

УДК 577.3(075.8)

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-39>

Олександр ЧАЛИЙ<sup>1</sup>, д-р фіз.-мат. наук, проф.  
ORCID ID: 0000-0002-5755-3875  
e-mail: avchalyi7@gmail.com

Наталія ГРИЦЕНКО<sup>1</sup>, канд. пед. наук, доц.  
ORCID ID: 0000-0001-7686-4540  
e-mail: nataly812305@gmail.com

Альбіна КРИШТОПА<sup>1</sup> ст. викл.  
ORCID ID: 0000-0003-1034-7342  
e-mail: alla335578@gmail.com

Ірина МАРГОЛИЧ<sup>1</sup>, канд. фіз.-мат. наук, доц.  
ORCID ID: 0009 0000 6426 2593  
e-mail: iryna.margolych@gmail.com

Галина ХРАПІЙЧУК<sup>1</sup>, канд. фіз.-мат. наук, доц.  
ORCID ID: 0009-0008-6978-5850  
e-mail: halynakhrapiichuk@gmail.com

<sup>1</sup>Національний медичний університет імені О. О. Богомольця, Київ, Україна

## ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ МАСИ В МЕТОДІ ПОЗИТРОННОЇ ЕМІСІЙНОЇ ТОМОГРАФІЇ

*Презентацію присвячено актуальній проблемі медичної фізики, яка пов'язана із законом збереження маси в сучасному діагностичному методі позитронної емісійної томографії (ПЕТ). Теоретична основа методу ПЕТ базується на явищі анігіляції електрона і позитрона з утворенням двох гамма-квантів, тобто фотонів короткохвильового електромагнітного випромінювання гамма-діапазону. Проблема полягає в тому, що електрон і позитрон мають відмінну від нуля сумарну масу спокою, тоді як фотон представляє собою елементарну частинку, у якій відсутня маса. Тому виникає природне питання, чи дійсно спостерігається порушення закону збереження маси в процесі анігіляції електрона і позитрона в одному з основних діагностичних методів ПЕТ, який широко використовується в медичній практиці поряд з такими іншими діагностичними методами, як магнітна резонансна томографія (МРТ) та комп'ютерна томографія (КТ)? Проведене теоретичне дослідження надає послідовну та науково обґрунтовану відповідь на це принципове питання.*

**Ключові слова:** позитронна емісійна томографія (ПЕТ); процес анігіляції електрона та позитрона; границі застосування формули Ейнштейна  $E = mc^2$ ; релятивістська формула для зв'язку енергії, маси та імпульсу; формула для маси двофотонного комплексу; закон збереження маси в методі ПЕТ.

### Вступ

У цій презентації розглядаються фізичні основи сучасного діагностичного і лікувального методу позитронної емісійної томографії (ПЕТ) з акцентом на важливу проблему, пов'язану із законом збереження маси частинок, які беруть участь на всіх етапах реалізації методу ПЕТ. У досягненні цієї мети автори

© Чалий Олександр, Гриценко Наталія, Криштопа Альбіна,  
Марголич Ірина, Храпійчук Галина, 2024

ставлять перед собою досить складне завдання – зберегти, по можливості, певну фізичну строгість викладу, мінімізуючи при цьому кількість використаних формул. Як писав Стівен Хокінг у книзі (Hawking, 1988, р. 272): "Мені сказали, що кожна формула в книзі удвічі зменшує кількість покупців. Тоді я вирішив взагалі обійтися без формул. Щоправда, врешті я все-таки написав одне рівняння – знамените рівняння Ейнштейна  $E = mc^2$ . Сподіваюся, це не відлякає половину моїх потенційних читачів".

Ми збираємося написати трохи більше формул. Одна із них – та сама формула Ейнштейна, яку згадував Стівен Хокінг. Проте будуть вказані суттєві умови (границі) застосування цієї формули. Окрім того, буде використана ще одна релятивістська формула, яка враховує послідовно ефекти теорії відносності та  $\epsilon$ , безумовно, більш важливою, ніж формула Ейнштейна  $E = mc^2$ . Причиною для цього твердження є той факт, що формула Ейнштейна впливає із цієї релятивістської формули лише за певних спеціальних умов. Декілька інших формул, які будуть використані в цій презентації, представляють собою наслідки вказаної релятивістської формули. Саме ці останні формули дадуть можливість знайти відмінну від нуля масу двофотонного комплексу з антипаралельними векторами імпульсів гамма-квантів, які виникають у результаті анігіляції електрона і позитрона та відповідальні за закон збереження маси в методі ПЕТ.

#### ***Фізичний принцип методу ПЕТ та особливості його застосування.***

Основним фізичним принципом, що лежить в основі методу ПЕТ, є процес анігіляції електрона і позитрона (іншими словами, реакція взаємного зникнення матерії та антиматерії) з утворенням двох фотонів, які є квантами височастотного електромагнітного поля в діапазоні гамма-випромінювання (Чалий та ін., 2001). Обговоримо деякі особливості застосування методу ПЕТ у відділенні медичної фізики Університету Вісконсін-Медісон (США). На той час, близько 25 років тому, це відділення очолював професор Пол Делука, а один з авторів цієї статті (О.Ч.) виконував свій дослідницький проєкт як професор-переможець освітньої Програми академічних обмінів імені Дж. Вільяма Фулбрайта. Додаткову інформацію щодо результатів наших спільних досліджень можна знайти в (Chalyi, & Deluka, 1999).

У спеціальних експериментальних пристроях, призначених для вивчення ядерних реакцій (прикладом такого пристрою є циклотрон), створюються досить короткоживучі ізотопи з періодом піврозпаду  $T_{1/2}$  порядку декількох хвилин або десятків хвилин (Cameron, & Skofronik, 1978; Chalyi, 2020; Bushberg, & Seibert, 2022). Зазвичай використовують ізотопи легких елементів другого періоду таблиці Менделєєва, наприклад, ізотопи вуглецю  $^{11}_6\text{C}$  із періодом піврозпаду  $T_{1/2} = 20,4$  хв, азоту  $^{13}_7\text{N}$  із періодом піврозпаду  $T_{1/2} = 9,96$  хв, кисню  $^{15}_8\text{O}$  із періодом піврозпаду  $T_{1/2} = 2,04$  хв, фтору  $^{18}_9\text{F}$  із періодом піврозпаду  $T_{1/2} = 109,8$  хв. Ядра ізотопів таких елементів складаються приблизно з однакової кількості протонів і нейтронів, причому в результаті

перетворення протона на нейтрон у них відбувається спонтанний бета-розпад з утворенням позитронів.

Далі препарат, що містить позитронно-активні ізотопи, які штучно виробляються на циклотроні, швидко доставляються, наприклад, у відділення радіаційної онкології та вводяться пацієнтам. При цьому відбувається анігіляція частинок антиматерії, якими є позитрони, під час їх взаємодії з електронами, які завжди містяться в тілі людини, оскільки ми живемо в матеріальному (а не в антиматеріальному!) світі. У результаті реакції анігіляції кожної електрон-позитронної пари виникають зазвичай два гамма-кванти (фотони), які розлітаються в протилежні напрямки відповідно до закону збереження імпульсу. Завдяки іншому фундаментальному закону природи, яким є закон збереження енергії, повна енергія електрона і позитрона перетворюється на енергію двох фотонів. При цьому енергія кожного фотона (гамма-кванта) виявляється такою, що дорівнює  $8,18 \cdot 10^{-14}$  Дж. Зазначені особливості дозволяють використовувати спеціальну схему збігів та комп'ютерні програми для реєстрації цих фотонів з подальшою візуалізацією та аналізом отриманих зображень.

Слід зазначити, що фтордезоксіглюкоза (тобто ізотоп фтору  $^{18}\text{F}$  із періодом піврозпаду  $T_{1/2} = 109,8$  хв; радіоактивний індикатор – фтор-18, FDG – PET) знаходить широке застосування у використанні методу ПЕТ у радіаційній медицині через свої найбільші (серед перерахованих вище) значення періоду піврозпаду  $T_{1/2}$  та найменші значення поглиненої і еквівалентної доз іонізуючого випромінення. Як відомо, чим більше період піврозпаду  $T_{1/2}$  радіоактивного ізотопу (радіонукліду), тим менша кількість радіоактивних розпадів за одиницю часу і відповідно потужності поглиненої та еквівалентної доз. Пошук ефективних радіофармацевтичних препаратів, що мінімізують дозові навантаження на пацієнта, був і залишається актуальною проблемою використання методу ПЕТ для діагностики та лікування злоякісних пухлин, а також вивчення особливостей фізіологічних процесів у мозку та інших органах людини.

**Значення загальної проблеми маси та методи її розв'язання.** Здається на перший погляд, що закон збереження маси в діагностичному методі ПЕТ представляє собою досить вузьку теоретичну проблему медичної фізики. Насправді йдеться про надзвичайну за своєю складністю фундаментальну наукову проблему маси в найбільш широкому сенсі, яка має визначальне науково-методичне значення не тільки для медичної фізики, але й велике світоглядне та загально-філософське значення для живої і неживої природи в цілому.

Відповідь на фундаментальне питання щодо природи маси та енергії у Всесвіті (включаючи також і теоретичну проблему збереження маси в діагностичному методі ПЕТ) потребує використання методів досліджень та основних положень таких розділів фізики, як спеціальна і загальна теорія відносності, нерелятивістська та релятивістська квантова механіка, квантова теорія поля, астрофізика, космологія.

*Межі застосування формули Ейнштейна  $E = mc^2$ .* Вважається, що вперше Альберт Ейнштейн отримав свою знамениту формулу

$$E = mc^2, \quad (1)$$

яку часто називають законом еквівалентності енергії  $E$  та маси  $m$ , у 1905 р. у статті (Einstein, 1905). Самої формули (1) у цій статті не було наведено, але були написані такі слова, які в українському перекладі та зі збереженням оригінальних позначень повністю відповідають формулі (1): "Маса тіла є мірою енергії, яка міститься в ньому; якщо енергія змінюється на величину  $L$ , то маса змінюється відповідно на величину  $L / 9 \cdot 10^{20}$ , причому тут енергія вимірюється в ергах, а маса – у грамах". Зазначимо, що в ті роки популярною системою одиниць, якою користувався Ейнштейн, була система СГСЕ, у якій для одиниць довжини, маси, часу та енергії використовувалися сантиметр, грам, секунда та ерг, відповідно. Тому в наведеному формулюванні закону еквівалентності енергії та маси Альберт Ейнштейн використав для швидкості світла  $c$  у вакуумі значення  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с.

*Релятивістська формула для зв'язку між енергією, масою та імпульсом тіла.* Надалі будемо говорити про найважливішу, на нашу думку, формулу спеціальної теорії відносності (СТВ), яка описує зв'язок між енергією  $E$ , масою  $m$  та імпульсом  $\vec{p}$  тіла, яке рухається зі швидкістю  $\vec{v}$ . Ця формула має вигляд

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2. \quad (2)$$

Виведення формули (2) можна знайти в книгах (Landau, & Lifshits, 1971; 1976) класичного курсу теоретичної фізики Л.Д. Ландау і Є.М. Ліфшиця. Дуже виразним щодо цього є рис. 1, на якому зображено, як великий італійський фізик Енріко Фермі (1901–1954) вказує саме на формулу, що повністю еквівалентна релятивістській формулі (2). Зазначена формула (2), без сумніву, важливіша за більш відому формулу Ейнштейна (1) для зв'язку енергії та маси. Очевидною причиною правильності такого твердження є той факт, що формула (1) є частинним випадком як формули (2), так і тотожної до (2) формули, на яку вказує Енріко Фермі.

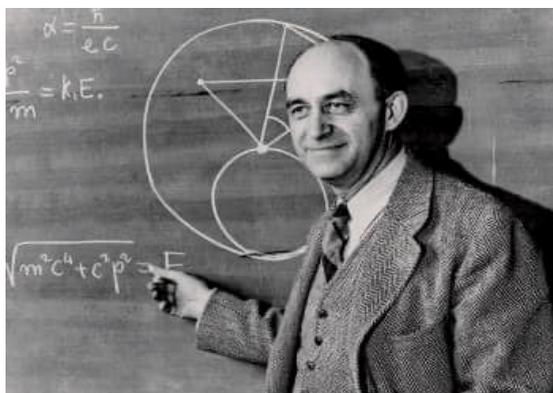


Рис. 1. Енріко Фермі, лауреат Нобелівської премії з фізики за 1938 рік, демонструє формулу (2)

Дійсно, формула Ейнштейна (1) отримується із формули (2) тільки за умови, коли імпульс тіла  $\vec{p} = 0$ . Це означає, що маємо такий принциповий висновок: **знаменита формула Альберта Ейнштейна  $E = mc^2$  характеризує зв'язок енергії спокою тіла  $E$  та маси спокою  $m$** . За відсутності стану спокою зв'язок між енергією  $E$ , масою  $m$  та імпульсом  $\vec{p}$  описується не виразом (1), а більш загальною формулою (2) для тіла, що рухається і має відмінний від нуля імпульс.

Слід зазначити, що ніякої іншої маси, ніж маса спокою, не повинно існувати. Також хибним є поняття так званої релятивістської маси  $m_{\text{рел}}$ , яка аномально зростає з наближенням швидкості  $\vec{v}$  тіла (елементарної частинки) до швидкості світла  $c$  відповідно до формули

$$m_{\text{рел}} = \frac{m}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (3)$$

Насправді, відповідно до перетворень Гендріка Лоренца (Lorentz et al., 1935) аномально збільшуються повна енергія  $E$  та імпульс  $\vec{p}$  тіла, що рухається з великою швидкістю, тоді як маса тіла  $m$  залишається незмінною і дорівнює масі спокою. Повна енергія  $E$  у СТВ визначається наступною формулою, яку отримав Альберт Ейнштейн:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (4)$$

Поява формули (3) для релятивістської маси пов'язана зі штучним об'єднанням у частку маси спокою  $m$  в чисельнику та величини  $\sqrt{1-v^2/c^2}$  у знаменнику формули (4). Для такого об'єднання відсутні будь-які розумні підстави. Дійсно, поява множника  $\sqrt{1-v^2/c^2}$  є прямим наслідком чотиривимірного перетворення Лоренца для координат  $x, y, z$  і часу  $t$ , а також аналогічного перетворення для чотиривимірного вектора імпульсу  $\vec{p}$  та енергії  $E$ . Формула (3) для релятивістської маси  $m_{\text{рел}}$  суперечить вимогам лоренц-інваріантності (тобто незмінності при перетвореннях Лоренца внаслідок переходу від одної інерціальної системи до іншої). Ця формула демонструє абсолютно протилежне, а саме: зміну маси під час переходу від одної інерціальної системи до іншої. Як було вже зазначено, маса тіла внаслідок перетворень Лоренца залишається рівною масі спокою, тобто є скалярним інваріантом у процесі цих перетворень.

Слід зазначити, що Альберт Ейнштейн у своїх працях про зв'язок енергії  $E$  та маси  $m$  не використовував формулу (2). Це твердження, як і висновок щодо справедливості формули Ейнштейна (1), лише для стану спокою, скоріше за все вперше висловив автор статті (Okun, 1989, p. 31) (див. також відповідні посилання в цій оглядовій публікації).

**Маса двофотонного комплексу, закон збереження маси в діагностичному методі ПЕТ.** Важлива проблема визначення маси системи двох фотонів за умови відсутності маси спокою у кожного із цих фотонів була досліджена авторами статті (Gabovych, A.M., & Gabovych, N., 2007, p. 649). Застосування проблеми маси двофотонного комплексу до діагностичного методу ПЕТ було розпочато у статті (Чалий, & Гриценко, 2012, p. 43–46) і продовжено в цій презентації.

Беручи до уваги умови адитивності енергії та імпульсів для системи із двох фотонів, релятивістську формулу (2) для маси спокою  $m_{12}$  двофотонного комплексу можна представити за допомогою такої формули:

$$m_{12} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2/c^4 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2/c^2}. \quad (5)$$

Розглянемо **перший випадок**, коли вектори різних за величиною імпульсів обох фотонів паралельні, тобто справедливі такі формули:  $\vec{p}_1 = p_1\vec{n}_1$ ,  $\vec{p}_2 = p_2\vec{n}_2$ , причому одиничні вектори  $\vec{n}_1$  і  $\vec{n}_2$ , які задають напрямок руху фотонів, паралельні між собою, тобто  $\vec{n}_1 = \vec{n}_2 = \vec{n}$ . Тоді, на підставі зв'язку  $E = c|\vec{p}|$  між енергією та модулем імпульсу фотона, маємо такий результат для квадрата суми імпульсів двох фотонів в другому доданку формули (5):

$$(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = (E_1 + E_2)^2/c^2. \quad (6)$$

Звідси випливає, що другий від'ємний доданок точно дорівнює першому додатному доданку під квадратним коренем формули (5). У результаті маємо такий висновок: **за умови паралельності векторів імпульсів обох фотонів відсутня не тільки маса спокою кожного окремого фотона, але відсутня й маса спокою всього двофотонного комплексу ( $m_{12} = 0$ ).**

Перейдемо до розгляду **другого випадку**, коли два фотони мають різні за модулем, але (на відміну від першого випадку) антипаралельні за напрямком вектори імпульсів, тобто  $\vec{n}_1 = -\vec{n}_2$ . У результаті, враховуючи додаткові співвідношення, маємо

$$\begin{aligned} \vec{p}_1 &= p_1\vec{n}_1 = (E_1/c)\vec{n}_1, \quad \vec{p}_2 = p_2\vec{n}_2 = (E_2/c)\vec{n}_2 = \\ &= -(E_2/c)\vec{n}_1, \quad (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = (E_1 - E_2)^2/c^2, \end{aligned} \quad (7)$$

формула (5) для маси двофотонного комплексу набуває вигляду

$$m_{12} = 2\sqrt{E_1 E_2}/c^2. \quad (8)$$

Вираз (8) дає всі підстави стверджувати: **у випадку, коли два фотони мають різні за модулем і антипаралельні за напрямком вектори імпульсів, маса  $m_{12}$  відмінна від нуля.**

І нарешті, розглянемо **третій випадок**, який саме і реалізується в діагностичному методі ПЕТ, коли високоенергетичні фотони електромагнітного випромінювання гамма-діапазону мають однакові за модулем та антипаралельні за напрямком вектори імпульсів, тобто  $|\vec{p}_1| = |\vec{p}_2|$  та  $\vec{n}_1 = -\vec{n}_2$ . У цьому випадку, враховуючи формулу Макса Планка для однакої енергії обох квантів  $E_1 = E_2 = h\nu$ , маса двофотонного комплексу в методі ПЕТ дорівнює

$$m_{12} = 2h\nu/c^2. \quad (9)$$

Беручи до уваги, що маса електронно-позитронної пари дорівнює  $1,82 \cdot 10^{-30}$  кг, можна знайти із формули (9) таке значення довжини хвилі  $\lambda$  кожного з двох гамма-квантів (фотонів):

$$\lambda = 2h / m_{e-p}c = 2,42 \times 10^{-12} \text{ м}, \quad (10)$$

для якої маса електронно-позитронного комплексу буде точно дорівнювати масі двофотонного комплексу. Таким чином, саме в останньому випадку закон

збереження маси буде виконуватися на всіх етапах використання діагностичного методу ПЕТ.

### Висновки

У презентації була досліджена важлива проблема виконання закону збереження маси при анігіляції електронно-позитронної пари в методі ПЕТ. Проведені дослідження базувались на послідовному використанні таких двох формул:

- релятивістської формули (2) для зв'язку енергії, маси та імпульсу, яка узагальнює знамениту формулу Ейнштейна  $E = mc^2$ , справедливу для стану спокою і нульового імпульсу;
- релятивістської формули (5) для маси двофотонного комплексу.

Для виконання закону збереження маси елементарних частинок, які беруть участь у процесі анігіляції електрона і позитрона з утворенням двох гамма-квантів у методі ПЕТ, необхідно, щоб високоенергетичні фотони електромагнітного випромінювання гамма-діапазону мали однакові за модулем та антипаралельні за напрямком вектори своїх імпульсів.

**Внесок авторів:** Олександр Чалий – концептуалізація, методологія, керівництво дослідженням, написання оригінального тексту; Наталя Гриценко – методологія і практичне використання в педагогіці, аналіз і перевірка даних, перегляд і редагування; Альбіна Криштопа – аналіз і перевірка даних, перегляд і редагування; Ірина Марголич – аналіз і перевірка даних, перегляд і редагування; Галина Храпійчук – аналіз і перевірка даних, перегляд і редагування, друк заключного тексту.

### Список використаних джерел

- Чалий, О.В., & Гриценко, Н.Л. (2012). Історичний розвиток концепції маси в фізичних теоріях XVII-XXI ст. *Фізика та астрономія в сучасній школі*. Ч. 1, 3, 43; Ч. 2, 6, 43.
- Чалий, О.В., Агапов, Б.Т., Меленевська, А.В., Мурашко, М.І., Радченко, Н.Ф., Стучинська, Н.В., & Цехмістер, Я.В. (2001). *Медична і біологічна фізика*. Т. 2. (О.В. Чалий, Ред.). ВІПОЛ.
- Bushberg, J.T., & Seibert, J.A. (2022). *The Essential Physics of Medical Imaging*. Study Guide, LWW.
- Gabovych, A.M., & Gabovych, N. (2007). How to explain the non-zero mass of electromagnetic radiation consisting of zero-mass photons? *European Journal of Physics*, 28, 649.
- Cameron, I.R., & Skofronik, I.G. (1978). *Medical Physics*. John Wiley & Sons.
- Chalyi, A. (Ed.). (2020). *Medical and Biological Physics*. (4rd ed.). Nova Knyga.
- Chalyi, A., & Deluka, P. (1999). Fulbright program builds bridges between leading American and Ukrainian universities in the study of medical physics and biomedical engineering. *Fulbright Newsletter*, 4, 8–11.
- Einstein, A. (1905). Ist die Tragheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Ann. Phys.*, 18, 639–641.
- Hawking, S.W. (1988). *A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes*. Bantam Books.
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1971). *The Classical Theory of Fields*. Pergamon Press.
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1976). *Mechanics*. Pergamon Press.
- Lorentz, H.A., Poincare, H., Einstein, A., & Minkowski, H. (1935). *The Principle of Relativity: Collection of Work of Classics of Relativism*.
- Okun, L. (1989). The concept of mass. *Physics Today*, 42, 31.

### References

- Bushberg, J.T., & Seibert, J.A. (2022). *The Essential Physics of Medical Imaging*. Study Guide, LWW.
- Gabovych, A.M., & Gabovych, N. (2007). How to explain the non-zero mass of electromagnetic radiation consisting of zero-mass photons? *European Journal of Physics*, 28, 649.

- Chalyi, A. (Ed.). (2020). *Medical and Biological Physics*. (4rd ed.). Nova Knyga.
- Chalyi, A.V., & Grytsenko, N.L. (2012). Historical development of the concept of mass in physical theories of the XVII-XXI centuries. *Physics and astronomy at modern school*, P. 1, 3, 43; P. 2, 6, 43 [in Ukrainian].
- Chalyi, O.V., Agapov, B.T., Melenevska, A.V., Murashko, M.I., Radchenko, N.F., Stuchynska, N.V., Tsekhmister Y.V. (2001). *Medical and Biological Physics*. Vol. 2. (O.V. Chalyi, Ed.). VIPOI [in Ukrainian].
- Chalyi, A., & Deluka, P. (1999). Fulbright program builds bridges between leading American and Ukrainian univer-sities in the study of medical physics and biomedical engineering. *Fulbright Newsletter*, 4, 8–11.
- Cameron, I.R., & Skofronik, I.G. (1978). *Medical Physics*. John Wiley & Sons.
- Einstein, A. (1905). Ist die Tragheit eines Korpers von seinem Energieinhalt abhanging? *Ann. Phys.*, 18, 639–641.
- Hawking, S.W. (1988). *A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes*. Bantam Books.
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1976). *Mechanics*. Pergamon Press.
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1971). *The Classical Theory of Fields*. Pergamon Press.
- Lorentz, H.A., Poincare, H., Einshtein, A., & Minkovski, H. (1935). *The Principle of Relativity: Collection of Work of Classics of Relativism*.
- Okun, L. (1989). The concept of mass. *Physics Today*, 42, 31.

Отримано редакцією збірника / Received: 22.06.24

Прорецензовано / Revised: 06.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 19.08.24

**Alexander CHALYI<sup>1</sup>, DSc (Phys. & Math.), Prof.**

**ORCID ID: 0000-0002-5755-3875**

**e-mail: avchalyi7@gmail.com**

**Natalia GRYSSENKO<sup>1</sup>, PhD (Ped.), Assoc. Prof.**

**ORCID ID: 0000-0001-7686-4540**

**e-mail: nataly812305@gmail.com**

**Albina KRYSHTOPA<sup>1</sup>, Senior Lecturer**

**ORCID ID: 0000-0003-1034-7342**

**e-mail: alla335578@gmail.com**

**Iryna MARGOLYCH<sup>1</sup>, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.**

**ORCID ID: 0009 0000 6426 2593**

**e-mail: iryna.margolych@gmail.com**

**Halyna KHRAPIICHUK<sup>1</sup>, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.**

**ORCID ID: 0009-0008-6978-5850**

**e-mail: halynakhrapiichuk@gmail.com**

**<sup>1</sup>Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine**

## **THE LAW OF MASS CONSERVATION IN THE METHOD OF POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY**

*This presentation is devoted to an actual problem of Medical Physics, which is related to the law of mass conservation in the modern diagnostic method of positron emission tomography (PET). The theoretical basis of the PET method is based on the phenomenon of annihilation of an electron and a positron with the formation of two gamma quanta, i.e. photons of short-wave electromagnetic radiation in the gamma range. The problem is that an electron and a positron have a non-zero total rest mass, while a photon is an elementary particle that has no mass. Therefore, a natural question arises, whether there is really a*

*violation of the law of mass conservation in the process of electron and positron annihilation in one of the main diagnostic methods of PET, which is widely used in medical practice along with such diagnostic methods as magnetic resonance imaging (MRI) and computed tomography (CT)? The theoretical research conducted below provides a consistent and scientifically based answer to this fundamental question.*

**Keywords:** *positron emission tomography (PET); the process of electron and positron annihilation; the limits of application of Einstein's formula  $E = mc^2$ ; the relativistic formula for the relationship between energy, mass and momentum; the formula for the mass of a 2-photon complex; the law of conservation of mass in the PET method.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.