doi: https://doi.org/10.15407/visn2019.12.020

НОВОСЯДЛИЙ
Богдан Степанович —
доктор фізико-математичних наук, професор, директор Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка

ВІДКРИТТЯ, ЩО ДАЛИ ЗМОГУ ПО-НОВОМУ ПОДИВИТИСЯ НА ВСЕСВІТ

Нобелівська премія з фізики 2019 року

8 жовтня Нобелівський комітет при Королівській шведській академії наук оголосив рішення про присудження Нобелівської премії з фізики в 2019 р. Половина премії дісталася канадсько-американському вченому Джеймсу Піблсу (James Peebles) «за теоретичні відкриття у фізичній космології». Другу половину премії поділили між собою швейцарські астрофізики Мішель Майор (Michel Mayor) і Дідьє Кело (Didier Queloz) «за відкриття екзопланети, що обертається навколо сонцеподібної зірки». У цій статті йдеться про першу, так би мовити, «теоретичну» частину премії.

У цій статті коротко висвітлимо ті теоретичні відкриття Джеймса Піблса (James Peebles), які становлять сьогодні основу фізичної космології і перетворили науку про Всесвіт як ціле зі спекулятивно-філософської галузі знань середини минулого століття на сучасну респектабельну науку, що ґрунтується на надійних теоретичних та експериментальних методах досліджень.

Першим видатним, рівня Нобелівської премії, результатом Джеймса Піблса були його роботи, пов'язані з відкриттям реліктового випромінювання. Існування такого випромінювання було передбачено Георгієм Гамовим та його учнями Р. Алфером і Р. Германом ще в 1948 р. [1, 2]. Однак до робіт А. Дорошкевича і І. Новікова (квітень 1964 р.) [3] та Ф. Гойла і Р. Тейлера (вересень 1964 р.) [4] панувала думка, що воно не піддається реєстрації через переважаюче за інтенсивністю випромінювання зір та міжзоряного газу Галактики. В цих роботах було вказано на існування «вікна» у спектрі електромагнітного випромінювання Галактики, в якому теплове реліктове випромінювання переважає і його можна зареєструвати, а саме, в діапазоні довжин хвиль ~1–10 см.

Група з Принстонського університету у складі Р. Діке, Дж. Піблса, П. Ролла та Д. Вілкінсона негайно розпочала роботу над створенням радіометра для реєстрації випромінювання на довжині хвилі 3 см. Однак весною 1965 р. до них звернув-

ся Арно Пензіас з лабораторії Белла з проханням допомоги в інтерпретації неусувного шуму неба з температурою 3,5 ± 1 К, який він і Роберт Вільсон реєструють[1] на довжині хвилі 7,5 см при налагодженні рупорної антени для радіоспостережень Галактики. Після ознайомлення з технікою спостережень група визнала експериментальне відкриття реліктового випромінювання тими, хто не знав про передбачення космологів, — Арно Пензіасом (Arno Allan Penzias) і Робертом Вільсоном (Robert Woodrow Wilson).

Домовилися написати дві статті — одну про вимірювання, а другу про його інтерпретацію. Ці статті вийшли у травневому номері *Astrophysical Journal* за 1965 р. [5, 6]. У статті принстонської групи згадано, що це випромінювання було передбачено Г. Гамовим, а також доведено важливість експериментального вимірювання його температури для встановлення космологічної моделі Всесвіту, тестування теорії гравітації, пояснення співвідношення вмісту водню і гелію у Всесвіті.

Було також заявлено про необхідність аналогічних вимірювань температури на інших частотах для перевірки теплового характеру спектра. І це зробила принстонська група, отримавши на довжині хвилі 3,2 см температуру реліктового випромінювання 3,0 ± 0,5 К. Результат опубліковано в березневому номері *Physical Review Letters* за 1966 р. [7]. Стаття надійшла до редакції 27 січня, а отже, серію з 11 вимірів було проведено у тому ж 1965-му! У цій роботі, крім детального опису принстонського радіометра та методики вимірювань, наведено тепловий (чорнотільний) спектр з температурою 3 К і показано, що обидва виміри ідеально на нього лягають. Пізніше було опубліковано вимірювання інших авторів на інших частотах, які підтвердили тепловий характер випромінювання. У 1978 р. за відкриття теплового реліктового випромінювання Арно Пензіаса і Роберта Вільсона було удостоєно Нобелівської премії.

У статті [8], опублікованій у листопадовому номері *Astrophysical Journal* того самого 1965 р., Джеймс Піблс аналізує роль реліктового випромінювання у формуванні галактик. У ній вперше вказано на взаємопов'язаність локальних флуктуацій температури реліктового випромінювання з флуктуаціями густини, з яких формуються галактики, початковими умовами для них, розглянуто їх залежність від просторового масштабу неоднорідностей. Джеймс Піблс покладався в цій роботі на основи релятивістської теорії гравітаційної нестійкості, закладені статтею Євгена Ліфшиця 1946 р. [9]. Ідеї Джеймса Піблса, висловлені у статті [8], стали своєрідним локомотивом стрімкого розвитку і становлення фізичної космології.

Вимірювання температури реліктового випромінювання дало поштовх розвитку кількісної фізичної теорії гарячого Всесвіту, яка описує важливі процеси від початку космологічного нуклеосинтезу (перші секунди після Великого вибуху) до епохи космологічної рекомбінації (кілька сотень тисяч років), коли водень і гелій стали нейтральними і реліктове випромінювання перестало розсіюватися на заряджених частинках первинної вогняної кулі (Primordial Fireball) (тепер цей стан матерії в літературі найчастіше називають баріонфотонною плазмою).

У 1966 р. Джеймс Піблс одним з перших розрахував відносний вміст ізотопів гелію ^{3}He і ^{4}He та дейтерію D [10, 11], синтезованих у ранньому Всесвіті, з урахуванням експериментально визначеної температури реліктового випромінювання. Розрахунок було здійснено для двох значень густини баріонної матерії, які не суперечили тогочасним оцінкам, — критичної при сталій Габбла 100 км/с·Мпк і 4 %-го значення від неї (останнє є близьким до сучасних визначень).

Наступним важливим етапом еволюції Всесвіту є зміна стану баріонної матерії від повністю іонізованої плазми до практично нейтрального газу, прозорого для реліктового випромінювання, — епоха космологічної рекомбінації. У 1967 р. Джеймс Піблс заклав основи теорії космологічної рекомбінації, вперше розв'язав-

[1] Детальніше про історію відкриття реліктового випромінювання та його природу див. журнал «Світогляд», 2010, № 1, с. 10.

ши рівняння кінетики іонізації–рекомбінації баріон-фотонної плазми у Всесвіті, який розширюється, з урахуванням енергетичної структури атомів водню. У грудні того самого року він надіслав до журналу *Astrophysical Journal* статтю «Рекомбінація первинної плазми», яку було опубліковано в липневому номері за 1968 р. [12]. В ній Дж. Піблс показав, що рекомбінація розпочалася, коли температура первинної плазми впала до 5000 К, і практично завершилася за температури ~3000 К, що відповідає діапазону червоних зміщень ~1800–1000. Залишкова, або загартувальна, іонізація, зумовлена розширенням Всесвіту, за його підрахунками становила $2\cdot10^{-5}$–$2\cdot10^{-4}$. Ця робота відкрила шлях для розбудови кількісної теорії анізотропії реліктового випромінювання.

Основи теорії анізотропії реліктового випромінювання заклали Райнер Сакс і Артур Вольф [13], розв'язавши загальнорелятивістську задачу поширення електромагнітного випромінювання зі сфери останнього розсіювання реліктового випромінювання з урахуванням великомасштабних (>1000 Мпк) збурень густини і швидкості баріон-фотонної плазми та метрики простору-часу. Анізотропія, зумовлена гравітаційним потенціалом лінійних збурень густини на сфері останнього розсіювання, здобула назву ефекту Сакса–Вольфа, а спричинені зміною гравітаційного потенціалу лінійних збурень густини в моделях з космологічною сталою чи кривиною 3-простору називають інтегральним ефектом Сакса–Вольфа.

Нелінійний ефект Сакса–Вольфа — просторові флуктуації реліктового випромінювання, зумовлені гравітаційним полем об'єктів великомасштабної структури Всесвіту, скупчень галактик чи великих порожнин, було вивчено Мартіном Рісом і Деннісом Шамою у 1968 р. [14] і має назву ефекту Ріса–Шами. У тому ж році Джозеф Сілк [15] розв'язав задачу дифузії квантів реліктового випромінювання в області збурень і показав існування експоненціального загасання амплітуди збурень густини баріонної компоненти на масштабах мас $<10^{11}$ мас Сонця. Такий масштаб загасання тепер у літературі називають масштабом Сілка. Задачу спотворення теплового спектра реліктового випромінювання при його проходженні крізь гарячу міжгалактичну плазму скупчень галактик розв'язали Рашид Сюняєв і Яків Зельдович у 1970–1972 рр. [16–18] (ефект Сюняєва–Зельдовича).

Ключовою для подальших теоретичних і експериментальних досліджень анізотропії реліктового випромінювання виявилася стаття Дж. Піблса і Дж. Ю 1970 р. «Первинні адіабатичні збурення у Всесвіті, який розширюється» [19]. Для детального розрахунку еволюції космологічних збурень густини і швидкості баріон-фотонної плазми через епоху космологічної рекомбінації автори вперше розв'язали чисельним методом систему рівнянь Больцмана для функції розподілу фотонів з інтегралом зіткнень, що враховує їх томсонівське розсіювання на вільних електронах. Припустивши, що первинні збурення, з яких утворюються галактики і скупчення галактик, є адіабатичними і мають масштабно-інваріантний спектр потужності, вони розрахували очікувану амплітуду флуктуацій температури реліктового випромінювання в кількох кутових масштабах для відкритої моделі Всесвіту ($\rho_m = 0{,}03\rho_{cr}$), плоскої ($\rho_m = \rho_{cr}$), закритої ($\rho_m = 5\rho_{cr}$) і для моделі Бранса–Діке з параметром зв'язку $\omega = 5$. Важливим результатом цієї роботи була можливість розрізнення моделей Всесвіту за спостережуваним спектром потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання.

Після цих публікацій Джеймса Піблса та інших не згаданих тут авторів розпочалися активні спроби реєстрації просторової анізотропії наземними, стратосферними та космічними телескопами мікрохвильового діапазону. Найуспішнішими були космічні місії COBE (COsmic Background Explorer, 1989–1993), WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2001–2009) та Planck (2009–2013)[2]. Щодо місії COBE, варто нагадати, що за доведення теплового характеру спектра реліктового випромінювання за допомогою приладу FIRAS

[2] Детальний опис двох останніх місій можна знайти в журналі «Світогляд» (№ 1 за 2010 р. і № 4 за 2017 р.).

(Far-InfraRed Absolute Spectrophotometer) та першу реєстрацію флуктуацій температури реліктового випромінювання (ефект Сакса–Вольфа) за допомогою приладу DMR (Differential Microwave Radiometer) у 2006 р. Джона Мезера (John C. Mather) та Джорджа Смута (George F. Smoot) було відзначено Нобелівською премією з фізики.

На початку 1980-х років у космології виникла криза темної матерії. Верхня межа допустимих флуктуацій температури реліктового випромінювання стала помітно нижчою за ту, яка необхідна у Всесвіті, в якому є тільки баріонна матерія. Узгодити факт існування галактик і скупчень галактик з малою амплітудою флуктуацій реліктового випромінювання можна, якщо припустити, що темна матерія, існування якої допускалося ще у 1920-х — 1930-х роках і отримало незаперечні спостережувані аргументи у 1970-х роках, має небаріонну природу, тобто не бере участі у сильній та електромагнітній взаємодіях. Серед відомих елементарних частинок такими могли б бути нейтрино, якщо їх маса спокою не є нульовою, як у фотонів. Однак скоро з'ясувалося, що у світі з такою темною матерією ієрархія елементів великомасштабної структури відмінна від спостережуваної. Джеймс Піблс у 1982 р. у роботі «Великомасштабні коливання температури мікрохвильового фону і маси в моделі з масштабно-інваріантним спектром первинних збурень» [20] першим довів, що якщо масивні частинки не були релятивістськими в ранньому Всесвіті, то розрахована амплітуда флуктуацій температури реліктового випромінювання стає значно нижчою за тогочасні верхні обмеження. Його оцінка середньоквадратичного значення $\Delta T/T$ для кутового масштабу 10° становила $5 \cdot 10^{-6}$, що дуже добре узгоджується з першим експериментальним вимірюванням, проведеним на космічній обсерваторії COBE у 1992 р. [21], через десять років (!). Така темна матерія здобула назву холодної (cold dark matter — CDM) [22, 23] і досі є важливим елементом моделі Всесвіту.

У статті «Тести космологічних інфляційних моделей», опублікованій в *Astrophysical Journal* у 1984 р., Джеймс Піблс пропонує шлях до розв'язання ще однієї ключової проблеми тогочасної космології: пошук такої моделі Всесвіту, в якій визначення середньої густини, кривини 3-простору, сталої Габбла (темпу розширення) та віку найстаріших зір Галактики узгоджуватимуться між собою з певним «запасом міцності».

Річ у тім, що інфляційні моделі ранього Всесвіту, створені на початку 1980-х років [25–32], передбачають дуже малу, практично нульову, кривину 3-простору, а це означає, що середня густина близька до критичної. Її оцінки за просторовим розподілом і пекулярними швидкостями галактик та їх скупчень дають величину не меншу за 10 % від критичної. Вік Всесвіту в такій моделі за сталої Габбла 75–100 км/с · Мпк становить 8–12 млрд років, тоді як вік найстаріших зір у кулястих скупченнях Галактики не менший ніж 13 млрд років. Джеймс Піблс пропонує «повернути» в науку про Всесвіт космологічну сталу Λ, введену в загальну теорію відносності А. Ейнштейном у 1917 р., але відкинуту в 1960-х роках через відсутність фізичної інтерпретації для неї та проблему тонкого налаштування в ранньому Всесвіті. Наголошуючи на тому, що її значення може бути встановлено тільки на основі емпіричних даних, а не суто теоретичних аргументів, він показує, що в космологічних моделях з додатнім значенням Λ згадані неузгодженості послаблюються або навіть взагалі зникають.

Модель з космологічною сталою та холодною темною матерією, ΛCDM, є основною й сьогодні. Густина, що відповідає додатному значенню космологічної сталої, доповнює повну густину до критичної і робить кривину 3-простору нехтовно малою. Вік Всесвіту стає більшим за вік найстаріших зір, оскільки його розширення відбувається з прискоренням. Джеймс Піблс пропонує ряд спостережуваних тестів, які мали б дати відповідь на питання, яким є наш Всесвіт. Серед них — співвідношення відстань — червоне зміщення. Такий тест, а саме співвідношення відстань за світністю — червоне зміщення для наднових типу Ia, було реалізовано у 1990-х роках двома науковими

групами — High-z Supernova Search Team (наукові керівники — Браян Шмідт і Адам Ріcс) і Supernova Cosmology Project (науковий керівник — Сол Перлматтер). У 1998 р. майже одночасно надіслані до журналів результати [33–35] підтвердили, що наш Всесвіт розширюється з прискоренням, а на космологічну сталу чи щось до неї подібне припадає найбільша частка середньої густини Всесвіту, близько 70% від загальної. За експериментальне відкриття прискореного розширення Всесвіту на основі вивчення наднових типу Ia Сола Перлматтера (Saul Perlmutter), Браяна Шмідта (Brian P. Schmidt) і Адама Ріcca (Adam Riess) було удостоєно Нобелівської премії за 2011 р.

Невизначена фізична природа сталої Λ, напевно, породжувала сумніви і змушувала шукати альтернативні фізичні сутності, які б проявляли себе подібно до космологічної сталої. У 1988 р. у спільній з Бхаратом Ратрою статті [36] Джеймс Піблс показує, що скалярне поле φ із канонічним лагранжіаном та степеневим потенціалом $V\sim\varphi^{-\alpha}$ діє як загасаюча космологічна стала.

У наступній великій статті [37], опублікованій того самого року в *Physical Review D*, автори дослідили космологічні наслідки самодіючого скалярного поля з нелінійним потенціалом, яке скочується до мінімуму потенціальної енергії. Показано, якщо таке поле у сучасну епоху домінує за густиною, то в минулому воно було субдомінантним за густиною і практично не впливало ані на космологічний нуклеосинтез, ані на космологічну рекомбінацію, ані на ранні етапи формування структури Всесвіту. В пізні епохи воно проявляє себе як космологічна стала, але з динамікою розширення, яка визначається потенціалом. Ця стаття зініціювала величезний потік робіт, присвячених пошукам альтернатив космологічній сталій, який і досі не вщухає, і стала однією з найцитованіших публікацій Джеймса Піблса.

Отже, завдяки своєму багатогранному таланту вченого-універсала, титанічній праці та плідним ідеям Джеймс Піблс зробив величезний внесок у становлення сучасної фізичної космології. Я процитував тут тільки десять його найвагоміших статей, які, на мою думку, найбільше вплинули на розвиток космології, а також на долі молодших колег-науковців, які продовжували розвивати його ідеї. У базі даних Гарвардського університету (adsabs.harvard.edu), яка є найповнішою в галузі астрофізики і космології, налічується більш як 350 статей Джеймса Піблса, з яких понад 180 він написав самостійно. Він є також автором чи співавтором 12 монографій: «Cosmology» (1967), «Microwave Radiation from the Big Bang» (1967), «Physical cosmology» (1971), «The large-scale structure of the universe» (1980), «Cosmic Black-Body Radiation» (1988, спільно з Р. Діке, П. Ролом і Д. Вілкінсоном), «The statistics of the distributions of galaxies, mass and peculiar velocities» (1988), «Quantum mechanics» (1992), «Principles of Physical Cosmology» (1993), «The case for the relativistic hot Big Bang cosmology» (1996, спільно з Д. Шрамом, Е. Тарнером і Р. Кроном), «The Evolution of the Universe» (1996, спільно з Д. Шрамом, Е. Тарнером і Р. Кроном), «Finding the Big Bang» (2009, спільно з Л. Пейджем і Р. Партриджем), «The Cosmological Tests» (2014). Майже всі вони є настільними книгами для космологів усього світу, а деякі з них перевидано іншими мовами.

Цитовані тут статті Джеймса Піблса є фундаментом сучасної фізичної космології, дороговказом для теоретиків та експериментаторів. Усі попередні Нобелівські премії з космології (1978, 2006, 2011) так чи інакше пов'язані з його роботами. Тому можна впевнено сказати, що цьогорічну Нобелівську премію присуджено справжньому гуру сучасної космології.

Академічна спільнота України щиро вітає Джеймса Піблса із заслуженою нагородою.

Філіп Джеймс Едвін Піблс (Phillip James Edwin Peebles)
Фото: Denise Applewhite/ Princeton University

Джеймс Піблс *народився 25 квітня 1935 р. в канадському місті Вінніпег, адміністративному центрі провінції Манітоба. Батько працював на Вінніпезькій зерновій біржі, мати — домогосподарка. Навчався в Університеті Манітоби, де здобув ступінь бакалавра. У 1958 р. вступив в аспірантуру Принстонського університету і в 1962 р. під керівництвом відомого фізика Роберта Діке (Robert H. Dicke) захистив дисертацію PhD. Відтоді протягом усієї своєї наукової кар'єри Джеймс Піблс працює у Принстоні. Нині він почесний професор імені Альберта Ейнштейна (Albert Einstein Professor of Science Emeritus).*

Заклав основи фізичної космології, зробив значний внесок у розроблення моделі Великого вибуху, разом з Р. Діке та ін. передбачив існування космічного фонового випромінювання, дослідив його властивості, навів докази наявності великої кількості темної матерії тощо. Його книга «Principles of Physical Cosmology» (Принципи фізичної космології) відіграла велику роль у становлення космології як науки.

Член Американської академії мистецтв і наук (American Academy of Arts and Sciences), Американського фізичного товариства (American Physical Society), Королівського товариства (Royal Society of London for Improving Natural Knowledge), Королівського товариства Канади (Royal Society of Canada), Національної академії наук США (United States National Academy of Sciences), Американського філософського товариства (American Philosophical Society), Американського астрономічного товариства (American Astronomical Society), Американської асоціації сприяння розвитку науки (American Association for the Advancement of Science).

Наукові здобутки Джеймса Піблса відзначено багатьма нагородами:

- *медаль Еддінгтона (Eddington Medal) Королівського астрономічного товариства (1981);*
- *премія Гайнемана з астрофізики (Dannie Heineman Prize for Astrophysics) Американського астрономічного товариства та Американського інституту фізики (1982);*
- *премія Генрі Норріса Рассела (Henry Norris Russell Lectureship) Американського астрономічного товариства (1992);*
- *Золота медаль Кетрін Брюс (Catherine Wolfe Bruce Gold Medal) Тихоокеанського астрономічного товариства (1995);*
- *медаль Оскара Клейна (Oskar Klein Memorial Lecture and Medal) (1997);*
- *Золота медаль Королівського астрономічного товариства (Велика Британія) (1998);*
- *премія Грубера в галузі космології (Gruber Prize in Cosmology) (2000);*
- *премія Харві (Harvey Prize) Ізраїльського технологічного інституту (Техніон) (2001);*
- *премія Шао (Shaw Prize) з астрономії (Гонконг) (2004);*
- *премія Крафорда (Crafoord Prize) Шведської королівської академії наук (2005);*
- *медаль Дірака Міжнародного центру теоретичної фізики (Dirac Medal of the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics) (2013).*

REFERENCES
[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Gamow G. The Evolution of the Universe. *Nature*. 1948. **162**(4122): 680. DOI: http://dx.doi.org/10.1038/162680a0
2. Alpher R.A., Herman R.C., Gamow G.A. Thermonuclear Reactions in the Expanding Universe. *Phys. Rev*. 1948. **74**(9): 1198. DOI: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.74.1198.2
3. Doroshkevich A.G., Novikov I.D. Mean radiation density in Metagalaxy and some problems of relativistic cosmology. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1964. **154**(4): 809.
[Дорошкевич А.Г., Новиков И.Д. Средняя плотность излучения в Метагалактике и некоторые вопросы релятивистской космологии. *Докл. АН СССР*. 1964. Т. 154, № 4. С. 809–811.]
4. Hoyle F., Tayler R.J. The Mystery of the Cosmic Helium Abundance. *Nature*. 1964. **203**(4950): 1108. DOI: http://dx.doi.org/10.1038/2031108a0
5. Dicke R.H., Peebles P.J.E., Roll P.G., Wilkinson D.T. Cosmic Black-Body Radiation. *Astrophys. J*. 1965. **142**(5): 414. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/148306
6. Penzias A., Wilson R. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *Astrophys. J*. 1965. **142**(5): 419. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/148307
7. Roll P.G., Wilkinson D.T. Cosmic Background Radiation at 3.2 cm-Support for Cosmic Black-Body Radiation. *Phys. Rev. Lett*. 1966. **16**(3): 405. DOI: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.405
8. Peebles P.J.E. The Black-Body Radiation Content of the Universe and the Formation of Galaxies. *Astrophys. J*. 1965. **142**(11): 1317. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/148417
9. Lifshitz E.M. On the gravitational stability of the expanding universe. *JETP*. 1946. **16**: 587.
[Лифшиц Е.М. О гравитационной устойчивости расширяющегося мира. *ЖЭТФ*. 1946. Т. 16. С. 587–602.]
10. Peebles P.J.E. Primeval Helium Abundance and the Primeval Fireball. *Phys. Rev. Lett*. 1966. **16**(10): 410. DOI: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.410
11. Peebles P.J.E. Primordial Helium Abundance and the Primordial Fireball. II. *Astrophys. J*. 1966. **146**(11): 546. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/148918
12. Peebles P.J.E. Recombination of the Primeval Plasma. *Astrophys. J*. 1968. **153**(7): 1. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/149628
13. Sachs R.K., Wolfe A.M. Perturbations of a Cosmological Model and Angular Variations of the Microwave Background. *Astrophys. J*. 1967. **147**(1): 73. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/148982
14. Rees M.J., Sciama D.W. Large-scale Density Inhomogeneities in the Universe. *Nature*. 1968. **217**(5128): 511. DOI: http://dx.doi.org/10.1038/217511a0
15. Silk J. Cosmic Black-Body Radiation and Galaxy Formation. *Astrophys. J*. 1968. **151**(2): 459. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/149449
16. Sunyaev R.A., Zeldovich Ya.B. The Spectrum of Primordial Radiation, its Distortions and their Significance. *Comments Astrophys. Space Phys*. 1970. **2**(3): 66.
17. Sunyaev R.A., Zeldovich Ya.B. Small-Scale Fluctuations of Relic Radiation. *Astrophysics and Space Science*. 1970. **7**(1): 3. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00653471
18. Sunyaev R.A., Zeldovich Ya.B. The Observations of Relic Radiation as a Test of the Nature of X-Ray Radiation from the Clusters of Galaxies. *Comments Astrophys. Space Phys*. 1972. **4**(11): 173.
19. Peebles P.J.E., Yu J.T. Primeval adiabatic perturbation in an expanding Universe. *Astrophys. J*. 1970. **162**(12): 815. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/150713
20. Peebles P.J.E. Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations. *Astrophys. J*. 1982. **263**: L1. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/183911
21. Smoot G.F. et al. Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J. Lett*. 1992. **396**: L1. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/186504
22. Bond J.R., Szalay A.S. The collisionless damping of density fluctuations in an expanding universe. *Astrophys. J*. 1983. **274**: 443. DOI: http://dx.doi.org/10.1086/161460
23. Blumenthal G.R., Faber S.M., Primack J.R., Rees M.R. Formation of galaxies and large-scale structure with dark matter. *Nature*. 1984. **311**(5986): 517. DOI: http://dx.doi.org/10.1038/311517a0
24. Peebles P.J.E. Tests of cosmological models constrained by inflation. *Astrophys. J*. 1984. **284**: 439. http://dx.doi.org/10.1086/162425
25. Starobinskii A.A. Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe. *JETP Lett*. 1979. **30**(11): 682.

[Старобинский А.А. Спектр реликтового гравитационного излучения и начальное состояние Вселенной. *Письма в ЖЭТФ*. 1979. Т. 30, № 11. С. 719–722.]
26. Starobinsky A.A. A new type of isotropic cosmological models without singularity. *Phys. Lett. B*. 1980. **91**(1): 99. DOI: https://doi.org/10.1016/0370-2693(80)90670-X
27. Mukhanov V.F., Chibisov G.V. Quantum fluctuations and a nonsingular universe. *JETP Lett*. 1981. **33**: 532. [Муханов В.Ф., Чибисов Г.В. Квантовые флуктуации и «несингулярная» Вселенная. *Письма в ЖЭТФ*. 1981.Т. 33. С. 549–553.]
28. Guth A.H. Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Phys. Rev. D*. 1981. **23**: 347. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.23.347
29. Sato K. First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe. *Mon. Not. R. Astron. Soc*. 1981. **195**: 467. DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/195.3.467
30. Linde A.D. A new inflationary universe scenario: a possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems. *Phys. Lett. B*. 1982. **108**: 389. DOI: https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)91219-9
31. Hawking S.W., Moss I.L. Supercooled phase transitions in the very early universe. *Phys. Lett. B*. 1982. **110**: 35. DOI: https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)90946-7
32. Albrecht A., Steinhardt P. Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking. *Phys. Rev. Lett*. 1982. **48**: 1220. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.48.1220
33. Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *Astron. J*. 1998. **16**: 1009. DOI: https://doi.org/10.1086/300499
34. Schmidt B.P., Suntzeff N.B., Phillips M.M. et al. The High-Z Supernova Search: Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type IA Supernovae. *Astrophys. J*. 1998. **507**: 46. DOI: https://doi.org/10.1086/306308
35. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. *Astrophys. J*. 1999. **517**: 565. DOI: https://doi.org/10.1086/307221
36. Peebles P.J.E., Ratra B. Cosmology with a Time-Variable Cosmological "Constant". *Astrophys. J*. 1988. **325**: L17. DOI: https://doi.org/10.1086/185100
37. Ratra B., Peebles P.J.E. Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field. *Phys. Rev. D*. 1988. **37**: 3406. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.37.3406

B.S. Novosyadlyj

Ivan Franko National University of Lviv

DISCOVERIES THAT GAVE A FRESH LOOK AT THE UNIVERSE

2019 Nobel Prize in Physics

On October 8, the Nobel Committee at the Royal Swedish Academy of Sciences announced the decision to award the Nobel Prize in Physics in 2019. Half of the award went to Canadian-American scientist James Peebles "for theoretical discoveries in physical cosmology." The second half of the award was shared by Swiss astrophysicists Michel Mayor and Didier Queloz "for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star." This article is about the first, so to speak, "theoretical" part of the award.