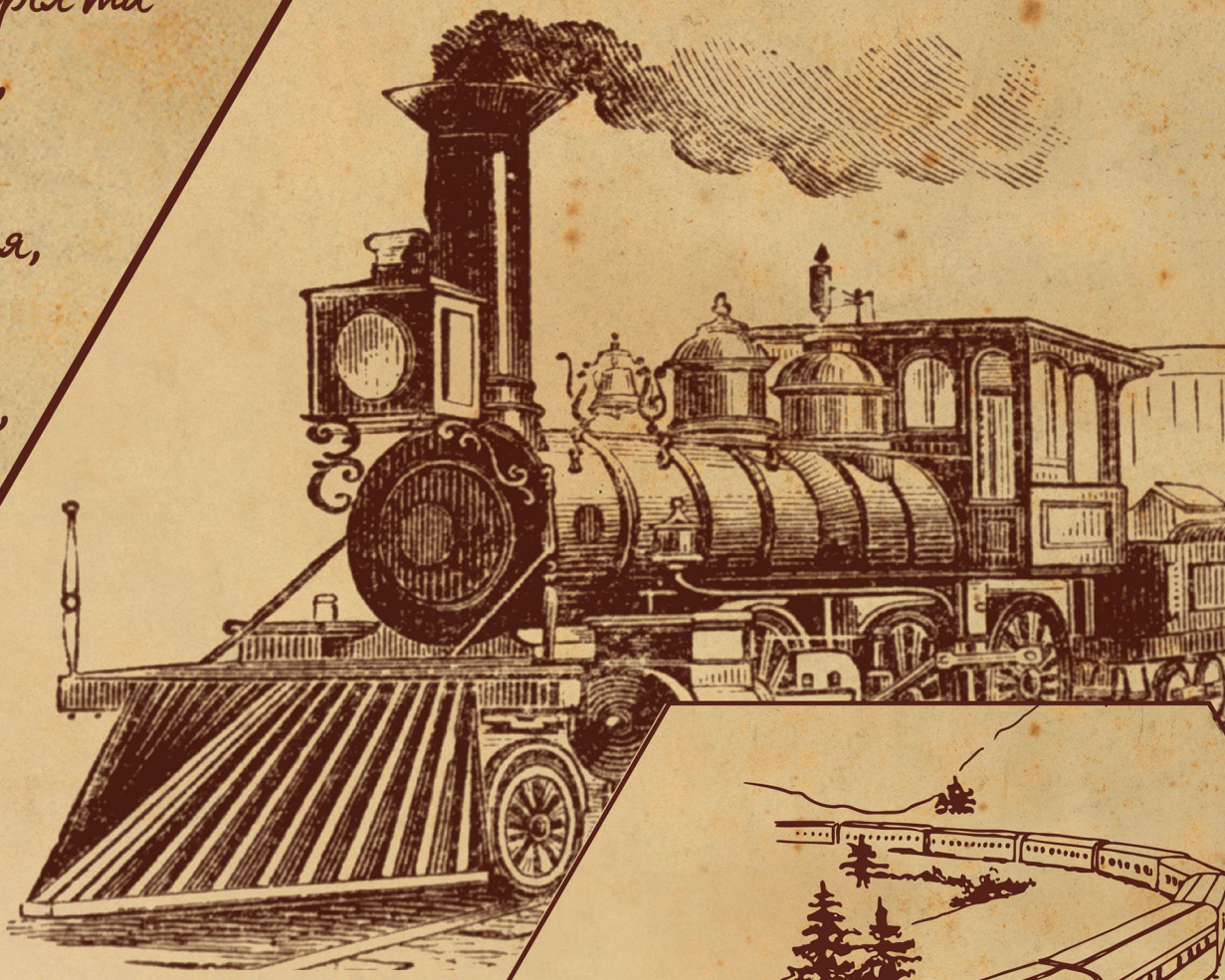
Наукові перспективи
Видавнича група

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ У СУЧАСНІЙ НАУЦІ

№3(33)
2025

Серія: історія та археологія, державне управління, економіка, педагогіка, техніка, право





Всеукраїнська асамблея докторів наук з державного управління
Асоціація науковців України
Науковий парк Національного Авіаційного Університету

у рамках роботи Видавничої групи «Наукові перспективи»

«Актуальні питання у сучасній науці»

(Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія Економіка»,
Серія «Державне управління», Серія «Техніка»,
Серія «Історія та археологія»)

Випуск № 3(33) 2025

Київ – 2025

Ukrainian Assembly of Doctors of Sciences in Public Administration
Association of Scientists of Ukraine
Scientific Park of the National Aviation University

within the work of the Publishing Group "Scientific Perspectives"

«Current issues in modern science»

("Pedagogy" Series, "Law" Series, Economy Series, "Public Administration" Series, "Technology" Series, "History and Archeology" Series)

Issue № 3(33) 2025

Kyiv – 2025

ISSN 2786-6300 Print

УДК 001.32:1 /3](477)(02)

DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6300-2025-3(33)

«Актуальні питання у сучасній науці (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія Економіка», Серія «Державне управління», Серія «Техніка», Серія «Історія та археологія»)»: журнал. 2025. № 3(33) 2025. С. 1261.

Свідоцтво про державну реєстрацію Серія Серія КВ № 25116-15056Р.

Згідно наказу Міністерства освіти і науки України 10.10.2022 № 894 журналу присвоєні категорії "Б" із з права (спеціальність - 081 Право), економіки (спеціальність - 076 Підприємництво та торгівля), педагогіки (спеціальність - 014 Середня освіта) та державного управління (спеціальність - 281 Публічне управління та адміністрування).

Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 20.02.2023 № 185 журналу присвоєно категорію "Б" із історії та археології (спеціальність - 032 Історія та археологія)

Рекомендовано до друку Президією Всеукраїнської Асамблеї докторів наук з державного управління (Рішення від 11.03.2025, № 6/3-25).

Журнал видається за підтримки Інституту філософії та соціології Національної Академії Наук Азербайджану (Баку, Азербайджан), Міждержавної гільдії інженерів консультантів, громадської організації «Християнська академія педагогічних наук України» та громадської організації «Всеукраїнська асоціація педагогів і психологів з духовно-морального виховання».

Журнал публікує оригінальні дослідницькі та оглядові розвідки з теоретичних та прикладних аспектів державного управління, права, економіки, історії, педагогіки, техніки для їх інтеграції у європейський, світовий науковий простір. Цільова аудиторія: науковці, працівники вищих навчальних закладів та наукових інституцій, здобувачі вищої освіти, а, також фахівці тематики журналу.

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (IC), міжнародної пошукової системи Google Scholar та до міжнародної наукометричної бази даних Research Bible.



Головний редактор: Дацій Олександр Іванович - доктор економічних наук, професор, Заслужений працівник освіти України, завідувач кафедри фінансів, банківської та страхової справи Міжрегіональної академії управління персоналом (Київ, Україна)

Редакційна колегія:

- Балалаєва (Дорошенко) Катерина Вікторівна - кандидат технічних наук, доцент кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Бельська Тетяна Валентинівна - доктор наук з державного управління, доцент, завідувач кафедри менеджменту Інституту підготовки кадрів державної служби зайнятості (Київ, Україна)
- Будник Вікторія Анатоліївна - кандидат економічних наук, професор, професор кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій Державного університету інфраструктури та технологій (Київ, Україна)
- Гбур Зоряна Володимирівна - доктор наук з державного управління, професор, професор кафедри управління охороною здоров'я та публічного адміністрування Національного університету охорони здоров'я України імені П.Л.Шупика (Київ, Україна)
- Герасименко Юлія Сергіївна - доктор економічних наук, доцент, професор кафедри педагогіки, психології та менеджменту Білоцерківського інституту неперервної професійної освіти Державного закладу вищої освіти «Університет менеджменту освіти» Національної академії педагогічних наук України (Біла Церква, Україна)
- Дегтяр Олег Андрійович — доктор наук з державного управління, доцент, доцент кафедри менеджменту і адміністрування Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова (Харків, Україна)
- Закієв Ісламу Муса-Огли - старший науковий співробітник кафедри підтримання льотної придатності авіаційної техніки Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Заячківська Оксана Василівна - кандидат економічних наук, доцент кафедри фінансів та економічної безпеки Національного університету водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)
- Іванченко Євгенія Вікторівна — кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри безпеки інформаційних технологій Національного авіаційного університету (Київ, Україна)

- Ігнатович Сергій Ромуальдович - доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Ільїна Анастасія Олександрівна - кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри публічного управління і адміністрування Національного торговельно-економічного університету (Київ, Україна)
- Ісайкіна Олена Дмитрівна - кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри історії та документознавства Національного авіаційного університету, член Спілки краєзнавців України (Київ, Україна)
- Кавиліна Ганна Костянтинівна – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри сімейної та спеціальної педагогіки і психології Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського» (Одеса, Україна)
- Кардаш Оксана Любомирівна — кандидат економічних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Навчально-наукового інституту автоматики, кібернетики та обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне, Україна)
- Карускевич Михайло Віталійович - доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Катеринчук Іван Степанович - доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікаційних та інформаційних систем Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького (Хмельницький, Україна)
- Кінзерявий Василь Миколайович — кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Коваленко Валентин Васильович - доктор юридичних наук, професор, провідний науковий співробітник сектору авторського права та суміжних прав лабораторії авторського права та інформаційних технологій Науково–дослідного центру судової експертизи з питань інтелектуальної власності Міністерства юстиції України (Київ, Україна)
- Ковтун Владислав Юрійович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Комнатний Сергій Олександрович - докторант кафедри філософії права та юридичної логіки Національної академії внутрішніх справ (Київ, Україна)
- Корченко Анна Олександрівна — доцент кафедри безпеки інформаційних технологій Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Корченко Олександр Григорович — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки інформаційних технологій Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Котельницький Назар Анатолійович - кандидат історичних наук, доцент кафедри права Чернігівського інституту інформації, бізнесу та права Міжнародного науково - технічного університету імені академіка Юрія Бугая, член - кореспондент Центру українських досліджень Інституту Європи РАН (Чернігів, Україна)
- Кошетар Уляна Петрівна - кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри української мови та культури Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Кошова Світлана Петрівна — кандидат наук з державного управління, доцент, доцент кафедри управління охорони здоров'я Національного університету охорони здоров'я України імені П.Л.Шупика (Київ, Україна)
- Кравчук Володимир Миколайович — доктор юридичних наук, доцент, доцент кафедри конституційного, адміністративного та міжнародного права Волинського національного університету імені Лесі Українки (Луцьк, Україна)
- Кризина Наталія Павлівна – доктор наук державного управління, професор, Заслужений лікар України, директор Навчально-Наукового медичного інституту Київського міжнародного університету (Київ Україна)
- Куриш Наталія Костянтинівна – кандидат педагогічних наук, заступник директора з науково-навчальної роботи, Інститут післядипломної педагогічної освіти Чернівецької області (Чернівці, Україна)
- Марушева Олександра Анатоліївна - доктор наук з державного управління, доцент, завідувач кафедри публічного управління та інформаційного менеджменту ПВНЗ Університет Новітніх Технологій (Київ, Україна)
- Маслак Тетяна Петрівна - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Матяш Ольга Іванівна - доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри алгебри і методики навчання математики Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського (Вінниця, Україна)
- Миргород-Карпова Валерія Валеріївна - кандидат юридичних наук, заступник директора з наукової роботи, старший викладач кафедри адміністративного, господарського права та фінансово-економічної безпеки Сумського державного університету (Суми, Україна)
- Михайленко Любов Федорівна - доктор педагогічних наук, доцент, доцент кафедри алгебри і методики навчання математики Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського (Вінниця, Україна)
- Михальчук Роман Юрійович - кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри всесвітньої історії Рівненського державного гуманітарного університету (Рівне, Україна)
- Мізюк Вікторія Анатоліївна – кандидат педагогічних наук, доцент, декан факультету управління, адміністрування та інформаційної діяльності Ізмаїльського державного гуманітарного університету (Ізмаїл, Україна)
- Мірошніченко Валентина Іванівна - доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри психології, педагогіки та соціально-економічних дисциплін Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького (Хмельницький, Україна)
- Міхальський Томаш — доктор наук, доцент кафедри географії регіонального розвитку Гданського університету (Польща)
- Ніколаєв Микола Ілліч - доктор історичних наук, професор кафедри історії на методики її навчання Ізмаїльського державного гуманітарного університету (Одеса, Україна)
- Новак-Каляєва Лариса Миколаївна — доктор наук з державного управління, професор, професор кафедри державного управління Львівського регіонального інституту державного управління Національної академії державного управління при Президентові України (Львів, Україна)
- Огієнко Альона Володимирівна - доктор економічних наук, доцент кафедри організації авіаційних робіт та послуг Національного авіаційного університету (Київ, Україна)

- Оніщенко Наталія Миколаївна - доктор юридичних наук, професор, Заслужений юрист України, академік НАПрН України, завідувач відділу теорії держави і права Інституту держави і права ім. В.М.Корецького НАН України (Київ, Україна)
- Орлова Наталія Сергіївна — доктор наук з державного управління, професор кафедри державного управління, публічного адміністрування та регіональної економіки, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця (Харків, Україна)
- Павлов Костянтин Володимирович — доктор економічних наук, професор, професор кафедри аналітичної економіки та природокористування Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки (Київ, Україна)
- Павлова Олена Миколаївна - доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри економіки, підприємництва та маркетингу Волинського національного університету імені Лесі Українки (Луцьк, Україна)
- Палічук Юрій Іванович – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри медицини катастроф та військової медицини Буковинського державного медичного університету (Чернівці, Україна)
- Присяжнюк Олексій Миколайович - кандидат історичних наук, доцент кафедри всесвітньої історії та методології науки ДЗ «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського» (Одеса, Україна)
- Пушкарь Ірина Володимирівна – кандидат наук з державного управління, доцент, професор кафедри обліку та оподаткування Запорізького національного університету, сертифікований аудитор, член Аудиторської Палати України, член громадської організації «Професійна організація аудиторів, бухгалтерів та викладачів ОКД» (Запоріжжя, Україна)
- Робак Ігор Юрійович - доктор історичних наук, професор, завідувач кафедри суспільних наук Харківського національного медичного університету (Харків, Україна)
- Руденко Юлія Анатоліївна - доктор педагогічних наук, доцент, доцент кафедри теорії і методики дошкільної освіти ДЗ "Південноукраїнський національний педагогічний університет імені к.д.ушинського (Одеса, Україна)
- Сидоренко Вікторія Миколаївна —асистент кафедри безпеки інформаційних технологій Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Сирник Ярослав - доцент кафедри етнології та культурної антропології Вроцлавського університету (Вроцлав, Польща)
- Січкаренко Галина Геннадіївна - доктор історичних наук, доцент, професор кафедри документознавства та інформаційної діяльності Державного університету телекомунікацій (Київ, Україна)
- Сопілко Ірина Миколаївна - доктор юридичних наук, професор, Відмінник освіти України, Заслужений юрист України, декан юридичного факультету Національного Авіаційного Університету (Київ, Україна)
- Тарчинська Юлія Георгіївна – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інструментального виконавства Рівненського державного гуманітарного університету (Рівне, Україна)
- Терещенко Юрій Матвійович — доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії в області науки і техніки України, Заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Титко Анна Василівна — кандидат юридичних наук, провідний науковий співробітник Національної академії внутрішніх справ (Київ, Україна)
- Толочко Світлана Вікторівна – доктор педагогічних наук, професор, головний науковий співробітник лабораторії позашкільної освіти Інституту проблем виховання Національної академії педагогічних наук України (Київ, Україна)
- Хитровська Юлія Валентинівна - доктор історичних наук, професор, професор кафедри історії факультету соціології і права Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
- Хохлачова Юлія Євгеніївна — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Чумак Оксана Володимирівна - доктор економічних наук, доцент, науковий співробітник відділу статистики і аналітики вищої освіти Державної наукової установи «Інститут освітньої аналітики», (Київ, Україна)
- Шандра Наталія Андріївна - кандидат педагогічних наук, доцент кафедри іноземних мов для природничих факультетів Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів, Україна)
- Шеремет Інеса Володимирівна - кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри медикобіологічних та валеологічних основ охорони життя і здоров'я Національного педагогічного університету ім. М. П. Драгоманова (Київ, Україна)
- Шологон Лілія Іванівна - доктор історичних наук, доцент, професор кафедри історії Центральної та Східної Європи і спеціальних галузей історичної науки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника (Івано-Франківськ, Україна)
- Якимчук Олег Феодосійович - керівник групи білінгу Відділу бізнес-систем Департаменту інформаційних технологій ПРаТ «Рівнеобленерго» (Рівне, Україна)
- Якушенко Олександр Сергійович — кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету (Київ, Україна)

Статті розміщені в авторській редакції. Відповідальність за зміст та орфографію поданих матеріалів несуть автори.

© автори статей, 2025
© Всеукраїнська асамблея докторів наук з державного управління, 2025
© Асоціація науковців України, 2025
© Науковий парк Національного Авіаційного Університету, 2025
© Видавнича група «Наукові перспективи», 2025

ЗМІСТ

СЕРІЯ «Економіка»

Борса В.В. 17
АДАПТАЦІЯ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ З ЄВРОПЕЙСЬКИМИ СТАНДАРТАМИ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Бурак В.Г. 30
ЦИФРОВА ЕКОНОМІКА ТА ЇЇ РОЛЬ У РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВ СФЕРИ ОБСЛУГОВУВАННЯ: ЗАКОРДОННИЙ ДОСВІД

Коба В.Г., Семенчук Т.Б., Малицький П.Б. 47
РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СТРАТЕГІЙ ПІДПРИЄМСТВА: КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ, ПІДХОДИ ТА ФАКТОРИ УСПІХУ

Короленко О.Б., Рябикіна Н.І., Рябикіна К.Г., Ртищев С.А., Короленко В.В. 60
ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ЯК ЗАСІБ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ

Оніщик А.В. 70
ЕКОНОМІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ПІДПРИЄМНИЦЬКОГО СЕРЕДОВИЩА: ПОНЯТТЯ, СТРУКТУРА, ОЗНАКИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ

Семененко Ю.С., Лозін Б.О. 80
АНАЛІЗ ВЕБ-ПЛАТФОРМ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ТОРГОВИМИ ПІДПРИЄМСТ-ВАМИ

Станіславик О.В., Коваленко О.М., Бадюл В.В. 93
АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНО-АКТИВНИХ ПІДПРИЄМСТВ, ЇХ МОЖЛИВОСТЕЙ І ПОТРЕБ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ДІДЖИТАЛІЗАЦІЇ

Старицький Т.М., Старицький Р.М. 114
ЕКОНОМІКА ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В СФЕРІ МЕДИЧНИХ ПОСЛУГ

Фіалковський А.Е. 126
ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО ЕКОНОМІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Цвіток Н.І., Охрименко І.Б. 139
АНАЛІЗ СТАНУ ЛІКВІДНОСТІ БАНКІВ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ



Шепєлєв В.С., Шарило Ю.Є., Вдовенко Н.М. 155
КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ УПРАВЛІНСЬКОЇ ЗВІТНОСТІ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВ АГРАРНОГО БІЗНЕСУ ДЛЯ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ УКРАЇНИ

Ярошенко С.С., Охрименко І.Б. 167
ВПЛИВ ВАЛЮТНОГО РИЗИКУ НА УПРАВЛІННЯ АКТИВАМИ ТА ПАСИВАМИ БАНКІВ УКРАЇНИ В ПЕРІОД ВІЙНИ

СЕРІЯ «Державне управління»

Kryshnyii P.I. 180
THE ROLE OF SPECIAL FORCES IN COUNTERING PRIVATE MILITARY COMPANIES: TACTICAL ASPECTS AND EXPERIENCE OF MODERN CONFLICT

Бессонова А.В., Бєлобородова М.В. 193
ДЕРЖАВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ВИДАТКІВ НА КУЛЬТУРНУ СПАДЩИНУ УКРАЇНИ

Брич Л.В. 206
ПОСИЛЕННЯ РИЗИКОВОСТІ ПРИ ІНВЕСТУВАННІ У РОЗВИТОК ЛЮДСЬКОГО КАПІТАЛУ: ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ ЧЕРЕЗ МЕХАНІЗМИ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ В УМОВАХ НОВИХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ

Бульба В.Г., Головко О.С. 216
ЗАХИСТ ПРАВ І СВОБОД НЕПОВНОЛІТНІХ ОСІБ: ПРІОРИТЕТНІ НАПРЯМКИ ДІЯЛЬНОСТІ ОРГАНІВ ВЛАДИ СУЧАСНОЇ УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯ ДОСВІДУ США

Головчак М.І., Совтус І.М. 231
СУТНІСТЬ КОНЦЕПЦІЇ УПРАВЛІННЯ ЗНАННЯМИ У СФЕРІ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

Дєгтяр О.А., Вороной О.В. 242
МЕХАНІЗМИ ПУБЛІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ НАУКОВО-ПЕДЕГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ У ВИЩІЙ ШКОЛ

Дєгтяр О.А., Мілевський К.В. 255
ЗАГАЛЬНОСВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЦИФРОВІЗАЦІЇ В УКРАЇНІ

Дєгтяр О.А., Комаров Д.В. 266
КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ДІЯМИ В УМОВАХ ОРГАНІЗАЦІЇ НАЦІОНАЛЬНОГО СПРОТИВУ

Дзюндзюк Б.В. 274
ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЯ БЛОКЧЕЙН-ВІДНОСИН ТА РОЛЬ ДЕРЖАВИ

Драчов О.В., Замрига А.В. 284
ІНСТИТУЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЖНАРОДНОЇ ФІНАНСОВОЇ СИСТЕМИ

Катихін Є.О. 295
ДЕРЖАВНО-УПРАВЛІНСЬКИЙ АСПЕКТ РОЗВИТКУ СОЦІАЛЬНОЇ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ БІЗНЕСУ: КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ

Крутій О.М. 305
РОЛЬ СТЕЙКХОЛДЕРІВ У РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТІВ У СФЕРІ ПУБЛІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Кулініч О.В. 316
СОЦІАЛЬНІ КЛАСТЕРИ У ВІДНОВЛЕННІ ТА РОЗВИТКУ ФІЗКУЛЬ-ТУРНО-СПОРТИВНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

Максимов О.Ю. 329
ФОРМУВАННЯ ДЕРЖАВНОЇ ПОЛІТИКИ РОЗВИТКУ АВІАЦІЙНОЇ ГАЛУЗІ ШЛЯХОМ ОЦІНКИ ЗАГРОЗ ТА УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ АВІАКОМПАНІЙ У НОВОМУ КОМПЛЕКСІ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Мирошниченко А.В. 345
ОСНОВНІ СКЛАДОВІ КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ УДОСКОНАЛЕННЯ ПУБЛІЧНОГО УПРАВЛІННЯ РОЗВИТКОМ ЖИТЛОВО-БУДІВЕЛЬНОЇ СФЕРИ В УКРАЇНІ

Підлісна Т.В. 358
СУЧАСНІ МОДЕЛІ ЛІДЕРСТВА: ЯК КЕРУВАТИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ?

Пурцхванидзе О.В. 369
ДЕРЖАВНА ПОЛІТИКА МУЛЬТИКУЛЬТУРАЛІЗМУ ТА ІСЛАМСЬКИЙ ЧИННИК У ПУБЛІЧНОМУ УПРАВЛІННІ КРАЇН ЄВРОПИ

Пушак Я.Я., Вербицька Г.Л., Дзюрах Ю.М. 382
ФОРМУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОЇ СТРАТЕГІЇ ПІДПРИЄМСТВА У ВЗАЄМОДІЇ З ОРГАНАМИ ПУБЛІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Світлик М.Г. 395
ВАЛЮТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ БАНКІВСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ: ВИКЛИКИ НА МАКРО ТА МІКРОРІВНЯХ В ЕПОХУ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

Сівков С.В. 404
ГЕНЕЗИС ПРАКТИКИ РЕІНТЕГРАЦІЇ ВЕТЕРАНІВ ВІЙНИ В УМОВАХ ОСОБЛИВОГО ПЕРІОДУ



Соколова Е.Т. 417
ВПЛИВ ГЕОПОЛІТИЧНИХ ФАКТОРІВ НА КІБЕРБЕЗПЕКУ ЕЛЕКТРОННОГО УРЯДУВАННЯ

Усенко І.О. 427
СПРИЯННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СПІЛЬНОЇ РИБАЛЬСЬКОЇ ПОЛІТИКИ, ЯК ОДИН ІЗ ПРІОРИТЕТІВ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ: ПЛАНИ НА МАЙБУТНЄ

Шпак Ю.В., Кожина А.В., Драган І.О. 440
ЦИФРОВІЗАЦІЯ ТА СТАНДАРТИЗАЦІЯ У СФЕРІ ПУБЛІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Яременко О.І., Кононенко В.В., Назаренко М.О. 454
МЕДІАЦІЯ У ПУБЛІЧНОМУ УПРАВЛІННІ: ДОСВІД ЗАРУБІЖНИХ КРАЇН

СЕРІЯ «Право»

Абдель Фатах Анна Станіславівна 463
ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ ШЛЮБНИХ ДОГОВОРІВ: ГАРАНТІЇ ЗАХИСТУ МАЙНОВИХ ПРАВ ПОДРУЖЖЯ

Богдан Б.В. 473
КРИТИЧНА ІНФОРМАЦІЙНА ІНФРАСТРУКТУРА ЯК ОБ'ЄКТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ

Бойко А.О. 483
ЗАГАЛЬНІ АСПЕКТИ ТРУДОВИХ ВІДНОСИН У ЯДЕРНІЙ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІЙ ГАЛУЗІ: НАЦІОНАЛЬНИЙ КОНТЕКСТ

Виноградова А.І. 495
МІЖНАРОДНІ НОРМАТИВНО-ПРАВОВІ АКТИ: ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗДІЙСНЕННЯ ПРАВОСУДДЯ ЩОДО НЕПОВНОЛІТНІХ

Гутий Б.В. 508
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ВЛАСНІСТЬ У ЦИФРОВУ ЕПОХУ: СУЧАСНІ ВИКЛИКИ ТА ТЕНДЕНЦІЇ

Гуфенко М.М. 522
СУБ'ЄКТИВНІ ОЗНАКИ НАСИЛЬНИЦЬКОГО ДОНОРСТВА

Дараган В.В., Шендрик Ю.В. 536
ІНСТИТУЦІЙНА СПРОМОЖНІСТЬ ПРОТИДІЇ ПІДРОЗДІЛАМИ НАЦІОНАЛЬНОЇ ПОЛІЦІЇ УКРАЇНИ ЗЛОЧИНАМ ПРОТИ ЖИТТЯ ТА ЗДОРОВ'Я ОСОБИ, УЧИНЕНИХ ЧЛЕНАМИ МОЛОДІЖНИХ НЕФОРМАЛЬНИХ ГРУП (ОБ'ЄДНАНЬ)

Канцір В.С., Смолин Я.В. 549
ОБМЕЖЕННЯ ВОЛІ, ЯК ВИД КРИМІНАЛЬНОГО ПОКАРАННЯ: ПОНЯТТЯ, ОЗНАКИ, ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ВИКОНАННЯ

Кобан О.Г. 559
ВІЙСЬКОВІ ЗЛОЧИНИ ПРОТИ ДІТЕЙ: ПРАВОВІ АСПЕКТИ ТА ПРАКТИКА ПРИТЯГНЕННЯ ДО ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ

Лихова С.Я., Панова О.О. 571
КРИМІНАЛЬНІ ПРАВОПОРУШЕННЯ ПРОТИ ПОРЯДКУ НЕСЕННЯ ВІЙСЬКОВОЇ СЛУЖБИ: ЗА ПРОЄКТОМ НОВОГО КРИМІНАЛЬНОГО КОДЕКСУ УКРАЇНИ

Любарський В.С. 580
СУТНІСТЬ ТРАНСПАРЕНТНОСТІ В ДІЯЛЬНОСТІ ОРГАНІВ ПУБЛІЧНОЇ ВЛАДИ

Максіменцева Н.О. 591
ОСОБЛИВОСТІ ІНСТИТУТІВ ПРЕДСТАВНИЦЬКОЇ ВЛАДИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ: ПРАВОВИЙ АНАЛІЗ

Мельничук О.Ф., Зубенко Д.В. 605
НОРМАТИВНО-ПРАВОВИЙ МЕХАНІЗМ ЗАХИСТУ ДІТЕЙ ВІД БУЛІНГУ

Моргунова Т.І. 613
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПРАВОЗАСТОСУВАННІ: СУЧАСНІ ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Олійник У.М. 629
ОКРЕМІ ПИТАННЯ УКЛАДЕННЯ ТРУДОВИХ ТА ЦИВІЛЬНО-ПРАВОВИХ ДОГОВОРІВ

Поліщук В.А. 639
ДО ТЕОРЕТИКО-ПРАВОВОЇ ВИЗНАЧЕННОСТІ ТА АНАЛІЗУ ФАКТОРІВ ЮРИДИЧНОГО КОНТРОЛЮ

Сірко А.Г. 652
МІСЦЕ ОРГАНІВ НАЦІОНАЛЬНОЇ ПОЛІЦІЇ В СИСТЕМІ СУБ'ЄКТІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХОДІВ ПРАВОВОГО РЕЖИМУ ВОЄННОГО СТАНУ

Ткачук О.В. 661
СУЧАСНІ ДЕТЕРМІНАНТИ ЗЛОЧИННОСТІ У СФЕРІ ОБОРОННИХ ЗАКУПІВЕЛЬ



Фінагеєва І.О. 671
ПРОФЕСІЙНІ (ЗАМІННІ) СІМ'Ї, ЯК ФОРМА ОПІКИ ТА ПІКЛУВАННЯ НАД ДІТЬМИ-СИРОТАМИ, ДІТЬМИ, ПОЗБАВЛЕНИМИ БАТЬКІВСЬКОГО ПІКЛУВАННЯ ТА ДІТЬМИ, ЯКІ ОПИНИЛИСЯ В СКЛАДНИХ ЖИТТЄВИХ ОБСТАВИНАХ

Цицюра В.І. 682
АДМІНІСТРАТИВНА ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ ЗА ПОРУШЕННЯ ВИМОГ АБО НЕВИКОНАННЯ ЗАХОДІВ ОСОБЛИВИХ ПРАВОВИХ РЕЖИМІВ

Шаповал Л.І., Мироненко В.П., Якимець О.І. 694
ВПЛИВ ВОЄННОГО СТАНУ НА РЕАЛІЗАЦІЮ ІНСТИТУТУ ОПІКИ ТА ПІКЛУВАННЯ В УКРАЇНІ

СЕРІЯ «Педагогіка»

Khalabuzar O.A. 708
MODERN TENDENCIES OF ESLL WITHIN MARTIAL LAW CONDITIONS

Бацуровська І.В., Самойленко О.О. 719
ВПРОВАДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ТА АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ У ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НАВЧАЛЬНИМ ПРОЦЕСОМ

Васильєва М.П. 733
ФОРМУВАННЯ АНГЛОМОВНОЇ ЛЕКСИЧНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ МАЙБУТНІХ ПРАВОЗНАВЦІВ

Гонтар З.Г., Луцан Ю.П. 745
ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЯК КОМПОНЕНТ ПРОФЕСІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ ПРАВНИКА

Гунчак О.Ю., Равлюк Т.А. 753
РОЛЬ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ У ФОРМУВАННІ КОМУНІКАТИВНИХ ТА ЕМОЦІЙНИХ НАВИЧОК СТАРШОКЛАСНИКІВ

Данилюк В.О., Руснак В.І., Коваль Л.О. 765
СУЧАСНІ МЕТОДИКИ ВИКЛАДАННЯ ІНОЗЕМНОЇ МОВИ ДЛЯ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 241 «ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННА СПРАВА»

Жукова Ю.В. 775
АНГЛОМОВНЕ ОСВІТНЄ СЕРЕДОВИЩЕ В ЗАКЛАДАХ ФАХОВОЇ ПЕРЕВИЩОЇ ОСВІТИ: ПЕДАГОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА ІННОВАЦІЙНА МОДЕЛЬ

Звєкова В.К. 783
ЦІННОСТІ ТА КОМПЕТЕНТНОСТІ ПРОФЕСІЙНОГО ПРОФІЛЮ ІНКЛЮЗИВНОГО ВЧИТЕЛЯ: КЛЮЧ ДО ЕФЕКТИВНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ ІНКЛЮЗИВНОГО НАВЧАННЯ

Іщенко С.М., Обухов П.О. 792
АНАЛІЗ УСПІШНИХ ПРОЄКТІВ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ У ФАХОВІЙ ПІДГОТОВЦІ БАКАЛАВРІВ ПРОФЕСІЙНОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСВІТИ

Краснобокий Ю.М., Ткаченко І.А., Ільніцька К.С. 800
ФІЗИЧНА ПРИРОДА РЕЛІКТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВСЕСВІТУ (до методики вивчення теми)

Кучай Т.П., Осередчук О.А., Повлін І.Е., Чичук А.П. 819
ПЕДАГОГІЧНА МАЙСТЕРНІСТЬ ЯК ВИЩИЙ РІВЕНЬ ФАХОВОЇ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ УЧИТЕЛІВ

Литньова Т.В., Білошицька Т.Ю. 830
ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ НАВЧАННЯ У ФОРМУВАННІ ІНШОМОВНИХ ЛЕКСИЧНИХ КОМПЕТЕНЦІЙ УЧНІВ ПОЧАТКОВОЇ ШКОЛИ

Лілік О.О. 840
РОЛЬ І МІСЦЕ ВІЗУАЛЬНОЇ ГРАМОТНОСТІ У ФОРМУВАННІ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ СТАРШОКЛАСНИКІВ НА УРОКАХ УКРАЇНСЬКОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Маланчій М.О., Мірошніченко В.І., Башнянин О.В. 852
ПЕДАГОГІЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНО-ЕТИЧНОЇ КУЛЬТУРИ МАЙБУТНІХ ОФІЦЕРІВ В ОСВІТНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗВО

Ороновська Л.Д., Майданюк І.З., Кавун В.М., Міська Г.С., Губ'як Д.В. 862
ФОРМУВАННЯ МУЗИЧНИХ ЦІННОСТЕЙ ПІД ЧАС ВИКЛАДАННЯ МУЗИЧНОГО МИСТЕЦТВА

Пелех В.Ю. 876
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КОГНІТИВНИЙ СКЛАДНИК ЗДАТНОСТІ ДО ЦІННІСНО-СМИСЛОВОЇ САМОРЕГУЛЯЦІЇ МАЙБУТНІХ МЕНЕДЖЕРІВ ОСВІТИ: УМОВИ І ЗАСОБИ ФОРМУВАННЯ

Петухова Т.А., Гармата О.М., Сокотов Ю.В., Купіна О.В., Попов М.Д. 886
ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ МЕТОДІВ НАВЧАННЯ У ДИСЦИПЛІНИ "БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ" ТА "ОХОРОНА ПРАЦІ"

УДК (930.1+929):524.8:378

https://doi.org/10.52058/2786-6300-2025-3(33)-801-818

Краснобокий Юрій Миколайович кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики та інтегративних технологій навчання природничих наук, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань, тел.: (097) 338-30-45, https://orcid.org/0000-0003-2103-9978

Ткаченко Ігор Анатолійович доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри фізики та інтегративних технологій навчання природничих наук, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань, тел.: (067) 181-94-85, https://orcid.org/0000-0003-1775-1110

Ільніцька Катерина Сергіївна кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри фізики та інтегративних технологій навчання природничих наук, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань, тел.: (096) 293-50-22, https://orcid.org/0000-0002-6179-5543

ФІЗИЧНА ПРИРОДА РЕЛІКТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВСЕСВІТУ
(до методики вивчення теми)

Анотація. У другій половині 40-х років минулого сторіччя наш співвітчизник (уродженець Одеси) Г. Гамов з колегами, описуючи процеси, які, ймовірно, відбувалися у ранньому Всесвіті, прийшли до висновку, що у сучасну епоху повинні залишитися «сліди» ранньої гарячої стадії розвитку Всесвіту у вигляді фонового електромагнітного випромінювання (*реліктового випромінювання)* з низькою температурою.

На початку 60-х років інтерес до теорії первинного нуклеосинтезу і до інших питань, пов’язаних з раннім Всесвітом, значно посилився. Аналогічних висновків, що й Гамов, дійшли Р. Дікке і Дж. Піблс – теоретики із Принстона (США). Розуміючи, наскільки важливо виміряти температуру фонового електромагнітного випромінювання для розуміння процесів у Всесвіті, вони переконали своїх колег-експериментаторів П. Ролла і Т. Вілкінсона виготовити спеціальну антену і виміряти інтенсивність фонового випромінювання на радіохвилі довжиною 3,2 *см*.

Проте першою реліктове випромінювання зареєструвала не група із Принстона. Відкриття відбулося *випадково* на початку 1965 р. Його зробили А. А. Пензіас і Р. В. Вільсон, співробітники науково-дослідної лабораторії

фірми «Белл» у Холдемі (штат Нью-Джерсі, США). Пензіас і Вільсон намагалися визначити величину «радіошуму» Галактики на хвилі 7,35 *см* за допомогою низькошумної рупорної антени, побудованої для зв'язку із супутником «Ехо».

Пензіас і Вільсон виявили ізотропне фонове випромінювання з температурою ~ 3,5 *К*. Нічого не підозрюючи про космологічне походження мікрохвильового фону, Пензіас і Вільсон тривалий час намагалися зрозуміти отриманий результат. Нарешті, коли вони зв'язалися з колегами із Принстона, стало зрозуміло, що зареєстроване ними випромінювання є реліктовим випромінюванням, яке збереглося як результат Великого вибуху (моменту зародження Всесвіту).

Пізніше було проведено багато досліджень в інших лабораторіях світу з підвищенням точності вимірювань і на сьогоднішній день вважається, що фонове реліктове випромінювання має температуру ~ 3 *К*.

Ключові слова: коливальні процеси, Всесвіт, шум, температура, радіотелескоп, абсолютно чорне тіло, випромінювання.

Krasnobokyi Yurii Mykolayovych Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Integrative Technologies of Natural Sciences, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, tel.: (097) 338-30-45, https://orcid.org/0000-0003-2103-9978

Tkachenko Ihor Anatoliiovych Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics and Integrative Technologies of Natural Sciences, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, tel.: (067) 181-94-85, https://orcid.org/0000-0003-1775-1110

Ilnitska Kateryna Serhiivna Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Integrative Technologies of Natural Sciences, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, tel.: (096) 293-50-22, https://orcid.org/0000-0002-6179-5543

PHYSICAL NATURE OF THE UNIVERSE'S RELIC RADIATION (to the methodology of studying the topic)

Abstract. In the second half of the 1940s, our compatriot (a native of Odessa) G. Gamow and his colleagues, describing the processes that probably occurred in the early Universe, came to the conclusion that in the modern era there should remain "traces" of the early hot stage of the Universe's development in the form of background electromagnetic radiation (relic radiation) with a low temperature.



In the early 1960s, interest in the theory of primordial nucleosynthesis and other questions related to the early Universe increased significantly. Similar conclusions to those of Gamow were reached by R. Dicke and J. Peebles, theorists from Princeton (USA). Realizing how important it was to measure the temperature of the background electromagnetic radiation for understanding processes in the Universe, they convinced their fellow experimenters, P. G. Roll and D. T. Wilkinson, to make a special antenna and measure the intensity of the background radiation at a radio wave length of 3.2 *cm*.

However, the first to record the CMBR was not the Princeton group. The discovery was made *by accident* in early 1965 by A. A. Penzias and R. W. Wilson, employees of the Bell Von Laboratories research laboratory in Holdham, New Jersey, USA. Penzias and Wilson were trying to determine the amount of "radio noise" from the Galaxy at a wavelength of 7.35 *cm* using a low-noise horn antenna built to communicate with the Echo satellite.

Penzias and Wilson discovered an isotropic background radiation with a temperature of ~ 3.5 *K*. Unaware of the cosmological origin of the microwave background, Penzias and Wilson struggled to understand the result for a long time. Finally, when they contacted their colleagues at Princeton, it became clear that the radiation they had detected was a relic radiation, preserved as a result of the Big Bang (the moment the universe began).

Later, many studies were conducted in other laboratories around the world with increased measurement accuracy, and today it is believed that the background radiation has a temperature of ~ 3 *K*.

Keywords: oscillatory processes, Universe, noise, temperature, radio telescope, black body, radiation.

Постановка проблеми. З теорії молекулярної фізики відомо, що з поступальним рухом атомів газів за їх температури T, зв'язана енергія

$$E = \frac{3}{2}kT, \qquad (1)$$

де $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *Дж/К* – стала Больцмана.

Якщо нагріти газ на ΔT, то енергія цього руху збільшиться на $(3/2)k\Delta T$. З іншого боку, зміна енергії будь-якого тіла при нагріванні за сталого об'єму визначається його теплоємністю C_V, так, що $\Delta E = C_V \Delta T$. Виявляється, що в одноатомних газів виміряне значення теплоємності у розрахунку на один атом таке: для *He* – $1{,}50k$; *Ar* – $1{,}50k$; *Xe* – $1{,}50k$, тобто дорівнює саме $(3/2)k\,T$. Отже, експеримент свідчить: в одноатомних газах тепловий рух відображає виключно поступальний рух атомів як цілого.

Але це – не єдиний можливий вид теплового руху. Наприклад, у твердих тілах складові їх частинки (йони, атоми, молекули) закріплені у вузлах кристалічної ґратки і не можуть рухатися поступально. Проте тепловий рух у них існує, що підтверджується їх великою теплоємністю.

У теплового руху атомів у газах є одна особливість: він не залежить від характеристик самих атомів. Наприклад, атом гелію має масу (в атомних одиницях), що дорівнює 4, аргон – 40, ксенон – 131. Але ця різниця в масах жодним чином не впливає на величину енергії їх теплового руху.

Атоми відрізняються не лише масами, але й кількістю складових їх частинок. Так, у гелію навколо ядра рухається лише два електрони, у аргону – 18, у ксенону – аж 54! Кожен електрон у тисячі разів легший від ядра; за цього виникає питання – якщо маса не впливає на енергію теплового руху, то чому кожен електрон нічого не додає до теплоємності свого атома? Можливо, існує якийсь закон природи, що взагалі забороняє тепловий рух електронів? Виявляється, що ні, – адже якщо лише газ нагріти, то він починає випромінювати світло. Саме завдяки цьому явищу вперше був виявлений гелій на Сонці. Причина теж відома, вона отримала своє пояснення у квантовій механіці. Справа у тому, що електрони в атомі можуть займати лише певні квантові стани, які відрізняються за енергіями. Якщо атом отримає зовні достатню порцію енергії, то він може набути «збудженого» стану – електрон переходить із нижнього стійкого стану у такий, де його енергія більша. Але у збудженому стані атом не може довго перебувати, і коли він повертається до стійкого стану, то випромінює квант світла, який і спостерігається (реєструється). Яка ж тут роль температури газу? Очевидно, що тепловий рух має бути достатньо інтенсивним, щоб, наприклад, за зіткнення двох атомів їх сумарна енергія поступального руху виявилася достатньою для збудження хоча б одного з них.

Таким чином, випромінювання світла нагрітим газом – це прояв теплового руху електронів. Але, щоб воно розпочалося, необхідна висока температура, і пов’язано це з дискретною природою руху електронів в атомі. Поступальний же рух атомів може відбуватися з будь-якою швидкістю і, відповідно, енергією. Він не квантується і має, як кажуть, неперервний спектр. Саме цим, з точки зору теплового руху, атом принципово відрізняється від електронів, що входять до його складу.

Виявляється, що в обох випадках тепловий рух можна описати одним і тим же законом – законом Л. Больцмана у вигляді:

$$N_i / N = ae^{-E_i/kT}, \qquad (2)$$

де N – повне число частинок у системі; N_i – число частинок із енергією E_i; множник a обирають таким чином, щоб сума всіх N_i дорівнювала N.

Для подальшого розгляду проблематики статті, важливо відзначити межі застосовності формули Больцмана (2). Вона застосовна лише у тих випадках, коли між частинками системи немає взаємодії. До цих пір саме і йшла мова про енергію окремої частинки, яка залежить лише від її стану, але не від стану інших частинок системи. Саме це й обмежує область застосування формули (2). Проте існують не менш важливі фізичні явища, за розгляду яких взаємодіями можна знехтувати.



Якщо мова йшла про тепловий рух, то, зазвичай, малися на увазі реальні частинки – атоми, молекули або броунівський рух дрібних частинок. На противагу цьому у вакуумі існують змінні з часом електромагнітні поля – електромагнітні хвилі, які випромінюються нагрітими тілами. Як відбувається випромінювання у цьому випадку, залежить від властивостей конкретних тіл [1].

Однією з моделей таких тіл у фізиці розглядається так зване «абсолютно чорне тіло» – це таке тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання [2, С. 49]. А чи світиться чорне тіло, чи ні, і як воно світиться, – залежить від його температури: за 600—700 °*C* – світло червоне, за 1000 °*C* – жовте, за 1500 °*C* – біле. Нагадаємо, що видиме світло – це електромагнітні коливання з довжиною хвилі від ~ 0,4 до ~ 0,8 *мкм*. За межами цього «вікна» око людини випромінювання не сприймає [3]. Проте природі немає діла до нашого ока… Чорне тіло випромінює електромагнітні хвилі незалежно від того, дивляться на нього чи ні, бачать це випромінювання, чи не в змозі це зробити. Тож, зауваживши, що властивості природи не залежать від людини, мусимо вважати, що випромінювання є завжди, а температура тіла визначає склад та інтенсивність цього випромінювання. Завдання нашого дослідження полягає у встановленні кількісних співвідношень між цими величинами, що, врешті-решт, дасть нам можливість «виміряти» *температуру Всесвіту*.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У першу чергу хочеться відзначити брошуру «Від альфа-розпаду до Великого вибуху» (1990 р.) авторів В. Я. Френкеля і А. Д. Черніна, які присвятили її цілком фрагментам життя і творчої діяльності геніального вченого Георгія Антоновича Гамова (1904-1968). Справа у тому, що, зазнаючи утисків з боку тодішньої радянської влади, Гамов змушений був виїхати і продовжувати наукову діяльність за кордоном (переважно у США). Оскільки в СРСР його наукові праці не публікувалися (а їх нараховується біля 500), то огляд їх у названій брошурі можна вважати певною компенсацією цієї безглуздої несправедливості. Тож наукові інтереси професора Гамова охоплюють широкий спектр не лише фізичних і астрофізичних проблем, означених у назві брошури. Але на сторінках 37 ÷ 60 у ній йде мова про внесок Гамова у розробку проблем, обговорюваних у презентованій статті – Великого вибуху і Реліктового випромінювання. Саме Гамов був автором цих фундаментальних теорій, які стали поштовхом як для подальших теоретичних розробок цих проблем, так і для їх експериментальних підтверджень. «Космологія Великого Вибуху» – так Гамов назвав свою концепцію, відому у наш час як «Теорія гарячого Всесвіту». У подальшому ця теорія зазнавала все глибшого квантового і релятивістського трактувань.

Серед таких праць вважаємо доречним назвати наступні: Я. Б. Зельдович, І. Д. Новіков. Будова і еволюція Всесвіту (1975); J. V. Narlikar. The Structure of the Universe (1977); С. Вайнберг. Перші три хвилини (1981); Дж. Сілк. Великий

вибух. Народження і еволюція Всесвіту (1982); С. Гокінг. Коротка історія часу: від Великого вибуху до чорних дір (2015).

Мета статті. На основі методичного прийому внутрішньопредметної інтеграції матеріалу загального курсу фізики – механічних, теплових і електромагнітних коливальних процесів – представити варіант вивчення природи «реліктового випромінювання».

Виклад основного матеріалу. Щоб досягти цієї мети, розпочнемо здалеку, а саме – з простого (математичного) *маятника*: тягарця, підвішеного на нерозтяжній нитці довжиною l. Якщо штовхнути (відхилити) тягарець, то маятник почне коливатися з частотою $\omega = \sqrt{g/l}$ (рис. 1).

Амплітуда коливань може бути різною – все залежить від того, якої сили був поштовх. Уявімо, що маятник – ідеальний, без будь-якого тертя, так, що його коливання не затухають. А тепер зарядимо тягарець електричним зарядом. Цей заряд рухається разом з маятником, і тому створюване ним електричне поле, яке залежить від відстані точки відхилення до маятника, – виявляється змінним у часі з тією ж самою частотою ω, з якою змінюється положення тягарця маятника. Змінне електричне поле породжує електромагнітну хвилю, яка поширюється у просторі, і несе із собою енергію коливань маятника.

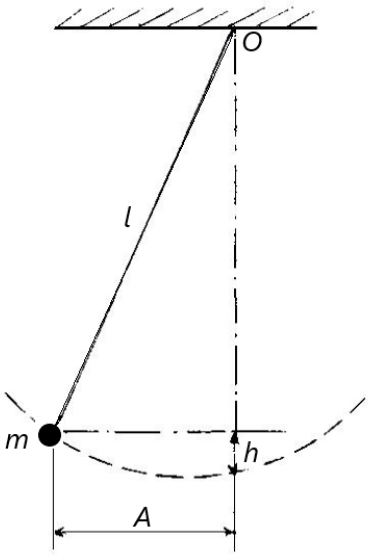


Рис.1.

Електромагнітна хвиля – це потік квантів випромінювання, енергія кожного з яких дорівнює $\hbar\omega$ $(h\nu)$. Тому, очевидно, що мінімальна порція енергії, яку може віддати маятник, теж дорівнює $\hbar\omega$. Вона не залежить від величини електричного заряду, з чого можна зробити висновок, що і без заряду маятник може віддавати енергію лише порціями величиною $\hbar\omega$. Порівнюємо з атомом: він може випромінювати кванти світла певної частоти, тому що має дискретні рівні енергії. Для маятника ситуація аналогічна, лише формула для його рівнів енергії має простіший вигляд:

$$E_i = \left(i + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega, \; i = 1, 2, 3\ldots \qquad (3)$$

Якщо підставити у цю формулу параметри звичайного маятника (наприклад, $m = 1$ *г*, $l = 1$ *м*), то можна побачити, що число i астрономічно велике уже навіть за нехтовно малої амплітуди коливань (наприклад, один ангстрем). Саме тому у таких випадках квантування зовсім не проявляється, хоча, у принципі, воно має місце.



Підтвердимо це обрахунком енергії (яка у кельвінах дорівнює $T = E/h$) і амплітуди коливань маятника (з $m = 1\ г$, $l = 1\ м$) в основному квантовому стані, тобто за значення $i = 0$. Частота коливань маятника $\omega = \sqrt{g/l} \approx 3c^{-1}$. Згідно з формулою (3), $E_i = E_0 = \left(0 + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$, або $E_0 = \hbar\omega/2 = 1{,}5 \cdot 10^{-34}\ Дж = 10^{-11}\ K$. За максимального відхилення від положення рівноваги тягарець маятника піднімається на висоту $h = E_0/mg = 1{,}5 \cdot 10^{-32}\ м$, що відповідає амплітуді $A = \sqrt{l \cdot h} \approx 10^{-16}\ м$ (рис.1). Такий же результат можна отримати й за допомогою співвідношення невизначеностей Гейзенберга.

Доречно підкреслити, що будь-який періодичний рух – чи то у «звичайному» світі, чи у мікросвіті – обов'язково квантується, і правило завжди таке: якщо рух відбувається з частотою ω, то відстань між квантовими рівнями енергії дорівнює $\hbar\omega$.

Реально будь-який маятник є частиною певної системи з температурою $T \neq 0$ (такою системою може бути розглядуваний нами маятник, який оточений повітрям). І аналогічно з броунівським рухом, повинен відбуватися тепловий рух маятника як цілого. Щоб вирахувати енергію цього руху, уявімо систему з великої кількості ($N \to \infty$) абсолютно однакових, не взаємодіючих між собою, маятників. Тоді енергією E_i будуть володіти, згідно з формулою Больцмана (2), $N_i = aNe^{-E_i/kT}$ маятників. Повна енергія E теплового руху такої системи виявляється, очевидно, рівною

$$E = \sum_{i=0}^{\infty} E_i N_i \ . \qquad (4)$$

Звідси для середньої енергії $\langle E \rangle$ коливань одного маятника отримуємо:

$$\langle E \rangle = \frac{E}{N} = a\sum_{i=0}^{\infty}\left(i + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega e^{-\hbar\omega\left(i+\frac{1}{2}\right)/kT} \ . \qquad (5)$$

Формулу (5) можна записати дещо простіше, розклавши суму в ряд і обрахувавши a:

$$\langle E \rangle = a\hbar\omega e^{-\hbar\omega/2kT}\left[\frac{1}{2}\left(1 + e^{-\hbar\omega/kT} + e^{-2\hbar\omega/kT} + \ldots\right) + e^{-\hbar\omega/kT}\left(1 + e^{-\hbar\omega/kT} + e^{-2\hbar\omega/kT} + \ldots\right) + \ldots\right] =$$

$$= a\hbar\omega e^{-\hbar\omega/2kT} \cdot \left(1 + e^{-\hbar\omega/kT} + e^{-2\hbar\omega/kT} + \ldots\right)\left[\frac{1}{2} + e^{-\hbar\omega/kT}\left(1 + e^{-\hbar\omega/kT} + e^{-2\hbar\omega/kT} + \ldots\right)\right].$$

Вираз (сума членів) в останніх круглих дужках – це нескінченна геометрична прогресія, отже, ця сума дорівнює

$$\frac{1}{1 - e^{-\hbar\omega/kT}}, \text{ а } \langle E \rangle = \frac{a\hbar\omega e^{-\hbar\omega/2kT}}{2} \cdot \frac{1 + e^{-\hbar\omega/kT}}{\left(1 - e^{-\hbar\omega/kT}\right)^2} \ . \qquad (6)$$

Для обрахунку значення a, пригадаємо, що $\sum_{i=0}^{\infty} N_i = N$. Тоді

$$1 = ae^{-\hbar\omega/2kT}\left(1 + e^{-\hbar\omega/kT} + e^{-2\hbar\omega/kT} + \ldots\right) = a\left(\frac{e^{-\hbar\omega/2kT}}{1 - e^{-\hbar\omega/kT}}\right) = ab \ , \text{ звідки } a = 1/b \ .$$

Підставивши значення a в (6), отримаємо значення середньої енергії коливань маятника (і будь-якої іншої коливальної системи)

$$\langle E\rangle = \frac{\hbar\omega}{2}\cdot\frac{1+e^{-\hbar\omega/kT}}{1-e^{-\hbar\omega/kT}}. \qquad (7)$$

Ця формула значно спрощується, якщо частота коливань мала, тобто якщо $\hbar\omega/kT<<1$. З математики відомо, що коли $x<<1$, то $e^x\approx 1+x$. З врахуванням останнього, після нескладних обрахунків отримаємо:

$$\langle E\rangle = kT. \qquad (8)$$

Будемо вважати це першим кроком до опису механізму чорного випромінювання. Результат (8) можна отримати й без наведених обчислень, виходячи із аналогії з ідеальним газом: атом ідеального газу має енергію поступального руху $(3/2)kT$. Рухається він у довільному напрямі, так що на рух по кожному із трьох ортогональних напрямів системи координат, які, звичайно, еквівалентні, припадає $kT/2$. У маятника немає трьох напрямів руху, а лише один. Отже, на його середню кінетичну енергію припадає $kT/2$. У процесі коливань його кінетична енергія періодично переходить у потенціальну, і навпаки. За цього середня потенціальна енергія також дорівнює $kT/2$. Тож разом буде kT, як і стверджує формула (8).

Ускладнимо коливальну систему і замість маятника розглянемо коливання *струни* довжиною l. У чому принципова різниця між маятником і струною? У тому, що у струни може реалізовуватися багато різних коливань. Спільним у коливань струни є те, що її закріплені кінці весь час нерухомі. Всі ці коливання називаються *власними* – яким би чином не зачепити струну, у ній виникнуть лише ті коливання, для яких довжина хвилі

$$\lambda_i = 2l/i \ \ (i=1,\ 2,\ 3\ldots), \qquad (9)$$

або їх комбінація. Якщо швидкість поширення хвилі уздовж струни позначити c, то частоти власних коливань будуть

$$\omega_i = 2\pi c/\lambda_i. \qquad (10)$$

Кожне з цих коливань бере участь у тепловому русі, так що за $\hbar\omega_i << kT$ їх середня енергія дорівнює kT. Скільки ж таких коливань відбувається в інтервалі частот від 0 до ω, які відповідають довжині хвилі $\lambda<<l$? З формул (9, 10) можна отримати, що їх число дорівнює

$$n_1 = l\omega/\pi c. \qquad (11)$$

Будь-які коливання мають багато спільного. Якщо замість струни ми будемо спостерігати, наприклад, за світлом, яке циркулює між двома паралельними дзеркалами, то будуть виникати власні електромагнітні коливання – стоячі хвилі, для яких амплітуда повинна бути рівна нулю на дзеркальних площинах. А залежність її від координати буде точно такою ж, як і



для амплітуди зміщення струни. І точно так само повне число коливань в інтервалі частот від 0 до ω буде описуватися формулою (11).

Часто, коли описується процес поширення хвиль, вводять таку фізичну величину як хвильовий вектор $\vec{\mathrm{K}}$. Це вектор, напрям якого співпадає з напрямом поширення хвилі, а його довжина дорівнює $2\pi/\lambda$ або, по-іншому, ω/c. У випадку струни він спрямований, очевидно, уздовж неї – іншого напряму просто не існує. І для власних коливань струни $\vec{\mathrm{K}}$ набуває значень π/l, $2\pi/l$, …, $n\pi/l$.

Ускладнюючи далі модель коливальної системи, розглянемо коливання *мембрани*. Щоб описати коливання простої квадратної мембрани, необхідно ввести координати хвильового вектора $\vec{\mathrm{K}}_x$, $\vec{\mathrm{K}}_y$. Кожна з цих координат може набувати таких же самих власних значень як і для струни. Якщо їх нанести на площину $\vec{\mathrm{K}}_x$, $\vec{\mathrm{K}}_y$, то отримується сітка з площею кожної у ній комірки $s_{\vec{\mathrm{K}}} = (\pi/l)^2$. Якщо задати певне значення $\vec{\mathrm{K}} >> \pi/l$, то всі власні коливання, частоти яких менші від ω, потраплять у певний сектор, що має площу

$$S_{\vec{\mathrm{K}}} = \frac{1}{4}\pi\vec{\mathrm{K}}^2 = \frac{1}{4}\pi\left(\frac{\omega}{c}\right)^2, \qquad (12)$$

і у цьому секторі виявиться

$$n_2 = \frac{S_{\vec{\mathrm{K}}}}{s_{\vec{\mathrm{K}}}} = \frac{l^2}{4\pi}\vec{\mathrm{K}}^2 = \frac{l^2\omega^2}{4\pi c^2} \qquad (13)$$

комірок. А це якраз і є число всіх власних коливань плоскої мембрани з частотою, меншою або рівною ω.

Розмірковуючи подібним чином стосовно *тривимірного* випадку (наприклад, куба зі стороною l), отримаємо

$$n_3 = \frac{V}{6\pi^2}\vec{\mathrm{K}}^3 = \frac{V}{6\pi^2}\left(\frac{\omega}{c}\right)^3, \qquad (14)$$

де $V = l^3$ – це просто об’єм тіла. Тут варто зазначити, що у суцільному (об’ємному) середовищі, очевидно, немає таких видів коливань, як у тонкої струни або тонкої мембрани. Але можна вести мову, наприклад, про звукові хвилі або, якщо задано певний об’єм – дзеркальна кімната, про власні електромагнітні коливання.

Наведені міркування дають можливість розглядати механізм випромінювання *абсолютно чорного тіла*. Найчастіше модель абсолютно чорного тіла зображують у вигляді малесенького отвору у замкнутій порожнині із дзеркально відбиваючими стінками [2, С. 49]. Промінь світла, який потрапив всередину такого тіла, багаторазово відбиваючись від стінок, поступово втрачає свою енергію, аж поки зовсім не зникне.

Тепер звертаємо увагу на той факт, що у тепловому русі бере участь будь-яка форма матерії. Кванти електромагнітного випромінювання, фотони, у цьому

сенсі не складають виключення. Тому аналогічно, як термічно збуджується поступальний рух атомів газу, повинні збуджуватися й теплові електромагнітні коливання. Якщо їх частота ω, то за $\hbar\omega << kT$ амплітуда коливань на кожній власній частоті буде такою, щоб їх середня енергія дорівнювала kT. Електромагнітні хвилі не взаємодіють між собою, тому теплові фотони утворюють ідеальний газ з тією лише різницею від звичайного, що їх число залежить від температури.

Яку ж енергію теплового руху має цей газ? Для тих фотонів, для яких $\hbar\omega << kT$, це буде просто kT, помножене на повну їх кількість за формулою (14). Правда, враховуючи, що світло має дві поляризації, n_3 необхідно помножити на два. Тоді отримуємо:

$$E = \frac{VkT}{3\pi^2}\left(\frac{\omega}{c}\right)^3. \qquad (15)$$

Якщо у (15) мати на увазі вимірювані величини, то для цього застосовуються приймачі, які чутливі до коливань з частотами у вузькому діапазоні $d\omega$ в околі заданої частоти ω. Зокрема, так влаштовані й звичайні радіоприймачі, і телевізори, і радіолокатори.

Необхідно знати, скільки енергії $dE(\omega)$ теплового випромінювання може прийняти такий приймач, тобто фактично похідну виразу (15) за частотою:

$$dE(\omega) = \frac{VkT}{\pi^2 c^3}\omega^2 d\omega. \qquad (16)$$

Звичайно, що ця формула не виконується за $\hbar\omega >> kT$. За цієї умови енергія теплового руху для кожного коливання згідно з розподілом Больцмана, повинна стати рівною не kT, а $\hbar\omega e^{-\hbar\omega/kT}$, таким чином

$$dE(\omega) = \frac{V\omega^2}{\pi^2 c^3}\hbar\omega e^{-\hbar\omega/kT} d\omega. \qquad (17)$$

Більш точну формулу, що охоплює весь спектр енергій випромінювання абсолютно чорного тіла і яка узгоджується з експериментом, встановив у 1900 р. М. Планк (подаємо її запис у використовуваних нами позначеннях величин):

$$dE(\omega) = \frac{V\hbar}{\pi^2 c^3}\frac{\omega^3 d\omega}{e^{-\hbar\omega/kT} - 1}. \qquad (18)$$

Тож, якщо у моделі абсолютно чорного тіла отвір має площу S, то за одиницю часу по нормалі до поверхні виходить випромінювання із об'єму $S \cdot c$ (це очевидно, якщо розміри порожнини нескінченно великі). Тоді інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла визначатиметься за формулою

$$dI(\omega) = S\frac{\hbar}{\pi^2 c^2}\frac{\omega^3 d\omega}{e^{-\hbar\omega/kT} - 1}. \qquad (19)$$



Формула (19) набуває зручнішого для практичного її застосування виду, якщо в якості аргументу обрати не ω, а безрозмірну величину $x = \hbar\omega/kT$. Для цього потрібно у (19) ω замінити на $xkT/\hbar$, а $d\omega$ на $dxkT/\hbar$. Тоді отримаємо:

$$dI(x) = S\frac{(kT)^4}{\pi^2 c^2 \hbar^3} f(x)dx, \tag{20}$$

де

$$f(x) = \frac{x^3}{e^x - 1}. \tag{21}$$

Таким чином, інтенсивність випромінювання, будучи розділеною на $(kT)^4$, незалежно від температури, описується однією і тією ж функцією (21) від $\hbar\omega/kT$.

Формула (20) має як велике теоретичне значення, так і широке практичне застосування. Вона, наприклад, лежить в основі вимірювання високих температур у плазмі, за дослідження Сонця й інших зірок. За власним тепловим радіовипромінюванням була виміряна температура планет Сонячної системи і Місяця.

Чому теплове випромінювання так цікавить астрофізиків? Зокрема, наприклад, тому, що воно дозволяє вимірювати температуру небесних тіл. Зовсім недавно з'явилася можливість за чорним випромінюванням космічного простору визначати температури таких віддалених об'єктів Всесвіту, про які дослідники раніше і не мріяли.

У Всесвіті є багато об'єктів, які самі не світяться у видимій області, оскільки надто холодні, наприклад, той же Місяць і Марс. Зараз учені вже навчилися «досягати» їх поверхні зі своїми приладами і безпосередньо вимірювати температуру. Але перед тим, як це зробити, необхідно було приблизно знати, яка вона, щоб відповідним чином сконструювати спеціальну апаратуру [4].

На допомогу ученим прийшла радіоастрономія зі своїм «приладом» – радіотелескопом, основними частинами якого є антена і чутливий приймач. Завдяки радіоастрономії стало відомо, що у Всесвіті відбувається багато процесів, у результаті яких генеруються радіосигнали, і завдяки яким можна отримувати різноманітну інформацію.

Наприклад, є потреба знати «радіотемпературу» планет… Вона визначена: Венера – 560 ÷ 580 *K*; Марс – 218 ± 76 *K*; Юпітер – 145 ± 16 *K*; Сатурн – 110 *K*. Як це відбувалося? Розглянемо, наприклад, Марс. Під час протистояння його відстань від Землі приблизно L_M = 80 мільйонів кілометрів. Скільки ж теплового випромінювання від Марса доходить до Землі? Спробуємо оцінити: вважаємо, що випромінювання поширюється від сфери радіусом R_M = 3400 *км* (радіус Марса), а антена радіотелескопа – це круг радіусом r = 10 *м*. Якщо на поверхні Марса густина потоку енергії дорівнює I_M, то вся випромінювана ним енергія

дорівнює $4\pi R_M{}^2 I_M$. Теплове випромінювання від тіла сферичної форми поширюється симетрично у всі боки, тому на відстані L_M весь потік енергії буде рівномірно розподілений по площі $4\pi L_M{}^2$. Таким чином, на антену надходитиме енергія

$$4\pi R_M{}^2 I_M \cdot \pi r^2 / 4\pi L_M{}^2 = I_M \pi r^2 R_M{}^2 / L_M{}^2 . \quad (22)$$

Антена збирає усе падаюче на неї випромінювання у фокусі, у якому розташований приймач. Площадка, на яку фокусується випромінювання, не може мати розміри помітно менші, ніж довжина хвилі падаючого випромінювання λ. Нехай приймач налаштований на випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 3$ *см* (це найбільш поширений у техніці випадок), тоді площа фокусу виявляється рівною $s \approx 2$ *см*^{2}. У фокусі густина потоку енергії випромінювання I, що приймається від Марса, виявляється рівною $I_M \pi r^2 R_M{}^2 / L_M{}^2 s$. Підставивши у цей вираз числа, отримаємо $I \approx 0{,}003 I_M$.

Квант енергії випромінювання з довжиною хвилі 3 *см*, виміряний у кельвінах, дорівнює ~ 0,5 *K*. Це означає, що на поверхні Марса для випромінювання з такою довжиною хвилі (частотою ω) відношення $\hbar\omega/kT$ повинне бути набагато меншим за одиницю ($\hbar\omega/kT \ll 1$). Тому для обрахунку випромінюваної енергії необхідно користуватися формулою, згідно із якою I_M повинне бути пропорційним T_M. Але, як видно, до приймача антени надходить дуже мало енергії. Приблизно таку ж енергію випромінювало б абсолютно чорне тіло з температурою $T = 0{,}003 T_M$, за умови його розміщення у фокусі антени. Тож, дослідники, намагаючись виміряти температуру Марса (~ 200 *K*), повинні були створити таку апаратуру, яка б фіксувала випромінювання тіл за температури всього лише ~ 0,6 *K*. Але, як виявляється, існує принципова межа збільшення чутливості приймача.

Приймач – це пристрій, у якому випромінювання, що потрапило на його вхід, керує процесами, які у ньому відбуваються, таким чином, що на виході виробляється сигнал, пропорційний потужності вхідного випромінювання. Тож, щоб отримати на виході достатньо ідентифікований сигнал, приймач повинен використати всю енергію вхідного сигналу, жодна її частина не повинна відбитися назад в антену. А це означає, що для вхідного випромінювання приймачем має бути «абсолютно чорне тіло». Разом з тим, радіотелескоп працює за температури оточуючого середовища, нехай це буде ~ 300 *K*. Згідно з описаними вище процесами це означає, що у приймальному елементі вже існують теплові коливання, потужність яких визначається цією температурою. Ці коливання називають «тепловим шумом». Вони спричинюють серйозні завади, адже їх потужність у ~ 300 *K* / 0,6 *K* = 500 разів більша, ніж потужність теплового випромінювання, що надходить від Марса. Тому «додаток», який дає Марс, на такому фоні помітити було неможливо. Вихід з положення передбачав два можливих шляхи.

Перший – збільшити площу приймаючої антени. Розрахунки показали, щоб збільшити чутливість приймача у 100 разів, площа дзеркала антени повинна дорівнювати $3 \cdot 10^4$ *м*^{2} з точністю виготовлення (фокусування) ~ 1 *мм*. Таку антену виготовити практично неможливо.

Другий – знизити температуру приймача. Якщо його температура стане рівною, наприклад, 3 *K* (а це у даний час є цілком досяжним), то матимемо збільшення чутливості у сто разів: адже суттєвим є значення величини – відношення сигнал / шум, тобто все одно, чи збільшувати сигнал, чи зменшувати шум. За таких умов додаток у 0,6 *K* буде відчутним, адже складатиме фактично 20% випромінювання, спричиненого Марсом.

Одним з таких приймачів, що генерують порівняно малі власні шуми, є *мазер*. Принцип його роботи приблизно такий же, що й у лазера, лише працює він не у видимій області, а підсилює випромінювання у діапазоні сантиметрових довжин хвиль [5, С. 24-42].

Тож, у намаганні поліпшити конструкції своїх приладів, радіоастрономам знадобилося звернутися до фізики низьких температур [6, С. 54-60].

У 1963 році американські фізики А. Пензіас і Р. Вільсон, які працювали в лабораторії фірми «Белл» (штат Нью-Джерсі, США) удосконалювали радіотелескоп з 20-футовим рупорним рефлектором-антеною, що мав досить великі розміри. Він був побудований для експериментів з штучними супутниками Землі, і, щоб слідкувати за ними, міг повертатися навколо горизонтальної і вертикальної вісей, «оглядаючи» будь-яку ділянку неба. Радіохвилі, які падали на вхідний отвір антени площею 25 *м*^{2}, потрапляли на фокусуючий елемент, зігнутий у вигляді частини параболоїда. Відбиваючись від нього і проходячи по закритому зі всіх боків рупору, вони потрапляли на вхід приймача. Ця антена могла приймати сигнали лише від джерел, які знаходилися точно навпроти відкритого отвору. Достатньо було повернути її лише на 5° у будь-якому іншому напрямі, як вхідний сигнал слабшав у тисячу разів.

Уже до початку описуваних робіт цей радіотелескоп був доволі чутливим приладом. У ньому використовувався у якості приймача мазер, шум якого відповідав температурі 7 ± 1 *K*. Шумова температура самої антени складала 2 ± 1 *K*, а лінії, яка з'єднувала її з мазером – 7,6 ± 0,8 *K*. Для випромінювання з довжиною хвилі ~ 7 *см*, яке приймалося описуваним радіотелескопом, шумова температура атмосфери була вирахувана за виміряним раніше поглинанням радіохвиль, і вона складала 2,30 ± 0,3 *K*. Всі ці шумові сигнали складаються у приймачі, так що його повна шумова температура повинна бути рівною сумі шумових температур всіх названих джерел, тобто температурі:

атмосфери (неба) – $T_Н$ = 2,3 ± 0,3 *K*,
антени – $T_А$ = 2,0 ± 1,0 *K*,
лінії зв'язку – $T_Л$ = 7,6 ± 0,8 *K*,

мазера – $T_М$ = 7,0 ± 1,0 *K*,
разом: 18,9 ± 3,0 *K*.

Всі ці величини були ретельно виміряні в окремих дослідах або розраховані і вважалося, що за проведення запланованих досліджень, жодних інших бути не могло. Коли ж антену спрямовували в зеніт (де товщина атмосфери мінімальна), повний сигнал шуму складав 22,2 ± 2,2 *K*. Тобто між розрахунковою і експериментальною сумами шумів різниця складала ~ 3 *K*. За високої чутливості приладу така велика похибка дослідників не влаштовувала.

Пензіас і Вільсон вирішили, що прилад необхідно ще більше удосконалити. Вони ретельно перебрали всі деталі лінії, яка з'єднує антену з приймачем, і заново розрахували шум самої антени, провівши лабораторні вимірювання макетів її окремих деталей. За цього, отримали такий результат: антена і лінія разом мають температуру шуму $T_А + T_Л = 0,9 \pm 0,3$ *K* – тобто, у десять разів меншу, ніж раніше. Шум мазера теж вдалося зменшити до 3,5 *K*. Крім того, передбачаючи, що шум приймача може змінюватися під час досліду, було вирішено періодично калібрувати приймач за сигналом від еталонного джерела випромінювання.

Таке джерело було виготовлене – це поглинач (тобто «чорне тіло»), поміщений у рідкий гелій, так що його температура була рівна 4,2 *K* [7, С.18-30]. Випромінювання від еталонного джерела можна було дещо змінювати, завдяки тому, що між ним і приймачем розміщувався *атенюатор* – поглинач енергії змінної величини. Він працював за температури оточуючого середовища, і якщо, наприклад, його встановити так, щоб ним поглинався 1% енергії, то він додасть такий шум, який відповідає 3,5 *K*.

Отже, процес вимірювань став наступним. Приймач почергово підключався то до антени, то до еталонного джерела, а атенюатор встановлювався так, щоб сигнали на виході приймача в обох випадках були рівними. Після цього знімалися показники зі шкали атенюатора, переводилися в температуру еталонного джерела – і відомою ставала температура антени: вона виявлялася такою ж, що й раніше.

Коли дослід було проведено, з'ясувалося, що сигнал від антени такий же, як і від еталонного джерела з температурою 6,7 ± 0,3 *K*. Віднімемо звідси внесок самої антени і атмосфери (неба) (пригадаємо, $T_А + T_Л = 0,9 \pm 0,3$ *K* і $T_Н = 2,3 \pm 0,3$ *K*), – тож знову залишається 3,5 ± 1 *K*. *Попри всі удосконалення установки, що призвели до суттєвого зменшення похибки вимірювань, знову залишалося ~ 3 K. Тож необхідно було шукати причину, звідки ж беруться ці «зайві» градуси*?

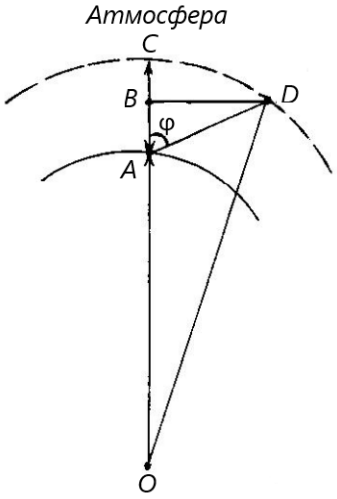


Рис. 2:
т.А – місце розташування антени;
ОА=$R_з$ – радіус Землі;
АС=h –товщина атмосфери в зеніті;
AD=*l* – шлях сигналу за нахилу антени на кут φ;

OD≈OA+AC= $R_з$+ h.

За такого розташування антени, як зображено на рисунку 2, згідно з теоремою Піфагора, з трикутника OBD можна отримати: $(BD)^2$ + $(OA + AB)^2$= $(R_з+ h)^2$, або $l^2 \cdot \sin^2\varphi + (R_з + l\cdot\cos\varphi)^2 = (R_з + h)^2$. (*)

У цьому виразі φ – кут, відраховуваний від зеніту; h – товщина атмосфери; $R_з \approx 6400$ *км* – радіус Землі.

Перша підозра стосувалася атмосфери: може вона «шумить» сильніше? Пригадаємо, що звичайна температура приземної атмосфери (неба) 200 ÷ 300 *K*, а шумова – лише 2,3 *K*. Відомо, що чим більший шлях в атмосфері проходять радіохвилі, тим сильніше вони поглинаються. Може від цього залежить рівень шуму антени? На щастя, товщину атмосфери, яку «просвічувала» антена, дослідникам вдавалося легко виміряти: достатньо нахилити антену так, щоб вона реєструвала випромінювання, яке падає на неї не із зеніту.

Вимірювання показували, що поглинання радіохвиль відбувається переважно у шарі атмосфери товщиною порядку десятків кілометрів, тож можна вважати, що $h << R_з$. Розкриємо дужки у (*) і, вважаючи, що кут φ не дуже близький до 90°, тобто, що відстань *l*, яку проходить сигнал, не надто велика, порівняно з *h*, вилучимо члени l^2, який дуже малий порівняно з $2lR_з\cos\varphi$ і $h^2 \ll 2R_з h$; залишається: $2lR_з\cos\varphi = 2R_з h$, або $l = h/\cos\varphi$.

Тож, якщо φ – кут нахилу антени, відраховуваний від напрямку на зеніт, *h* – товщина атмосфери, то шлях, який проходить радіосигнал в атмосфері, дорівнюватиме $h\cos\varphi$ і шум атмосфери буде пропорційний $1/\cos\varphi$.

Порівнювалися два сигнали: один, який не залежить від кута ($\varphi = 0°$), а інший, – шум від атмосфери, – що змінюється як $1/\cos\varphi$. Тож проводилися вимірювання за різних значень кута φ і з них вираховувалися значення, що спостерігалися за $\varphi = 0°$. Лишок цієї різниці повинен змінюватися як ($1/\cos\varphi - 1$), а множник за цієї величини – це температура шуму атмосфери. Вона виявилася такою ж, як і раніше, – $T_Н$ = 2,3 ± 0,3 *K*. Отже ця причина була відхилена.

З'ясування наступної причини. Можливо антена уловлює шум у 3 *K*, який пов'язаний з радіовипромінюванням, що генерується діяльністю людей у

мегаполісах? Тож із Нью-Джерсі антена спрямовувалася на Нью-Йорк й інші міста на горизонті, проте жодної помітної різниці не спостерігалося.

Може антена приймає випромінювання від самого ґрунту, температура якого ~300 *K*? Але і вимірювання, і розрахунки показали, що максимальний сигнал, який від поверхні Землі може дійти до приймача, не перевищує 0,1 *K*.

Поки Пензіас і Вільсон шукали пояснення постійно присутнім додатковим 3 *K*, у рупорі антени поселилися голуби, які залишали після себе «певні» результати своєї життєдіяльності. Повторивши вимірювання за наявності такого бруду в антені, дослідники виявили результат незмінним.

Тож серія перевірок стосувалася можливого іншого за величиною впливу атмосфери, радіовипромінювання, пов'язаного з діяльністю людей, впливу випромінювання від ґрунту тощо. За всіх цих повторних досліджень і розрахунків додаткові 3 *K* залишалися. Оскільки нічого не вдалося знайти, залишалося одне пояснення: із космосу зі всіх боків надходить радіовипромінювання, що відповідає температурі ~3 *K*. Що це означає, залишалося незрозумілим…

Так минуло близько року, коли одного разу Пензіас, розмовляючи зі своїм колегою із Массачусетса, завів мову про цей додатковий нез'ясовний шум. Його співрозмовник пригадав, що один теоретик із Принстона (Дж. Піблс) виконав роботу у якій передбачав, що Всесвіт повинен бути заповнений електромагнітним випромінюванням з температурою ~ 10 *K*. Учені зв'язалися один з одним, обговорили свої результати і невдовзі надіслали статті, які були опубліковані у 1965 р. в одному й тому ж номері «Астрофізичного журналу». Одна – експериментальна – із лабораторії «Белл», інша – теоретична – із Принстона.

Подібні дослідження у різних варіантах відтворювалися у різних лабораторіях світу. Їх результати вкладалися в інтервал 2,3 ÷ 3 *K*.

Природа цього випромінювання отримала своє пояснення саме на основі теорії еволюції Всесвіту Гамова. Зокрема, ця теорія стверджує, що на стадії «гарячого» Всесвіту утворилося електромагнітне випромінювання, яке поширювалося у різні боки зі швидкістю світла [8, С. 174-202]. Об'єм простору, який воно наповнювало, безперервно зростав, і, аналогічно до ідеального газу, воно в результаті охолоджувалося, що й відповідало температурі ~ 3 *K*. Це випромінювання збереглося до наших днів як «релікт» від епохи рекомбінації і утворення нейтральних атомів гідрогену і гелію. Тож відкрите випромінювання носить назву «реліктового», а за його відкриття А. Пензіасу і Р. Вільсону через 13 років (у 1978 році) було присуджено Нобелівську премію з фізики [1, С. 49-51; 8, С. 192-197].

Висновки. Викладена «історія» відкриття реліктового випромінювання – цікава і повчальна, оскільки демонструє шлях наукового пізнання: мало не

випадкове відкриття, яке змінило уявлення про Всесвіт. Хоча сам ефект був передбачуваний, але його ніхто не шукав цілеспрямовано… Історія фізики «знає» низку таких «випадкових» і разом з тим епохальних відкриттів, наприклад: броунівського руху, радіоактивності, рентгенівських променів та ін.

Тож зрозуміло, що коли б реліктове випромінювання не було виявлене навіть у 1965 р., воно все одно було б невдовзі відкрите, оскільки і рівень експериментальної техніки, і інтерес астрофізиків, і планомірний пошук все нових видів випромінювання, яке надходить із космосу, – все це впритул привело фізику до цього відкриття. І, варто зазначити, що фізика низьких температур відіграла тут важливу роль: виявити випромінювання з температурою 3 *K* було б неможливо, якщо не був би пройдений довгий шлях, який призвів до створення техніки радіоприйому на фоні шуму, вимірюваного кількома градусами кельвіна [9].

Це відкриття стало для науки ще й своєрідною «точкою відліку»: у природі немає жодного місця з температурою нижче 3 *K*. Такі температури вдається отримати лише на спеціальному обладнанні у лабораторіях. Тож, коли мова стосується предмету фізики низьких температур – то це все те, що нижче 3 *K*. Всі явища, що відбуваються у цій області температур, хоча й передбачені законами природи, проте здійснюються завдяки розуму і творчій діяльності учених та інженерів [4].

Перспективними щодо з'ясування інших можливих процесів виникнення фонового реліктового випромінювання вчені розглядають теорії можливої *термалізації* (встановлення теплового спектру) інших видів космічного випромінювання на частинках міжгалактичного пилу; як результат *випаровування* чорних дір та ін. До цих теорій пред'являється одна вимога: будь-яка фізична модель, що претендує на те, щоб пояснити походження мікрохвильового фонового випромінювання Всесвіту, повинна кількісно описувати його сьогоднішню спостережувану інтенсивність.

Література:

1. Ткаченко І. А., Краснобокий Ю. М., Гром І. С. Про нові властивості вакууму. *«Світ наукових досліджень. Випуск 16»* : матеріали Міжнародної мультидисциплінарної наукової інтернет-конференції, м. Тернопіль, Україна – м. Переворськ, Польща, 16-17 лютого 2023 р. / [редкол.: О. Патряк та ін.]; ГО "Наукова спільнота"; WSSG w Przeworsku. Тернопіль, 2023. С. 397—401.
2. Смородинский Я. А. Температура. Москва : Знание, 1977. 64 с.
3. Ільніцька К. С., Краснобокий Ю. М., Ткаченко І. А. Термодинамічний аналіз явища зорового сприйняття електромагнітного випромінювання. *Актуальні питання у сучасній науці*. 2024. № 2(20). С. 669—683.
4. Л. В. Шубников и физика низких температур / Веркин Б. И. и др. Москва : Знание, 1989. 64 с.
5. Тарасов Л. В. Лазеры: действительность и надежды. Москва : Наука, 1985. 176 с.

6. Фрадков А. Б. Криогенные жидкости. Москва : Знание, 1988. 64 с.
7. Эдельман В. С. Вблизи абсолютного нуля. Москва : Наука, 1983. 176 с.
8. Нарликар Дж. Неистовая Вселенная. Москва : Мир, 1985. 256 с.
9. Ільніцька К. С., Краснобокий Ю. М. Радіоелектроніка в системі підготовки майбутніх учителів природознавчого профілю. *Scientific review of the actual events, achievements and problems* : proceedings of the I International Scientific and Theoretical Conference, Berlin, December 1, 2023 / International Center of Scientific Research. Berlin, 2023. P. 250—251.

References:

1. Tkachenko, I. A., Krasnobokyi, Yu. M., & Hrom, I. S. (2023). Pro novi vlastyvosti vakuumu [About the new properties of vacuum]. O. Patriak (Eds.), *«Svit naukovykh doslidzhen. Vypusk 16»* [*"World of Scientific Research. Issue 16"*] : proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Internet Conference, (pp. 397—401). Ternopil : "Naukova spilnota"; WSSG w Przeworsku [in Ukrainian].
2. Smorodinskij, Ya. A. (1977). *Temperatura* [*Temperature*]. Moskva : Znanie [in Russian].
3. Ilnitska, K. S., Krasnobokyi, Yu. M., & Tkachenko, I. A. (2024). Termodynamichnyi analiz yavyshcha zorovoho spryiniattia elektromahnitnoho vyprominiuvannia [Thermodynamic analysis of the phenomenon of visual perception of electromagnetic radiation]. *Aktualni pytannia u suchasnii nautsi – Current Issues in Modern Science*, *2(20)*, 669—683 [in Ukrainian].
4. Verkin, B. I., Gredeskul, S. A., Pastur, L. A., Frejman, Yu. A., & Hramov, Yu. A. (1989). *L. V. Shubnikov i fizika nizkih temperatur* [*L. V. Shubnikov and low temperature physics*]. Moskva : Znanie [in Russian].
5. Tarasov, L. V. (1985). *Lazery: dejstvitelnost i nadezhdy* [*Lasers: Reality and Hopes*]. Moskva : Nauka [in Russian].
6. Fradkov, A. B. (1988). *Kriogennye zhidkosti* [*Cryogenic liquids*]. Moskva : Znanie [in Russian].
7. Edelman, V. S. (1983). Vblizi absolyutnogo nulya [Near absolute zero]. Moskva : Nauka [in Russian].
8. Narlikar, J. (1985). *Neistovaya Vselennaya* [*Furious Universe*]. Moskva : Mir [in Russian].
9. Ilnitska, K. S., & Krasnobokyi, Yu. M. (2023). Radioelektronika v systemi pidhotovky maibutnikh uchyteliv pryrodoznavchoho profiliu [Radioelectronics in the training system for future science teachers]. *Scientific review of the actual events, achievements and problems* : proceedings of the I International Scientific and Theoretical Conference, (pp. 250—251). Berlin : International Center of Scientific Research [in Ukrainian].