонки заданої діаграми Габбла [39].

Резюмуючи цей далеко не повний огляд, зазначимо, що напрямків розв'язання проблем із сталою Габбла існує досить велика кількість. На думку авторів [5], жодна з них не пояснює усієї повноти спостережних даних. Вони або мають феноменологічний характер, або містять довільні функції, які мають визначитися з експерименту або, найкраще, з якихось фундаментальних принципів. Тому природно у першу чергу звернутися до тих моделей, які не вводять "нових сутностей" або залучають мінімальну кількість нових фізичних елементів із мінімальною кількістю додаткових параметрів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Planck Collaboration. Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck. // *Astron. Astrophys.* – 2020. – V. 641. – id.A1
2. Planck collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters // *Astron. Astrophys.* – 2020. – V. 641. – id. A6.
3. Riess A. G. Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond  $\Lambda$ CDM / A.G. Riess S. Casertano, Wenlong et al // *Astrophys. J.* – 2019. – V.876. – no. 1.
4. Verde L. Tensions between the Early and the Late Universe/L.Verde, T. Treu, A.G.Riess // *Nat. Astron.* – 2019. – V.3. – P. 891–895.
5. Di Valentino E. Cosmology Intertwined II: The Hubble Constant Tension/E. Di Valentino // *Astropart. Phys.* 131, 102605 (2021); arXiv:2008.11284 (2020).
6. Di Valentino E. Cosmology Intertwined III: sigma-8 and S8/E. Di Valentino // *Astropart. Phys.* 131, 102604 (2021); arXiv:2008.11285 (2020).
7. Beutler F. The 6dF Galaxy Survey: baryon acoustic oscillations and the local Hubble constant/ F. Beutler // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* – 2011. – V.416. – P. 3017–3032.
8. Ross A. J. The clustering of the SDSS DR7 main Galaxy sample – I. A 4 per cent distance measure at  $z = 0.15/A$ . J. Ross et al. // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* // –2015. – V.449. – no. 1. – P. 835–847.
9. Alam Sh. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: cosmological analysis of the DR12 galaxy sample/Sh. Alam, et al. // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* – 2017. – V.470. – no.3. – P. 2617–2652.
10. Hu W. Anisotropies in the cosmic microwave background: an analytic approach/W.Hu, H.Sugiyama // *Astrophys. J.* – 1995. – V.444. – P.489–506.
11. Aubourg E. Cosmological implications of baryon acoustic oscillation (BAO) measurements/E.Aubourg et al // *Phys. Rev. D.* – 2015. – V.92. – Iss. 12. – id. 123516.
12. Reid M. An Improved Distance to NGC 4258 and its Implications for the Hubble Constant/M. Reid, D. Pesce, A. Riess // *Astrophys. J. Lett.* – 2019. – V.886. – no. 2.
13. K. C. Wong H0LiCOW – XIII. A 2.4 per cent measurement of H0 from lensed quasars: 5.3 sigma tension between early- and late-Universe probes/K. C. Wong et al. // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* – 2019. – V.498. – Iss. 1. – P. 1420–1439.
14. Lesgourgues J. Massive neutrinos and cosmology/J. Lesgourgues, S.Pastor // *Phys.Rep.* – 2006. – V.429. – P. 307–379.
15. Turnbull S. J. Cosmic flows in the nearby universe from Type Ia supernovae/S.J. Turnbull, M.J. Hudson, H.A. Feldman et al // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* – 2012. – V.420. – P. 447–454.
16. Boehringer H. Observational evidence for a local underdensity in the Universe and its effect on the measurement of the Hubble constant / H. Boehringer, Gayoung Chon, C. A. Collins // *Astron. Astrophys.* – 2020. – V.633. – id. A19.
17. Kiyotomo Ichiki Relationship between the CMB, Sunyaev-Zel'dovich cluster counts, and local Hubble parameter measurements in a simple void model / Kiyotomo Ichiki, Chul-Moon Yoo, Masamune Oguri // *Phys. Rev. D.* – 2016. – V.93. – Iss.2. – id.023529.
18. Sheth R. K. A hierarchy of voids: much ado about nothing/R. K. Sheth, R. van de Weygaert // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* // – 2004. – V.350. –P. 517–538.
19. Colberg, J. M. Voids in a  $\Lambda$ CDM universe / J. M. Colberg, R. K. Sheth, A. Diaferio et al // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* – 2005. – V.360. – Iss. 1. – P. 216–226.
20. Mishra P. Thermodynamics and Lemaitre-Tolman-Bondi void models/P. Mishra, S. Priti, P. Tejinder // *Phys. Rev. D.* – 2014. – V.89. – Iss. 12. – id.123007.
21. Lusso E. Tension with the flat LCDM model from a high-redshift Hubble diagram of supernovae, quasars, and gamma-ray bursts/ E. Lusso, E. Piedipalumbo, G. Risaliti et al. // *Astron. Astrophys.* – 2019. – V.628. – id.L4.
22. Hu J. P. Testing cosmic anisotropy with Pantheon sample and quasars at high redshifts/J. P. Hu, Y. Y. Wang, F. Y. Wang // arXiv:2008.12439 (2020).
23. Di Valentino E. Reducing the H0 and  $\sigma_8$  tensions with Dark Matter-neutrino interactions/ Di Valentino E., C. Bloehm, E. Hivon et al // *Phys. Rev. D.* – 2018. – V.97. – no.4. – Iss.4. – id.043513.
24. D'Eramo F. Hot Axions and the H0 tension/ F. D'Eramo, R. Z. Ferreira, A. Notari et al // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* – 2018. – V.11. – id. 014.
25. Poulin V. The implications of an extended dark energy cosmology with massive neutrinos for cosmological tensions/V. Poulin, K. K. Boddy, S. Bird et al // *Phys. Rev. D.* – 2018. – V.97. – no.12. – id.123504.
26. Kreisch C. D. The Neutrino Puzzle: Anomalies, Interactions, and Cosmological Tensions/C. D. Kreisch, F. Y. Cyr-Racine, O. Doré // *Phys. Rev. D.* – 2020. – V.101. – no.12 –Iss.12. – id.123505.

27. Blinov N. Constraining the Self-Interacting Neutrino Interpretation of the Hubble Tension/N. Blinov, K. J. Kelly, G. Z. Krnjaic et al // Phys. Rev. Lett., – 2019. – V.123. – no.19. – id.191102.
28. Di Valentino E. Reconciling Planck with the local value of  $H_0$  in extended parameter space/E. Di Valentino, A. Melchiorri, J. Silk // Phys. Lett. B, – 2016. – V.761, – P. 242–246.
29. Keeley R. E. Implications of a transition in the dark energy equation of state for the  $H_0$  and  $\sigma_8$  tensions/R. E. Keeley, S. Joudaki, M. Kaplinghat et al. // J. Cosmol. Astropart. Phys. – 2019, – V.12. – id. 035.
30. E. Di Valentino, A. Melchiorri, O. Mena and S. Vagnozzi. Interacting dark energy in the early 2020s: a promising solution to the  $H_0$  and cosmic shear tensions/ E. Di Valentino, A. Melchiorri, O. Mena et al // Phys. Dark Univ. – 2020. – V.30. – P. 100666.
31. Benevento G. Can Late Dark Energy Transitions Raise the Hubble constant?/ G. Benevento, W. Hu, M. Raveri// Phys. Rev. D. – 2020. – V.101. – no.10. – id.103517.
32. Alestas G.  $H_0$  Tension, Phantom Dark Energy and Cosmological Parameter Degeneracies/ G. Alestas, L. Kazantzidis, L. Perivolaropoulos// Phys. Rev. D. – 2020. – V.101. – no.12. – id.123516.
33. Valentino E. Di.  $H_0$  Ex Machina: Vacuum Metamorphosis and Beyond  $H_0$ /E. Di Valentino, E. V. Linder, A. Melchiorri// Phys. Dark Univ. – 2020. – V30. – id. 100733.
34. E. Abdalla, G. F. Abellan, A. Aboubrhim, et al. Cosmology Intertwined: A Review of the Particle Physics, Astrophysics, and Cosmology Associated with the Cosmological Tensions and Anomalies. – 2022. – ArXiv:2203.06142 .
35. A. G. Riess, W. Yuan, L. M. Macri, et al. A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team. – 2022. – ArXiv:2112.04510.
36. Jordan, P. Zum gegenwärtigen Stand der Diracschen kosmologischen Hypothesen // Zeits. Phys. A. – 1959. – Bd. 157, Nr. 1. – S. 112–121.
37. Brans, C. H.; Dicke, R. H. Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation // Phys. Rev. – 1961. – Vol. 124, no. 3. – P. 925–935.
38. В. Жданов, О. Александров, О. Сташко. Параметр Габбла і потенціал космологічного скалярного поля // Вісник КНУ. Астрономія. – 2020. – №. 61, с. 15–19.
39. В. Жданов, О. Сташко. Параметр Габбла в  $f(R)$ -гравітації // Вісник КНУ. Астрономія. – 2020. – №. 61, с. 22–25.

Надійшла до редколегії 01.11.2021

V. Zhdanov, Dr Hab., Prof.

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

### MODIFICATIONS OF THE STANDARD COSMOLOGICAL MODEL AND "NEW PHYSICS"

*An overview of the problems associated with the possible going beyond the basic cosmological model is given. The focus is mainly on issues related to astronomical observations and the modifications of general relativity, which use a cosmological scalar field or nonlinear in curvature terms in gravitational Lagrangian. The main points are as follows: the problems of flatness and horizon, discussion of the "Hubble Tension" and the simplest known models with one scalar field and the modified gravity. The general opinion is that there is a number of ways to solve problems with the Hubble constant, but none of them explains all the completeness of the observational data. They are either phenomenological in nature or contain arbitrary functions that must be determined from experiment or from some fundamental principles. Therefore, it is natural to first turn to those models that either do not introduce "new entities", or include a minimum number of new physical elements and a minimum number of additional parameters.*

*Key words: standard cosmological model, dark energy, dark matter, scalar field, modified gravity.*