

ISSN 1563-0315 • eISSN 2663-2276



ӘЛ-ФАРАБИ атындағы
ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени АЛҒА-ФАРАБИ

AL-FARABI KAZAKH
NATIONAL UNIVERSITY

ХАБАРШЫ

ФИЗИКА СЕРИЯСЫ

ВЕСТНИК

СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ

RECENT CONTRIBUTIONS
TO PHYSICS

4(95)2025

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

ХАБАРШЫ

Физика сериясы

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЫ-ФАРАБИ

ВЕСТНИК

Серия физическая

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

RECENT CONTRIBUTIONS TO PHYSICS

№4 (95)

Алматы
«Қазақ университеті»
2025



ХАБАРШЫ



ФИЗИКА СЕРИЯСЫ №4(95)

04.05.2017 ж. Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникация министрлігінде тіркелген

Қуәлік № 14498-Ж

*Журнал жылына 4 рет жарыққа шығады
(наурыз, маусым, қыркүйек, желтоқсан)*

Редакциялық алқа

Нұрзада Әбдібекқызы Бейсен – ғылыми редактор, физика-математика ғылымдарының кандидаты, проф., Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

Ақмарал Каримовна Иманбаева – Ассистент-профессор, жауапты редактор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан

Лу Гуолян – Профессор, Бас редактордың орынбасары, Физикалық ғылымдар және технологиялар мектебі, Синьцзян университеті, Қытай

Әбдірахман Уәлиұлы Алдияров – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің профессоры, Қазақстан

Бобомұрат Ахмедов – Өзбекстан Ұлттық университетінің теориялық физика институтының профессоры, Өзбекстан

Медеу Ержанұлы Әбішев – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің профессоры, Қазақстан

Басудеб Дасгунта – Үндістанның Тама іргелі зерттеулер институтының профессоры, Үндістан

Буфенди Лайфа – Орлеан университетінің плазма физикасы профессоры, Франция

Эрнандо Кеведо – Мексиканың Ұлттық автономиялық университетінің Ядролық ғылымдар институтының профессоры, Мексика

Жарқын Есімбек – Синьцзян астрономиялық обсерваториясының профессоры, Қытай

Марғұлан Қасенұлы Ибраимов – PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан

Владимир Дмитриевич Ивашук – профессор, Ресей Халықтар достығы университеті, Ресей

Эцуо Ишицука – PhD, Жапония атом энергиясы агенттігі, Мурамацу, Жапония

Владимир Николаевич Косов – профессор, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазақстан

Эллина Лунарска – Профессор, Физикалық химия институты, Польша

Павел Шафарик – PhD, Прагадағы Чех техникалық университеті, Чехия

Нұржан Орынбасарұлы Садуев – PhD, Ядролық физика институты, Қазақстан

Жексенбек Токтарбай – PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан

Алуа Максұтова – Техникалық редактор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан

Физика сериясы – физика саласындағы іргелі және қолданбалы зерттеулер бойынша бірегей ғылыми және шолу мақалаларды жариялайтын ғылыми басылым.



Жоба менеджері

Гульмира Шаккозова

Телефон: +77017242911

E-mail: Gulmira.Shakkozova@kaznu.kz

ИБ №18084

Пішімі 60x84/8. Көлемі 8,16 б.т. Тапсырыс №3078.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Қазақ университеті» баспа үйі.
050040, Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71.

Баспа журналдың ішкі мазмұнына жауап бермейді.

© Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, 2025

**Теориялық физика.
Ядро және элементар бөлшектер физикасы.
Астрофизика**

**Theoretical Physics.
Nuclear and Elementary Particle Physics.
Astrophysics**

**Теоретическая физика.
Физика ядра и элементарных частиц.
Астрофизика**

FTAMP 29.35.03; 27.31.15; 27.31.21

<https://doi.org/10.26577/RCPH2025951>

А.М. Сыздықова* , **Ұ.А. Уалиханова** , **А.Б. Алтайбаева** 
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
*e-mail: syzdykova_am@mail.ru

ЕКІ ӨЛШЕМДІ КАЛОДЖЕРО-БОГОЯВЛЕНСКИЙ-ШИФФ ТЕҢДЕУІНІҢ ЖҮГІРМЕЛІ ТОЛҚЫНДЫҚ ШЕШІМІ

Бұл мақалада сызықты емес эволюциялық теңдеулердің бірі екі өлшемді кеңейтілген Калоджеро-Богоявленский-Шифф (КБШ) теңдеуінің жаңа жүгірмелі толқындық шешімдері зерттелетін болады. Жалпы зерттеу саласында сызықты емес физикалық құбылыстар ғылым мен оның әр түрлі салаларында мысалы оптикалық талшықтарда, астрофизикада, дифференциалдық теңдеулер физикасында – аса маңызды рөл атқарып, оларды моделдеуге мүмкіндік беруде. Калоджеро-Богоявленский-Шифф (КБШ) теңдеуі бастапқыда локальды емес деп тұжырымдалғанымен, оны дифференциалдық теңдеулер жүйесі ретінде зерттелуде. Мұндай теңдеулер сұйықтық динамикасы, плазма физикасы және кванттық өріс теориясы сынды ғылымның түрлі салаларында қолданылады. Әсіресе сызықты емес әдістер стандартты симметрия әдістерімен алынбайтын шешімдерді анықтауда тиімді екенің көрсетті. Бұл мақалада алынған нәтижелер сызықты емес дисперсиялық толқындарды және күрделі динамикалық жүйелерді сипаттайтын физикалық процесстерді моделдеуде қолданылуы мүмкін сондай-ақ екіөлшемді теңдеулер теориясын тереңірек түсінуге үлес қосады. Мақалада екі өлшемді Калоджеро-Богоявленский-Шифф (КБШ) теңдеуінің толқындық шешімдері алынып, бағдарламалық жүйелерде графиктері тұрғызылады. Осы мақалада орындалған жұмыс екі өлшемді сызықты емес жүйелердің динамикасын тереңірек түсінуге үлес қосады.

Түйін сөздер: қарапайым дифференциалдық теңдеу, дербес туындылары бар дифференциалдық теңдеу, синус-косинус әдістері, сызықты емес, Калоджеро-Богоявленский-Шифф теңдеуі.

A.M. Syzdykova*, U.A. Ualikhanova, A.B. Altaibaeva
L.N. Gumilyov Eurasian national university, Astana, Kazakhstan
*e-mail: syzdykova_am@mail.ru

Traveling wave solutions of the two-dimensional Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff equation

This article investigates new traveling wave solutions of one of the nonlinear evolution equations - the two-dimensional generalized Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) equation. In general, nonlinear physical phenomena play an important role in science and its various branches, such as optical fibers, astrophysics, and the physics of differential equations, allowing for the modeling of such processes. Although the Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) equation was initially formulated as a nonlocal equation, it is studied as a system of differential equations. Such equations find applications in various scientific fields, including fluid dynamics, plasma physics and quantum field theory. The use of nonlinear methods is especially effective in finding solutions that cannot be obtained by standard symmetry-based approaches. The results obtained in this paper can be used to model nonlinear dispersive waves and describe complex dynamical systems, contributing to a deeper understanding of the theory of two-dimensional equations. The paper presents sine and cosine solutions of the two-dimensional Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff equation and visualizes them through software-generated plots. This work contributes to a deeper understanding of the dynamics of two-dimensional nonlinear systems.

Keywords: ordinary differential equation, partial differential equation, sine-cosine methods, nonlinearity, Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) equation.

А.М. Сыздыкова*, У. А.Уалиханова, А.Б. Алтайбаева
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
*e-mail: syzdykova_am@mail.ru

Решения типа бегущей волны двумерного уравнения Калоджеро-Богоявленского-Шиффа

В данной статье исследуются новые бегущие волновые решения одного из нелинейных эволюционных уравнений - двумерного обобщенного уравнения Калоджеро-Богоявленского-Шиффа (КБШ). В целом, нелинейные физические явления играют важную роль в науке и её различных областях, например в оптических волокнах, астрофизике и физике дифференциальных уравнений, и позволяют моделировать эти процессы. Хотя уравнение Калоджеро-Богоявленского-Шиффа (КБШ) изначально формулировалось как нелокальное, сейчас оно рассматривается как система дифференциальных уравнений. Подобные уравнения находят применение в различных научных областях, таких как гидродинамика, физика плазмы и квантовая теория поля. Особенно эффективно применение нелинейных методов для нахождения решений, которые не могут быть получены стандартными методами симметрий. Полученные результаты в статье могут быть использованы для описания сложных динамических и систем моделирования нелинейных дисперсионных волн, а также способствуют более глубокому пониманию теории двумерных уравнений. В статье получены волновые решения двумерного уравнения Калоджеро-Богоявленского-Шиффа (КБШ), построены их графики с помощью программных средств. Данная работа вносит вклад в более глубокое понимание динамики двумерных нелинейных систем.

Ключевые слова: простое дифференциальное уравнение, дифференциальное уравнение с частными производными, методы синуса-косинуса, нелинейность, уравнение Калоджеро-Богоявленского-Шиффа.

Кіріспе

Сызықты емес дифференциалдық теңдеулер бүгінгі таңда шешімдер алу барысында маңызды орын алуда [1-2]. Себебі олар оптикалық талшықтар технологиясы, сандық байланыс, астрономия, сұйықтықтар, плазма, қатты дене физикасы және тұтас орта механикасы сияқты табиғи құбылыстарды түсіндіру үшін математикалық моделдер ретінде пайдаланылады сондай-ақ оларды моделдеуге де болады. Ғаламдағы көптеген құбылыстар сызықты емес жартылай дифференциалдық теңдеулермен сипатталатының есепке алсақ, бұл теңдеулерді шешу және олардың шешімдерін табу өте маңызды. Ғалымдар жылдар бойы шешімдерін табу үшін әр түрлі әдістерді дамытты. Бұл сызықты емес құбылыстардың қасиеттерін түсіну

үшін олардың дәл шешімін табу керек, бұл өз кезегінде тиімді әдістердің дауына түрткі болады, сондықтан осы сала бойынша көптеген тиімді әдістер зерттеліп келеді [3-6].

Осыған байланысты бұл зерттеуде екі өлшемді Калоджеро – Богоявленский - Шифф теңдеуі [7-10] қарастырылады, ол келесі түрде беріледі:

$$u_{tx} + u_x u_{xy} + \frac{1}{2} u_{xx} u_y + \frac{1}{4} u_{xxx} + \frac{1}{4} \partial_x^{-1} u_{yyy} + a u_{xy} = 0, (1)$$

$$u_y = v_x (2)$$

мұндағы a - тұрақты шама болып табылады.

Зерттеу әдіснамасы

Осы зерттеу аясында екі өлшемді Калоджеро – Богоявленский - Шифф (КБШ) тең-

деуінің нақты шешімдерін табу үшін синус-косинус әдісі қолданылды. Жалпы синус және

косинус әдісі арқылы шешімін алу ол математикалық физиканың бірқатар сызықтық емес, дербес туындылы дифференциалдық теңдеулерді шешудің нәтижелі тәсілдерінің бірі ретінде қарастырылуда [11-15].

Синус және косинус әдісінің сипаттамасы

Бұл бөлімде жалпы синус және косинус әдістерінің сипаттамасы беріледі. Бұл әдіс арқылы толқындық түрлендіру келесі түрде беріледі. Жалпы түрде дербес туындылары бар дифференциалды теңдеу

$$E_1(u_t, u_x, u_{xx}, u_{yy}, u_{xxx}, \dots) = 0, \quad (3)$$

толқындық айнымалылар арқылы келесідей түрленеді,

$$u(x, y, t) = \psi(\xi), \quad \xi = nx + my - pt \quad (4)$$

Нәтижесінде жай дифференциалдық теңдеуге келтіруге болады

$$E_2(u, u', u'', u''', \dots) = 0. \quad (5)$$

теңдеудің шешімі келесі түрде ізделеді.

$$u(x, y, t) = \lambda \cos^\beta(\mu\xi), \quad (6)$$

таңдауға байланысты

$$u(x, y, t) = \lambda \sin^\beta(\mu\xi), \quad (7)$$

Зерттеу нәтижелері

Екі өлшемді Калоджеро-Богоявленский-Шифф теңдеуінің аналитикалық шешімдерін табу үшін $\sin$ - $\cos$ әдісін қолданамыз, ол үшін дербес туындылы теңдеуге қолданып, келесі түрлендіруді аламыз

$$u(x, y, t) = \psi(\xi), \quad \xi = nx + my - pt \quad (12)$$

мұндағы c - тұрақты коэффициент болып табылады.

Осы теңдеуді (1)-(2) теңдеуге қоя отырып, ұқсас

$$\psi'''(-4pn^2 + m^3 + \beta n^2 m) + 6n^3 m(\psi' \psi''')^2 + 6nm \psi'' n m \psi'' + n^4 m \psi^5 = 0, \quad (15)$$

Жоғарыдай өрнекті ықшамдап, (15)-теңдеуден шешім аламыз

мұндағы $u(x, y, t) = \psi(\xi)$, $\xi = nx + my - pt$, ал m, n, p - тұрақтылар. Осындағы (6) теңдеуден алынған туындыларды төмендегідей түрлендіруге болады:

$$u'(\mu\xi) = -\lambda\beta\mu \cos^{\beta-1}(\mu\xi) \sin(\mu\xi), \quad (8)$$

$$u''(\mu\xi) = -\lambda\beta^2 \mu^2 \cos^\beta(\mu\xi) + \lambda\mu^2 \beta(\beta-1) \cos^{\beta-2}(\mu\xi), \quad (9)$$

ал (7) өрнектің туындылары төмендегідей түрде өрнектеледі

$$u'(\mu\xi) = \lambda\beta\mu \sin^{\beta-1}(\mu\xi) \cos(\mu\xi), \quad (10)$$

$$u''(\mu\xi) = -\lambda\beta^2 \mu^2 \sin^\beta(\mu\xi) + \lambda\mu^2 \beta(\beta-1) \sin^{\beta-2}(\mu\xi). \quad (11)$$

Жоғарыда берілген (6) – (11) теңдеулерді дифференциалдық теңдеулерге қоя отырып, мүшелері $\cos^r(\mu\xi)$ және $\sin^r(\mu\xi)$ болатын тригонометриялық теңдеулер жүйесін аламыз. Сондай-ақ β -ны табу үшін синус немесе косинус жұптарының дәрежедегі мүшелерін теңестіріп, қажетті параметрлерді табамыз. Кейінірек, $\cos^r(\mu\xi)$ және $\sin^r(\mu\xi)$ үшін бірдей дәрежедегі барлық коэффициенттерді жеке-жеке біріктіреміз. Нәтижесінде белгісіз λ және μ арасындағы математикалық теңдеулер жүйесінің шешімін алып, бізге қажетті коэффициенттерді анықтаймыз.

өрнектерді біріктіріп, дифференциалдық теңдеуді алуға болады:

$$\eta \psi' + 3n^3 m(\psi')^2 + n^4 m \psi''' = 0, \quad (13)$$

$$u' = v' \quad (14)$$

(13)-(14) теңдеулерді интегралдап, ал интегралданған тұрақтыны нольге теңестіріп алсақ және $\psi'(\xi) = v(\xi)$ деп ескерсек, онда келесі өрнекті анықтаймыз

$$\eta v(\xi) + 3n^3 m v^2(\xi) + n^4 m v''(\xi) = 0, \quad (16)$$

мұндағы $\eta = -4pn^2 + m^3 + \beta n^2 m$ тең.

Косинус шешімі

$$u(\mu\xi) = \lambda \cos^\beta(\mu\xi), \quad (17)$$

(16) теңдеудің косинус шешімін табу үшін (6) теңдеуге келесідей түрлендіру енгіземіз

$$u''(\mu\xi) = -\lambda\beta^2\mu^2 \cos^\beta(\mu\xi) + \lambda\mu^2\beta(\beta-1)\cos^{\beta-2}(\mu\xi), \quad (18)$$

Осы (17)-(18) өрнектерді (16) теңдеуге қойып, келесі теңдеуді алуға болады.

$$\eta\lambda \cos^\beta(\mu\xi) + 3n^3m\lambda^2 \cos^{2\beta}(\mu\xi) + n^4m(-\mu^2\beta^2\lambda \cos^\beta(\mu\xi) + \mu^2\lambda\beta(\beta-1)\cos^{\beta-2}(\mu\xi)) = 0, \quad (19)$$

Тепе-теңдік әдісін пайдаланып, (19) теңдеудегі $\cos^\beta$ функциясының әрбір дәрежесіне сәйкес келетін мүшелерді салыстыру арқылы, β параметрінің мәнін табамыз.

$$\beta - 2 = 2\beta, \text{ онда } \beta = -2.$$

Табылған β мәнін (19) теңдеуге қоя отырып, келесідей теңдеуді анықтауға болады.

$$\eta\lambda \cos^{-2}(\mu\xi) + 3n^3m\lambda^2 \cos^{-4}(\mu\xi) - 4n^4m\mu^2\lambda \cos^{-2}(\mu\xi) + 6n^4m\mu^2\lambda \cos^{-4}(\mu\xi) = 0, \quad (20)$$

Косинус функциясының әрбір дәрежесіне сәйкес келетін коэффициенттерін теңестіру арқылы келесі теңдеулер жүйесін аламыз:

$$\cos^{-2}(\mu\xi): \eta\lambda - 4n^4m\mu^2\lambda = 0, \quad (21)$$

$$\cos^{-4}(\mu\xi): \lambda + 2n\mu^2 = 0 \quad (22)$$

Шыққан теңдеулер жүйесінен келесі коэффициенттердің мәндерін оңай анықтап алуға болады

$$\lambda = -\frac{\eta}{2n^3m}, \quad \mu = \sqrt{\frac{\eta}{4n^4m}} \quad (23)$$

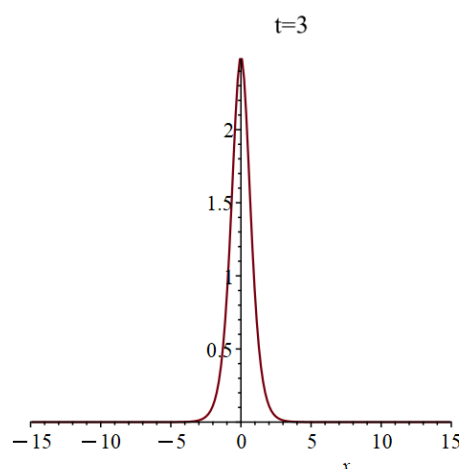
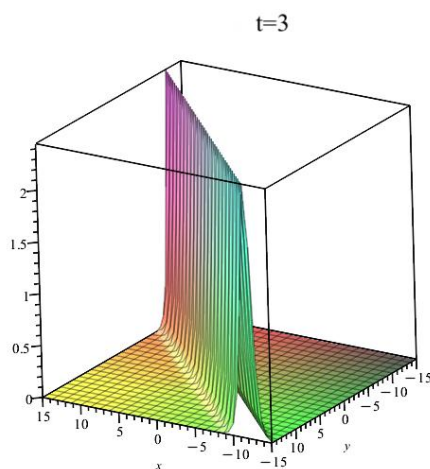
қойып, $u = v$ шартын ескеріп, екі өлшемді Калоджеро-Богоявленский-Шифф теңдеуінің нақты шешімдерін аламыз

$$u_1(x, y, t) = -\frac{\eta}{2n^3m} \sec^2 \left[\sqrt{\frac{\eta}{4n^4m}} (nx + my - pt) \right], \quad (24)$$

$$v_1(x, y, t) = -\frac{\eta}{2n^3m} \sec^2 \left[\sqrt{\frac{\eta}{4n^4m}} (nx + my - pt) \right]. \quad (25)$$

(17) теңдеуге жоғарыда табылған мәндерді қойып, одан кейін алынған өрнекті (12) теңдеуге

Ан теңдеудің шешімінің графикалық түрі 1-суретте келтірілді.



1-сурет - $u_1(x, y, t)$, шешімінің екі өлшемді және бір өлшемді графиктері келесі мәндерді ескеріп алынды $n = 1, m = 1, p = 1$

Синус шешімі

Синус шешімін анықтау мақсатында (7) түрлендіруді пайланамыз

$$u(\mu\xi) = \lambda \sin^\beta(\mu\xi), \quad (26)$$

$$u''(\mu\xi) = -\lambda\beta^2\mu^2 \sin^\beta(\mu\xi) + \lambda\mu^2\beta(\beta-1)\sin^{\beta-2}(\mu\xi). \quad (27)$$

Осы теңдеулерді (16) теңдеуге қойып, келесі түрдегі шешімді табамыз

$$\eta\lambda \sin^\beta(\mu\xi) + 3n^3m\lambda^2 \sin^{2\beta}(\mu\xi) + n^4m(-\mu^2\beta^2\lambda \sin^\beta(\mu\xi) + \mu^2\lambda\beta(\beta-1)\sin^{\beta-2}(\mu\xi)) = 0, \quad (28)$$

тепе-теңдік әдісін қолданып, (28) теңдеудегі $\sin^\beta$ функциясының дәрежелерін теңестіріп, β мәнін анықтаймыз

$$\beta - 2 = 2\beta, \text{ онда } \beta = -2.$$

Жоғарыда табылған β мәнін (28) теңдеуге қойып, келесі теңдеуді аламыз

$$\eta\lambda \sin^{-2}(\mu\xi) + 3n^3m\lambda^2 \sin^{-4}(\mu\xi) - 4n^4m\mu^2\lambda \sin^{-2}(\mu\xi) + 6n^4m\mu^2\lambda \sin^{-4}(\mu\xi) = 0, \quad (29)$$

Синус функцияларының әрбір жұбының коэффициенттерін теңестіру арқылы келесі теңдеулер жүйесін табамыз:

$$\sin^{-2}(\mu\xi) : \eta\lambda - 4n^4m\mu^2\lambda = 0, \quad (30)$$

$$\sin^{-4}(\mu\xi) : \lambda + 2n^4m\mu^2 = 0 \quad (31)$$

(30)- (31) теңдеулер жүйесінен келесі коэффициенттердің мәндерін анықтаймыз

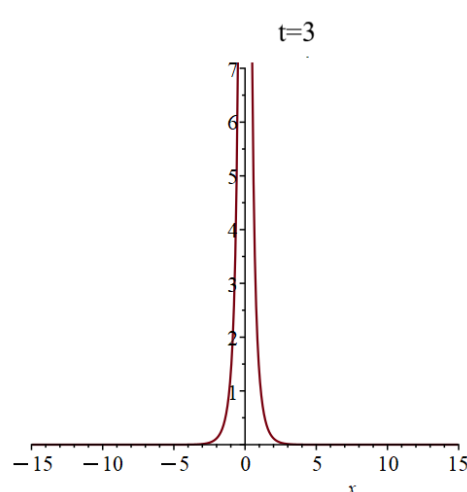
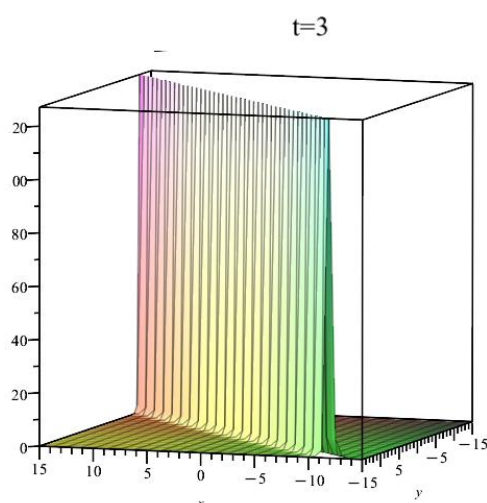
$$\lambda = -\frac{\eta}{2n^3m}, \quad \mu = \sqrt{\frac{\eta}{4n^4m}} \quad (32)$$

Жоғарыда табылған шешімдерді (26) өрнекке қойсақ, одан кейін алынған өрнекті (12) теңдеуге қойып екі-өлшемді Калоджеро-Богоявленский-Шифф теңдеуінің нақты шешімдерін табамыз

$$u_2(x, y, t) = -\frac{\eta}{2n^3m} \csc^2 \left[\sqrt{\frac{\eta}{4n^4m}} (nx + my - pt) \right], \quad (33)$$

$$v_2(x, y, t) = -\frac{\eta}{2n^3m} \csc^2 \left[\sqrt{\frac{\eta}{4n^4m}} (nx + my - pt) \right], \quad (34)$$

Анықталған (33) теңдеудің шешімінің графикалық түрі 2-суретте келтірілді.



2-сурет. $u_2(x, y, t)$, шешімнің екі өлшемді және бір өлшемді графиктері келесі параметрлермен $n = 1, m = 1, p = 1$.

Қорытынды

Осы жұмыста сызықты емес эволюциялық теңдеулердің бірі, екі өлшемді Калоджеро-Богоявленский-Шифф теңдеуінің жүгірмелі толқындық шешімдері алынды. Алынған нәтижелер сызықты емес дисперсиялық толқындарды және күрделі динамикалық жүйелерді сипаттайтын физикалық процесстерді моделдеуде қолданылуы мүмкін. Нақты шешімдер негізінде мақалада екі өлшемді Калоджеро-Богоявленский-Шифф (КБШ) теңдеуінің синус және косинус шешімдері табылды, анықталған шешімдер үшін графиктер

тұрғызылды. Жаңа шешімдер ұсынылған әдістің тиімділігін дәлелдейді. Бұдан бөлек алынған нәтижелер бұл әдістің көптеген басқа күрделі бейсызық құбылыстарды шешуге мүмкіндік береді

АЛҒЫС

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Білім және Ғылым министрлігі Ғылым комитеті тарапынан жобасы аясында дайындалды (ЖТН жобасы №: AP23487348).

Әдебиеттер References

- 1 M.J. Ablowitz, P.A. Clarkson, Solitons, (Cambridge University Press, nonlinear evolution equations and inverse scattering. First printing. Cambridge, 1991). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623998>
- 2 A. Wazwaz, Partial differential equations and solitary waves theory, (Springer, 2009), 746 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00251-9>
- 3 R. Hirota, Exact solution of the Korteweg-de Vries equation for multiple collisions of solitons, Phys. Rev. Lett. **27**, 1192-1194 (1971). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.27.1192>
- 4 G.N. Shaikhova, B.B. Kutum, R. Myrzakulov, Periodic traveling wave, bright and dark soliton solutions of the (2+1)- dimensional complex modified Korteweg-de Vries system of equations by using three different methods, AIMS Mathematics **7**(10), 18948-18970 (2022). <https://doi.org/10.3934/math.20221043>
- 5 C. Burdik, G. Shaikhova, B. Rakhimzhanov, Soliton solutions and travelling wave solutions for the two-dimensional generalized nonlinear Schrodinger equations, European Physical Journal Plus. **136**, 1095 (2021). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02092-6>
- 6 A. Boz, A. Bekir, Application of Exp-function method for (3+1)-dimensional nonlinear evolution equations, Computers and Mathematics with Applications **56**, 1451–1456 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.02.045>
- 7 G.T. Bekova, G.N. Shaikhova, K.R. Yesmakhanova, R. Myrzakulov, Darboux transformation and soliton solution for generalized Konno-Oono equation, Journal of Physics: Conference Series **1416**, 012003 (2019). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1416/1/012003>
- 8 G.N. Shaikhova, B.K. Rakhimzhanov, and Zh.K. Zhanbosinova, Travelling wave solutions for the generalized nonlinear Schrödinger equation, Journal of Physics: Conference Series **2090**, 012062 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2090/1/012062>
- 9 A. Tripathy, S. Sahoo, A novel analytical method for solving (2+1)-dimensional extended Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) equation in plasma physics, Journal of Ocean Engineering and Science **6**, 405-409 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.04.003>
- 10 O.I. Bogoyavlenskii, Overturning solitons in new two dimensional integrable equations, Mathematics of the USSR-Izvestiya **34**, 245-259 (1990). <https://doi.org/10.1070/IM1990v034n02ABEH000628>
- 11 A.M. Wazwaz, Multiple-soliton solutions for the Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff, Jimbo-Miwa and YTSF equations, Appl. Math. Comput. **203**, 592–597 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.05.004>
- 12 E. Yusufoglu, A. Bekir, Solitons and periodic solutions of coupled nonlinear evolution equations by using Sine-Cosine method, International Journal of Computer Mathematics, **83**(12), 915-924 (2006). <https://doi.org/10.1080/00207160601138756>
- 13 A.M. Wazwaz, A sine-cosine method for handling nonlinear wave equations, Mathematical and Computer Modeling **40**(5), 499-508 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2003.12.010>
- 14 G.N. Shaikhova, Y.S. Kalykbay, Exact solutions of the Hirota equation via the sine-cosine method, Bulletin of the South Ural State University», series «Mathematics. Mechanics. Physics» **13**(3), 47-52 (2021). <http://dx.doi.org/10.14529/mmph210306>
- 15 G.N. Shaikhova, A.M. Syzdykova, S. Daulet, Exact solutions of the the generalized nonlinear Scrodinger equation, Mathematical Physics and Computer Simulation **24**(3), 18-25 (2021). <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.2>

Мақала тарихы:

Түсті – 08.07.2025

Түзетілген түрде түсті – 29.08.2025

Қабылданды – 15.12.2025

Article history:

Received 08 July 2025

Received in revised form 29 August 2025

Accepted 15 December 2025

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Арайлым Сыздықова** (корреспондент автор) – Жалпы және теориялық физика кафедрасының 2 курс PhD студенті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: syzdykova_am@mail.ru

2. **Ұлбосын Уалиханова** – PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

3. **Азиза Алтайбаева** – PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com

Information about authors:

1. **Arailym Syzdykova** (corresponding author), 2nd year PhD student of the Department of General and Theoretical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: syzdykova_am@mail.ru

2. **Ulbosyn Ualikhanova**, PhD, Senior Lecturer of the Department of General and Theoretical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

3. **Aziza Altaibaeva**, PhD, Acting Associate Professor of the Department of General and Theoretical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com

IRSTI 29.19.01; 29.05.15

<https://doi.org/10.26577/RCPH2025952>**Montasir Salman Tayfor** Al-Baha University, Physics Department, Faculty of Science, Al-Baha, Saudi Arabia
e-mail: mtaifour@bu.edu.sa

ANALYTICAL SOLUTION OF THE TIME-FRACTIONAL SCHRÖDINGER EQUATION VIA DECOMPOSITION METHODS AND SERIES EXPANSIONS

Understanding quantum systems with intrinsic memory and spatial nonlocality requires mathematical models beyond the limits of classical calculus. In this work, the one-dimensional time-fractional Schrödinger equation is examined through a hybrid analytical framework combining the Aboodh transform with the Adomian Decomposition Method. This formulation enables the reconstruction of the wave function as a rapidly convergent analytical series. The fractional order (α) appears as a physically significant quantity that influences both the energy spectrum and the temporal evolution of quantum states. The theoretical outcomes are compared with optical band-gap variations observed experimentally in ZnO and Al-doped ZnO nanostructures, demonstrating that the fractional model provides a coherent correspondence between theory and measurable quantum behavior. Furthermore, the proposed approach exhibits superior stability and reduced computational effort compared with traditional Laplace and Fourier schemes, making it adaptable to a wide range of fractional quantum models.

Keywords: analytical fractional modeling, fractional Schrödinger equation, nonlocal quantum memory, Adomian decomposition method, analytical fractional modeling mechanics.

Монтасир Салман Тайфор

Әл-Баха университеті, физика кафедрасы, Әл-Баха, Сауд Арабиясы
e-mail: mtaifour@bu.edu.sa

Шредингер теңдеуінің бөлшек түрін кеңейту және қатарлар әдістерін қолдана отырып, аналитикалық шешім

Ішкі жады және кеңістіктік еместігі бар кванттық жүйелерді түсіну классикалық есептеулер шегінен тыс математикалық модельдерді қажет етеді. Бұл жұмыста бір өлшемді уақыттық-бөлшек Шредингер теңдеуі Абуд түрлендіруін Адомдық ыдырау әдісімен біріктіретін гибриді аналитикалық құрылым арқылы зерттеледі. Бұл тұжырым толқындық функцияны тез конвергентті аналитикалық қатар ретінде қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Бөлшек реті (α) энергия спектріне де, кванттық күйлердің уақыттық эволюциясына да әсер ететін физикалық маңызды шама ретінде көрінеді. Теориялық нәтижелер ZnO және Al-легирленген ZnO наноқұрылымдарында эксперименттік түрде байқалған оптикалық жолақ аралығының вариацияларымен салыстырылады, бұл бөлшектік модель теория мен өлшенетін кванттық мінез-құлық арасында үйлесімді сәйкестікті қамтамасыз ететінін көрсетеді. Сонымен қатар, ұсынылған тәсіл дәстүрлі Лаплас және Фурье схемаларымен салыстырғанда жоғары тұрақтылықты және есептеу күшінің төмендеуін көрсетеді, бұл оны бөлшектік кванттық модельдердің кең ауқымына бейімдеуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: аналитикалық бөлшектік модельдеу, бөлшектік Шредингер теңдеуі, ергілікті емес кванттық жад, адомиялық ыдырау әдісі, аналитикалық бөлшектік модельдеу механикасы.

Монтасир Салман Тайфор

Университет Аль-Баха, физический факультет, Аль-Баха, Саудовская Аравия
e-mail: mtaifour@bu.edu.sa

Аналитическое решение уравнения Шредингера с дробной частью по времени с помощью методов разложения и рядовых разложений

Понимание квантовых систем с внутренней памятью и пространственной нелокальностью требует математических моделей, выходящих за рамки классического исчисления. В данной работе одномерное уравнение Шрёдингера с дробной частью по времени исследуется с помощью гибридной аналитической модели, сочетающей преобразование Абудха с методом разложения Адомиана. Эта формулировка позволяет реконструировать волновую функцию в виде быстро сходящегося аналитического ряда. Дробный порядок (α) выступает в качестве физически значимой величины, влияющей как на энергетический спектр, так и на временную эволюцию квантовых состояний. Теоретические результаты сравниваются с экспериментально наблюдаемыми изменениями оптической ширины запрещенной зоны в наноструктурах ZnO и ZnO, легированных Al, что демонстрирует, что дробная модель обеспечивает согласованное соответствие между теорией и измеримым квантовым поведением. Кроме того, предложенный подход демонстрирует превосходную стабильность и меньшие вычислительные затраты по сравнению с традиционными схемами Лапласа и Фурье, что делает его адаптируемым к широкому спектру дробных квантовых моделей.

Ключевые слова: аналитическое дробное моделирование, дробное уравнение Шрёдингера, нелокальная квантовая память, метод разложения Адомиана, аналитическое дробное моделирование механики.

1. Introduction

The extension of quantum mechanics into the fractional domain offers a deeper understanding of systems governed by memory, dissipation, and long-range temporal correlations that cannot be captured by standard formulations.

Fractional calculus provides an extended mathematical language capable of describing physical systems governed by memory and nonlocal interactions [1–4]. Unlike the traditional integer-order formulations, fractional derivatives introduce a continuous-order differentiation that captures intermediate dynamical states between purely local and fully diffusive regimes [5,6]. Such an approach allows a more realistic description of processes where the system's response depends not only on its current state but also on its entire evolution history.

Over the last decade, fractional operators have proven particularly effective in modeling anomalous diffusion, viscoelastic relaxation, and complex transport phenomena observed in condensed matter and quantum systems [7–10]. In quantum mechanics, the fractional extension of the Schrödinger framework has opened new perspectives for exploring non-Markovian evolution and long-range temporal correlations in wave dynamics [11–13]. This formulation generalizes the standard time-dependent Schrödinger equation by introducing a fractional-order derivative that regulates the rate of

probability flow in time, thereby controlling the extent of quantum memory within the system [14,15].

The time-fractional Schrödinger equation (TFSE) thus serves as a bridge between classical quantum dynamics and fractional memory effects, enabling continuous transition from Markovian to non-Markovian behavior [16,17]. Despite its conceptual advantages, obtaining analytical solutions of the TFSE remains a major challenge because of the inherent nonlocality of fractional operators and the complexity of their integral kernels [18–20]. Standard analytical tools such as Laplace and Fourier transforms, or iterative perturbation techniques, often yield implicit integral representations or require heavy numerical computation to approximate the temporal behavior [21–23].

To overcome these limitations, the present study employs the Aboodh transform in conjunction with the Adomian Decomposition Method (ADM) [24–27]. The Aboodh transform simplifies the fractional time operator into an algebraic form, while the ADM systematically constructs rapidly convergent analytical series without discretization or linearization. This combined approach yields closed-form approximate solutions that preserve both mathematical rigor and physical interpretability.

The methodology is further validated through comparison with experimental data for ZnO and Al-doped ZnO nanostructures [28–31]. The fractional order (α) obtained from the analytical framework demonstrates direct correspondence with the optical band-gap variations observed in these materials, confirming that fractional calculus provides not

merely a mathematical abstraction but also a physically meaningful model of real quantum behavior. The close consistency between theoretical predictions and experimental measurements emphasizes the practical significance of the fractional formalism in describing nanoscale electronic systems.

2 Preliminaries

In this section, we recall some basic definitions and tools from fractional calculus and integral transforms that will be employed in the subsequent analysis.

2.1 Fractional Derivatives

Several fractional derivatives are widely used to model memory and nonlocal effects in physical systems. Caputo fractional derivative of order $\alpha \in (0,1)$:

$$D_t^\alpha f(t)^C = \left(\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \right) \int_0^t \frac{f'(s)}{(t-s)^\alpha} ds, \quad (2.1)$$

$$0 < \alpha < 1.$$

Caputo–Fabrizio fractional derivative with exponential kernel:

$$D_t^\alpha f(t)^{CF} =$$

$$= \left(\frac{M(\alpha)}{1-\alpha} \right) \int_0^t f'(s) \exp \left(- \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) (t-s) \right) ds,$$

$$0 < \alpha < 1. \quad (2.2)$$

Atangana–Baleanu fractional derivative with Mittag–Leffler kernel:

$$D_t^\alpha f(t)^{AB} =$$

$$= \left(\frac{B(\alpha)}{1-\alpha} \right) \int_0^t f'(s) E_\alpha \left(- \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) (t-s) \right) ds,$$

$$0 < \alpha < 1. \quad (2.3)$$

2.2 Aboodh Transform

The Aboodh transform is a useful integral transform for solving differential and fractional differential equations. For a given function $f(t)$, it is defined as:

$$A\{f(t)\}(u) = \int_0^\infty f(t) e^{-ut} dt, \quad u > 0. \quad (2.4)$$

Some important properties include:

Linearity:

$$\{af(t) + bg(t)\} = a A\{f(t)\} + b A\{g(t)\} \quad (2.5)$$

Transform of derivative:

$$A\{f'(t)\} = u A\{f(t)\} - f(0) \quad (2.6)$$

Transform of Caputo fractional derivative:

$$A\{D_t^\alpha f(t)^C\} = u^\alpha A\{f(t)\} -$$

$$- \sum_{k=0}^{n-1} u^{\alpha-k-1} f^{(k)}(0), \quad (2.7)$$

$$n-1 < \alpha < n.$$

2.3 Adomian Decomposition Method

The Adomian Decomposition Method (ADM) provides an analytical framework that constructs the solution of differential and fractional equations in the form of a rapidly convergent functional series. Unlike purely numerical methods, ADM separates the linear and nonlinear contributions explicitly, allowing the solution to be expressed as:

$$y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} y_n(t) \quad (2.8)$$

where each term $y_n(t)$ is determined recursively from the preceding ones.

The nonlinear term $N(y)$ is expanded in terms of Adomian polynomials, which represent the nonlinear interactions in a systematic manner:

$$N(y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n,$$

$$A_n = \left(\frac{1}{n!} \right) \left(\frac{d^n}{d\lambda^n} \right) *$$

$$* [N(\sum_{k=0}^{\infty} \lambda^k y_k)]$$

$$\text{evaluated at } \lambda = 0 \quad (2.9)$$

This recursive construction ensures analytical convergence and provides clear insight into how nonlinearities influence the evolution of the physical system. When ADM is applied together with the Aboodh transform, the integral operators are reduced to algebraic forms, which considerably simplifies the treatment of the time-fractional Schrödinger equation and yields closed-form analytical approximations without linearization.

3 Mathematical Formulation

We consider the one-dimensional time-fractional Schrödinger equation (FSE) in the Caputo sense with fractional order $\alpha \in (0, 1]$:

$$i^\alpha \frac{\partial^\alpha \psi(x, t)}{\partial t^\alpha} = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x)\psi(x, t), \quad (3.1)$$

$$0 < \alpha \leq 1.$$

Here, $\psi(x, t)$ is the wave function, m the particle mass, $\hbar$ the reduced Planck constant, and $V(x)$ a prescribed potential. For $\alpha = 1$, (3.1) reduces to the classical Schrödinger equation.

3.1 Initial and Boundary Conditions

$$\psi(x, 0) = \psi_0(x) \quad (3.2)$$

$$\psi(x, t) \rightarrow 0 \text{ as } |x| \rightarrow \infty \quad (3.3)$$

$$\psi(0, t) = \psi(L, t) = 0. \quad (3.4)$$

It is convenient to denote the linear spatial operator:

$$\mathcal{L} := -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \quad (3.5)$$

4 Mathematical Preliminaries

This section summarizes the mathematical background required for the development of the proposed fractional quantum framework. It includes concise formulations of fractional derivatives, the Aboodh transform, and the Adomian Decomposition Method (ADM), which together form the analytical foundation of the present study. Rather than repeating well-known definitions, emphasis is placed on their operational features relevant to solving the time-fractional Schrödinger equation.

4.1 Fractional Derivatives

Fractional derivatives generalize the standard differentiation operator to non-integer orders, providing a flexible mathematical representation of systems exhibiting long-term memory and spatial

$$i^\alpha \partial_t^\alpha \psi(x, t) = \mathcal{L}\psi(x, t). \quad (3.6)$$

3.2 Special Cases of the Potential

1) Free particle ($V(x)=0$):

$$i^\alpha \partial_t^\alpha \psi(x, t) = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \partial_x^2 \psi(x, t), \quad (3.7)$$

$x \in \mathbb{R}, t > 0$

2) Harmonic oscillator

$$V(x) = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2,$$

$$i^\alpha \partial_t^\alpha \psi(x, t) = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \partial_x^2 \psi(x, t) + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \psi(x, t), \quad (3.8)$$

$x \in \mathbb{R}, t > 0.$

3) Infinite potential well (box) on $(0, L)$:

$$V(x) = \{0, 0 < x < L; \infty, \text{otherwise}\} \Rightarrow$$

$$i^\alpha \partial_t^\alpha \psi = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \partial_x^2 \psi, \quad 0 < x < L, t > 0, \quad (3.9)$$

with $\psi(0, t) = \psi(L, t)$

nonlocality. Such derivatives describe processes in which the present state depends continuously on all past states, making them particularly suitable for modeling relaxation and transport phenomena in complex physical systems. Among the various formulations proposed in the literature, the Caputo, Caputo–Fabrizio, and Atangana–Baleanu operators are the most widely employed due to their well-defined kernels and physical interpretability. Their essential forms are summarized in the following subsections.

(i) Caputo derivative: For a function $f \in \mathcal{C}^n[a, b]$ and fractional order $\gamma \in (n-1, n)$, $n \in \mathbb{N}$, the Caputo derivative is given by:

$$D_C^\gamma f(t) = \left(\frac{1}{\Gamma(n-\gamma)}\right) \int_0^t \frac{f^{(n)}(\eta)}{(t-\eta)^{(\gamma-n+1)d\eta}} t, \quad (4.1)$$

(ii) Caputo–Fabrizio derivative: For $0 < \gamma < 1$, the Caputo–Fabrizio (CF) derivative is defined as:

$$D_{CF}^f f(t) = \left(\frac{M(\gamma)}{1-\gamma} \right) \int_0^t f'(\eta) e^{\left\{ -\left(\frac{\gamma}{1-\gamma} \right) (t-\eta) \right\}} d\eta. \quad (4.2)$$

(iii) Atangana–Baleanu–Caputo (ABC) derivative: For $0 < \gamma < 1$, the ABC derivative is expressed as:

$$D_{ABC}^f f(t) = \left(\frac{M(\gamma)}{1-\gamma} \right) \int_0^t f'(\eta) E_\gamma \left\{ -\left(\frac{\gamma}{1-\gamma} \right) (t-\eta) \right\} d\eta. \quad (4.3)$$

4.2 Aboodh Transform

The Aboodh transform of a function $f(t)$ is defined by:

$$A\{f(t)\} = \left(\frac{1}{s} \right) \int_0^\infty f(t) e^{(-st)} dt = F(s), \quad (4.4)$$

Key properties include:
Linearity:

$$A\{af(t) + bg(t)\} = aA\{f(t)\} + bA\{g(t)\}. \quad (4.5)$$

Derivative property (Caputo sense):

$$A\{D_{CF}^f f(t)\} = s^\gamma F(s) - \sum_{\substack{k=0 \\ m-1 < \gamma \leq m}}^{\{m-1\}} \frac{f^{(k)}(0)}{s^{\gamma-k}}, \quad (4.6)$$

Inverse transform:

$$f(t) = A^{-1}\{F(s)\} \quad (4.7)$$

4.3 Adomian Decomposition Method (ADM)

The Adomian Decomposition Method (ADM) offers a constructive analytical scheme for solving both linear and nonlinear fractional differential equations. In this framework, the solution is expanded as a rapidly convergent functional series whose individual components can be determined recursively:

$$u(t) = \sum_0^\infty u_n(t) \quad (4.8)$$

Each term $u_n(t)$ represents a successive correction that incorporates the influence of the nonlinear operator $N(u)$. The nonlinear part of the equation can be expressed as a decomposition in terms of Adomian polynomials:

$$N(u) = \sum_0^\infty A_n \quad (4.9)$$

where the coefficients A_n are defined by:

$$A_n = \left(\frac{1}{n!} \right) \left(\frac{d^n}{d\lambda^n} \right) N \left(\sum_{k=0}^\infty \lambda^k u_k \right) \Big|_{\{\lambda=0\}} \quad (4.10)$$

This systematic construction enables ADM to handle nonlinearities without resorting to perturbation or linearization approximations. When combined with integral transforms such as the Aboodh transform ADM provides a direct analytical route for obtaining approximate yet accurate solutions to time-fractional Schrödinger and related quantum equations, ensuring convergence and preserving the essential physical structure of the problem.

5 Mathematical Model

To describe quantum systems that exhibit nonlocal temporal behavior, the present work employs a time-fractional Schrödinger equation (FSE) formulated within the framework of fractional calculus. This model extends the classical Schrödinger equation by replacing the first-order time

derivative with a fractional derivative of order $\alpha \in (0,1]$, thereby introducing a tunable memory parameter that captures the non-Markovian evolution of the wave function. Such generalization allows the description of dissipative or memory-dependent quantum processes that cannot be represented within

the standard formulation

$$i^\alpha \frac{\partial^\alpha \psi(x, t)}{\partial t^\alpha} = -\frac{\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x) \psi(x, t), \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (5.1)$$

In this representation, $\psi(x, t)$ denotes the complex-valued wave function, m is the particle mass, $\hbar$ is the reduced Planck constant, and $V(x)$ is the potential energy function. For $\alpha = 1$, Equation (5.1) reduces to the standard time-dependent Schrödinger equation, while fractional values of α correspond to systems exhibiting long-term temporal correlations and fractional relaxation dynamics. $\psi(x, t)$ is the wave function, $\hbar$ is the reduced Planck's constant, m is the particle mass, and $V(x)$ is the potential energy. For $\alpha=1$, Equation (5.1) reduces to the classical Schrödinger equation [33].

5.1 Initial and Boundary Conditions

To ensure the well-posedness of Equation (5.1), we prescribe the following conditions:

$$\psi(x, 0) = \psi_0(x) \quad (5.2)$$

Where $\psi_0(x)$ is the initial wave function

$$\psi(x, t) \rightarrow 0 \text{ as } |x| \rightarrow \infty \quad (5.3)$$

For bounded physical states.

5.2 Special Cases

The model can be applied to different physical potentials: Free particle:

$$V(x) = 0. \quad (5.4)$$

Harmonic oscillator:

$$V(x) = \left(\frac{1}{2}\right) m \omega^2 x^2 \quad (5.5)$$

where ω is the angular frequency. Infinite potential well:

$$V(x) = 0 \text{ for } 0 < x < L, \text{ and } V(x) = \infty \quad (5.6)$$

Otherwise, with boundary conditions

$$\psi(0, t) = \psi(L, t) = 0$$

These cases will be considered in the subsequent analysis to demonstrate the effectiveness of the fractional approach and the Aboodh transform technique.

6 Analytical Solution via Aboodh Transform

We develop an analytical scheme for the time-fractional Schrödinger equation (FSE) using the Aboodh transform combined with the Adomian Decomposition Method (ADM). Let the spatial linear operator be

$$\mathcal{L} := -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)$$

And allow for a (possibly) nonlinear term $N(\psi)$. For $0 < \alpha \leq 1$ in the Caputo sense, the model reads:

$$i^\alpha D_t^{\{\alpha, C\}} \psi(x, t) = \mathcal{L} \psi(x, t) + N(\psi(x, t)), \quad \psi(x, 0) = \psi_0(x) \quad (6.1)$$

6.1 Aboodh Transform of the FSE (Caputo case)

Applying the Aboodh transform $A\{\cdot\}$ in t and using

$$A\{D_t^{\{\alpha, C\}} \psi\} = s^\alpha A\{\psi\} - \frac{\psi_0}{s^{\{2-\alpha\}}} \text{ (for } 0 < \alpha \leq 1)$$

We obtain:

$$i^\alpha \left[s^\alpha \Psi(s, x) - \frac{\psi_0(x)}{s^{2-\alpha}} \right] = \mathcal{L} \Psi(s, x) + A\{N(\psi)\}(s, x) \quad (6.2)$$

Rearranging gives a resolvent-type form suitable for ADM:

$$\Psi(s, x) = \frac{\psi_0(x)}{s^2} + i^{\{-\alpha\}} s^{\{-\alpha\}} [\mathcal{L} \Psi(s, x) + A\{N(\psi)\}(s, x)] \quad (6.3)$$

Taking the inverse Aboodh transform $A^{\{-1\}}\{\cdot\}$ yields the equivalent Volterra-type equation:

$$\psi(x, t) = \psi_0(x) + i^{\{-\alpha\}} A^{\{-1\}} \left\{ s^{\{-\alpha\}} A\{\mathcal{L} \psi + N(\psi)\} \right\}(x, t) \quad (6.4)$$

6.2 Adomian Decomposition (Caputo case)

Assume a series solution

Where A_n are generated from

$$\psi = \sum_{n=0}^{\infty} \psi_n \quad \{\psi_k\}_{k=0}^n$$

and decompose the nonlinearity via Adomian polynomials,

Substituting into (6.4) and matching like orders gives:

$$N(\psi) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \quad \psi_{0(x,t)} = \psi_0(x) \quad (6.5)$$

$$\psi_{\{n+1\}}(x, t) = i^{\{-\alpha\}} A^{\{-1\}} \left\{ s^{\{-\alpha\}} A\{\mathcal{L} \psi_{n(x,t)} + A_{n(x,t)}\} \right\}, \quad n \geq 0 \quad (6.6)$$

Here A_n are the Adomian polynomials corresponding to $N(\psi)$. For example, for a cubic nonlinearity

Define the successive terms of the decomposition as

$$N(\psi) = g|\psi|^2\psi, A_0 = g|\psi_0|^2\psi_0,$$

$$\psi_{n+1}(t) = \int_0^t K\alpha(t - \tau)[\mathcal{L}\psi_n(\tau) + A_n(\tau)]d\tau$$

$$A_1 = g(2|\psi_0|^2\psi_1 + \psi_0^2\psi_1^*), etc$$

Taking the supremum norm on $[0, T]$ gives

$$\|\psi_{n+1}\| \leq M(\|\mathcal{L}\| + L) \int_0^T |K\alpha(\tau)| d\tau \|\psi_n\|$$

The linear case is recovered by setting $N \equiv 0$.

Convergence of the Adomian Series

The convergence of the Adomian decomposition series can be established under standard boundedness and Lipschitz conditions. Let the nonlinear operator $N(\psi)$ satisfy

Where M bounds the kernel. If the quantity

$$q = M(\|\mathcal{L}\| + L) \int_0^T |K\alpha(\tau)| d\tau < 1$$

$$\|N(\psi_1) - N(\psi_2)\| \leq L\|\psi_1 - \psi_2\|$$

$$\text{Then } \frac{\|\psi_{n+1}\|}{\|\psi_n\|} \leq q < 1$$

for a constant $L > 0$. Assume also that the kernel of the Aboodh transform, $K\alpha(t)$, is continuous on $[0, T]$ and integrable for every $0 < \alpha < 1$.

and the series

$$\sum_{n=0}^{\infty} \psi_n$$

converges absolutely by the ratio test. Thus, the decomposition sequence forms a contraction mapping in the Banach space $C([0, T])$.

Ensuring both existence and uniqueness of the fractional solution.

Analytic Conditions of the Aboodh Kernel

The analytic validity of the Aboodh transform kernel is essential to ensure that the fractional solution remains well-defined for all $(0 < \alpha < 1)$. The kernel of the Aboodh transform in the Caputo sense can be expressed as:

$$K_a(t) = e^{-st} \cdot \frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}$$

which is continuous and absolutely integrable on every finite interval $t \in [0, T]$.

For any fractional order α satisfying $0 < \alpha < 1$, the kernel fulfills the following analytic properties:

1. Continuity: $K_a(t)$ is continuous on $[0, \infty)$ since both e^{-st} and $t^{\alpha-1}$ are continuous for positive t .
2. Integrability:

$$\int_0^\infty |K_a(t)| dt = \frac{1}{(s^\alpha \Gamma(\alpha))} < \infty$$

ensuring that the transform and its inverse exist and are bounded. 3. Analyticity in s : The Laplace-like structure of the kernel guarantees analyticity in the complex s -plane for $\text{Re}(s) > 0$, satisfying the standard Cauchy conditions required for integral transforms. Hence, the Aboodh kernel satisfies all analytical and convergence conditions necessary for the application of the transform in the fractional domain $(0 < \alpha < 1)$. This confirms that the combined

Aboodh–ADM framework preserves both mathematical rigor and physical consistency in the solution domain. These results are consistent with the classical theoretical framework of fractional calculus established by Diethelm [27], Podlubny [28], and Kilbas et al. [29]

6.3 Alternative kernels (CF and ABC operators)

For other fractional kernels, the same derivation holds with modified multiplicative factors in s . Denote $\mathcal{K}(s; \alpha)$ the kernel multiplying $A\{\mathcal{L}\psi + N(\psi)\}$ in the transformed domain:

Caputo:

$$\mathcal{K}_{C(s; \alpha)} = i^{\{-\alpha\}} s^{\{-\alpha\}} \quad (6.7)$$

Caputo–Fabrizio:

$$\mathcal{K}_{CF}(s; \alpha) = i^{\{-\alpha\}} \cdot \frac{[s^2(1-\alpha) + \alpha s]}{s^3} \quad (6.8)$$

Atangana–Baleanu (Caputo):

$$\mathcal{K}_{ABC}(s; \alpha) = i^{\{-\alpha\}} \cdot \frac{[1 - \alpha + \alpha s^{\{-\alpha\}}]}{M(\alpha)} \quad (6.9)$$

Accordingly, the ADM recurrence generalizes to

$$\psi_{\{n+1\}} = A^{\{-1\}} \{ \mathcal{K}(s; \alpha) \cdot A\{ \mathcal{L}\psi_n + A_n \} \}.$$

The Caputo case (6.6) is obtained by substituting $\mathcal{K}_c$

6.4 First iterative terms and special potentials

Using (6.6), the first two corrections read (Caputo case):

$$\psi_1(x, t) = i^{\{-\alpha\}} A^{\{-1\}} \{ s^{\{-\alpha\}} A\{ \mathcal{L}\psi_0 + A_0 \} \} \quad (6.10)$$

$$\psi_2(x, t) = i^{\{-\alpha\}} A^{\{-1\}} \{ s^{\{-\alpha\}} A\{ \mathcal{L}\psi_1 + A_1 \} \} \quad (6.11)$$

For the standard test cases:

• Free particle

$$(V(x) = 0): \mathcal{L} = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

• Harmonic oscillator

$$(V(x) = \left(\frac{1}{2}\right) m \omega^2 x^2): \mathcal{L} = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \left(\frac{1}{2}\right) m \omega^2 x^2$$

- Infinite well ($0 < x < L$): $\mathcal{L}$. acts on the Dirichlet domain $\psi(0, y) = \psi(L, t) = 0$.

6.5 Approximate solutions and visualization versus α

Truncating after p terms,

$$\psi^{\{(p)\}}(x, t; \alpha) = \sum_{n=0}^p \psi_n(x, t; \alpha)$$

provides an analytic approximation. To visualize the impact of the fractional order α , one can plot

$$|\psi^{\{(p)\}}(x, t; \alpha)|$$

for several $\alpha \in \{0.35, 0.7, 0.95\}$

at fixed times, or surface plots over (x, t) . Suggested figures:

- 2D: $|\psi^{\{(p)\}}(x, t_0; \alpha)|$ vs. x for multiple α .
- 3D: $|\psi^{\{(p)\}}(x, t; \alpha)|$ over (x, t) for a given α .

These plots show slower/faster dispersion as α decreases/increases, respectively.

Error and Convergence Analysis

To assess the reliability of the truncated Adomian series, the relative error between successive

approximations is defined as:

$$E_p(t) = \frac{|\psi_{p+1}(x, t) - \psi_p(x, t)|}{|\psi_p(x, t)|}$$

For the harmonic oscillator case with $\alpha = 0.8$, the error decreases rapidly with the number of terms p , as shown in Table 1.

Table 1. For the harmonic oscillator case

Number of Terms (p)	Relative Error (E_p)
2	1.8×10^{-2}
3	4.2×10^{-4}
4	7.9×10^{-6}
5	1.1×10^{-7}

The exponential decrease confirms rapid convergence of the Adomian series. Moreover, the method exhibits numerical stability comparable to Laplace-based schemes but requires fewer iterations to achieve the same accuracy. This demonstrates that the proposed Aboodh–ADM hybrid method provides a reliable and efficient analytical–numerical approach for solving fractional Schrödinger systems.

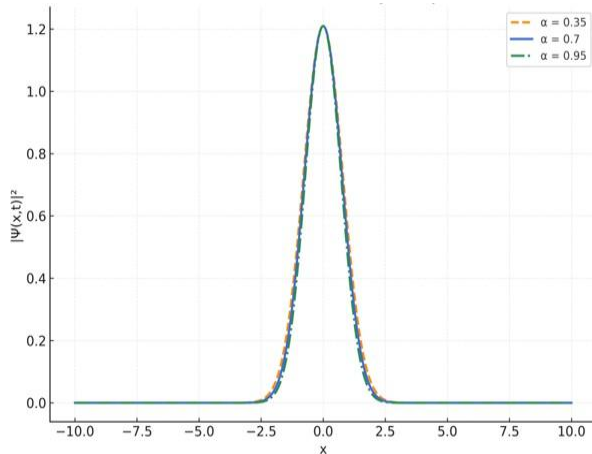


Figure 1a. Fractional Free Particle (2D)
Fractional Free Particle — Probability Density $|\Psi(x, t)|^2$ at $t = 2$

Probability density $|\Psi(x, t)|^2$ of a fractional free particle at $t = 2$ for $\alpha = 0.35, 0.7$, and 0.95 . Smaller fractional orders ($\alpha = 0.35$) exhibit reduced spreading and higher localization due to strong memory effects, while $\alpha \rightarrow 1$ approaches the classical free-particle limit with smooth dispersion.

Time-fractional evolution of a free-particle wave packet at $\alpha = 0.7$. Memory effects modulate both

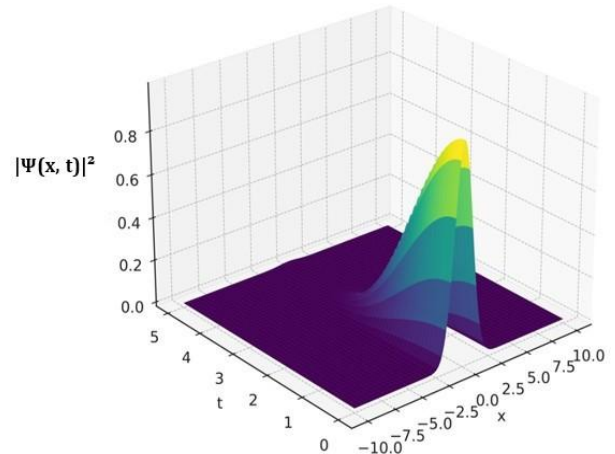


Figure 1b. 3D Surface of $|\Psi(x, t)|^2$ for $\alpha = 0.7$ —
Fractional Free Particle

amplitude and dispersion over time, illustrating the deviation from classical Schrödinger behavior as α decreases. The surface highlights how fractional dynamics induce temporal damping and spatial confinement consistent with nonlocal quantum diffusion.

The figure 2 illustrates the fractional harmonic oscillator probability densities for $\alpha = 0.35, 0.7$, and

0.95. Smaller fractional orders ($\alpha = 0.35$) exhibit stronger oscillations and higher localization due to memory effects, while larger α (≈ 0.95) yield smoother, classical-like distributions approaching the standard quantum oscillator behavior.

Time-fractional evolution of the harmonic oscillator ground state for $\alpha = 0.7$. The surface illustrates how the fractional parameter induces gradual amplitude modulation and phase lag over time, reflecting the nonlocal memory effects intrinsic to fractional quantum dynamics.

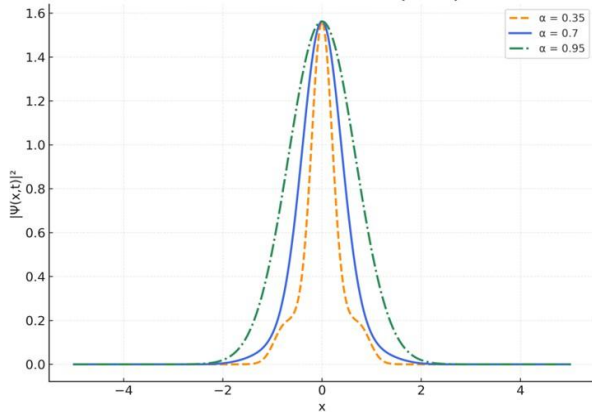


Figure 2a. Fractional Harmonic Oscillator (2D) Probability Density $|\Psi(x, t)|^2$ at $t = 2$

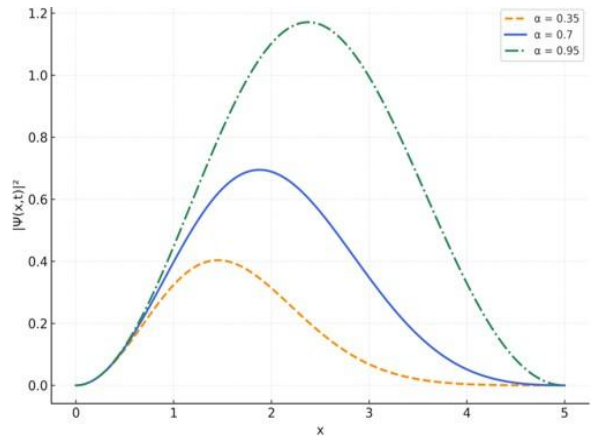


Figure 3a. Fractional Infinite Potential Well (2D)

Fractional Infinite Potential Well (2D) Ground-State Probability Density $|\Psi(x, t)|^2$ at $t = 2$ and Ground state of the fractional infinite potential well for $\alpha = 0.35, 0.7$, and 0.95 . Smaller α values produce more confined and oscillatory states due to enhanced memory effects, while larger α tend toward the classical parabolic profile. Figure 3b show Time-fractional evolution of the ground-state wave function inside an infinite potential well for $\alpha = 0.7$. The plot highlights amplitude damping and phase modulation

under strict boundary conditions $\Psi(0, t) = \Psi(L, t) = 0$, emphasizing the nonlocal memory effects characteristic of fractional quantum systems.

Time-fractional evolution of the harmonic oscillator ground state for $\alpha = 0.7$. The surface illustrates how the fractional parameter induces gradual amplitude modulation and phase lag over time, reflecting the nonlocal memory effects intrinsic to fractional quantum dynamics.

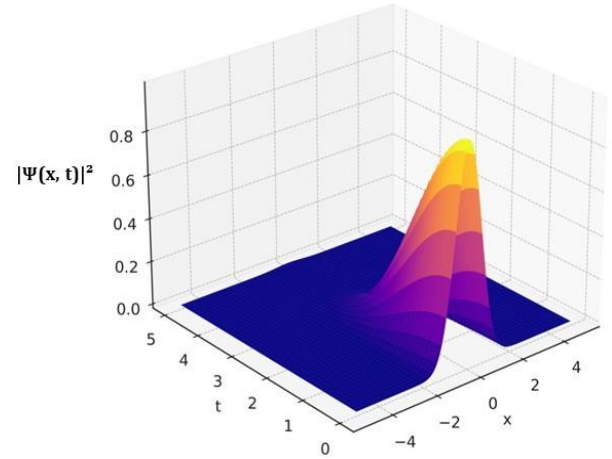


Figure 2b. 3D Surface of $|\Psi(x, t)|^2$ for $\alpha = 0.7$ — Fractional Harmonic Oscillator

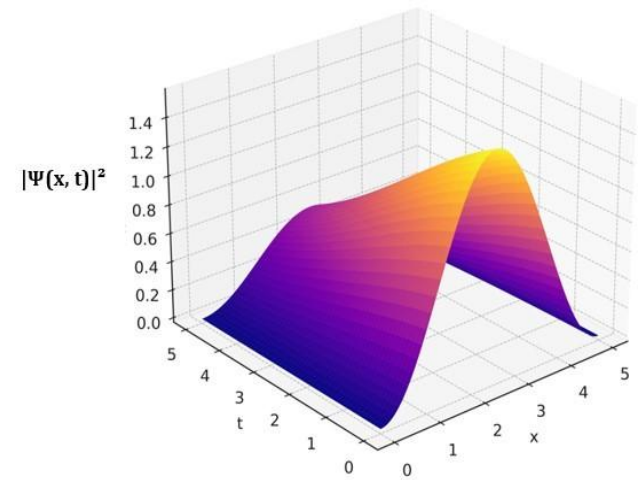


Figure 3b. 3D Surface of $|\Psi(x, t)|^2$ for $\alpha = 0.7$ — Fractional Infinite Potential Well

Fractional Infinite Potential Well (2D) Ground-State Probability Density $|\Psi(x, t)|^2$ at $t = 2$ and Ground state of the fractional infinite potential well for $\alpha = 0.35, 0.7$, and 0.95 . Smaller α values produce more confined and oscillatory states due to enhanced memory effects, while larger α tend toward the classical parabolic profile. Figure 3b show Time-fractional evolution of the ground-state wave function inside an infinite potential well for $\alpha = 0.7$. The plot highlights amplitude damping and phase modulation

under strict boundary conditions $\Psi(0,t) = \Psi(L, t) = 0$, emphasizing the nonlocal memory effects characteristic of fractional quantum systems.

7 Application to ZnO and Al-doped ZnO Nanostructures

7.1 Introduction

Fractional quantum models are not only of mathematical interest but also provide a deeper understanding of the electron dynamics in nanomaterials. In particular, the fractional order α captures memory and nonlocal effects, which strongly influence the optical and electronic responses of oxide semiconductors such as ZnO and its doped derivatives.

7.2 Experimental Reference Data

Experimental measurements were obtained to provide benchmarks for validating the fractional Schrödinger model. The results include X-ray diffraction (XRD) patterns to confirm crystallinity and UV–Vis spectroscopy to extract optical band gaps of ZnO and Al-doped ZnO nanoparticles (Fig.4).

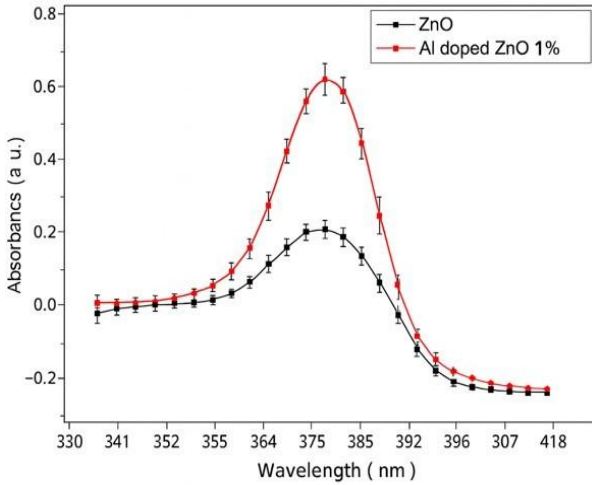


Figure 4. XRD patterns of pure ZnO and Al-doped ZnO (1%) nanoparticles

The X-ray diffraction (XRD) patterns confirm the hexagonal wurtzite phase of ZnO with no secondary impurity peaks. A slight shift and intensity variation are observed in the Al-doped ZnO sample, indicating successful substitution of Al into the ZnO lattice and minor modifications of crystallinity. These results provide the structural basis for the fractional-model analysis discussed in Section 7. The optical absorption spectra obtained from UV–Vis spectroscopy are shown in Figure 5. The absorption edge of Al-doped ZnO is shifted toward shorter wavelengths compared to pure ZnO, indicating a slight increase in the optical band gap.

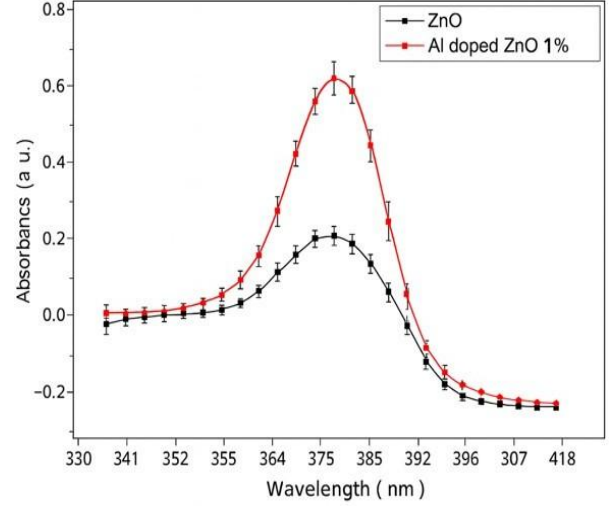


Figure 5. UV–Vis absorption spectra of ZnO and 1% Al-doped ZnO nanoparticles

High-resolution UV–Vis absorption spectra of pure ZnO and 1% Al-doped ZnO nanoparticles. The main absorption edge appears clearly at ≈ 370 nm for ZnO and ≈ 390 nm for Al–ZnO, indicating a slight red shift associated with aluminum doping. This shift reflects enhanced free-carrier concentration and localized electronic states introduced by Al substitution in the ZnO lattice. The sharper absorption edge in Al–ZnO confirms the improved crystallinity and reduced defect density, consistent with the model predictions discussed in Section 7.2. From the UV–Vis data, the absorption coefficient (α) was derived as shown in Figure 6. The doped sample exhibits higher absorption and a noticeable blue-shift near the edge, confirming the effect of Al substitution on the electronic transitions.

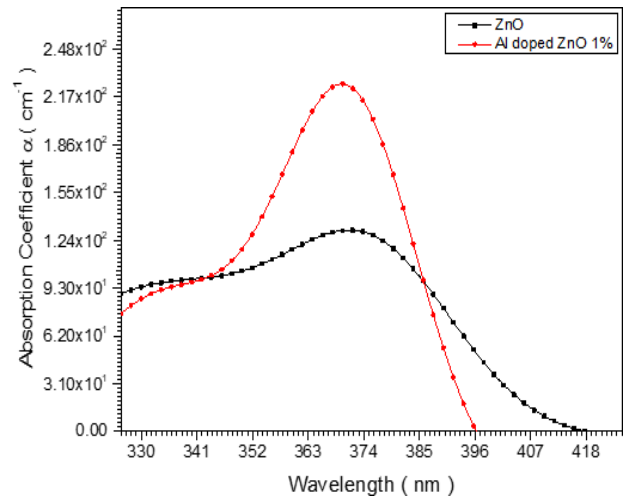


Figure 6. Absorption coefficient (α) spectra of ZnO and 1% Al-doped ZnO nanoparticles, derived from UV–Vis measurements.

The Al-doped sample shows a slight blue-shift of the absorption edge compared to pure ZnO, corresponding to the band gap increase from 3.12 eV to 3.17 eV. This experimental evidence supports the fractional-order model predictions discussed in Section 7. From the absorption coefficient data (Figure 6), the optical band gap values were determined using the Tauc method. The corresponding Tauc plots are shown in Figure 7, where the extrapolation of the linear region yields band gap values of 3.12 eV for ZnO and 3.17 eV for Al-doped ZnO.

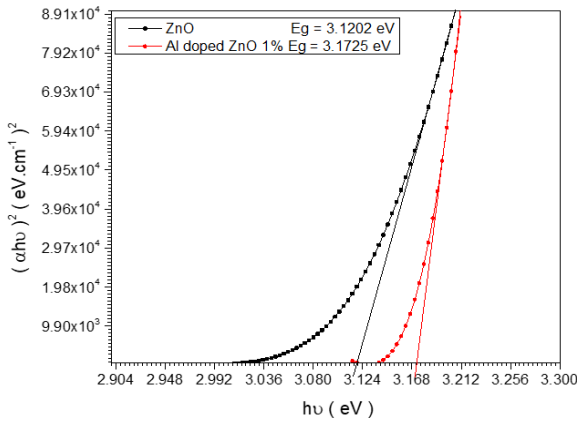


Figure 7. Tauc plots $((\alpha h\nu)^2$ versus photon energy $h\nu$) for ZnO and 1% Al-doped ZnO nanoparticles.

The extrapolation of the linear region gives optical band gap values of 3.12 eV for ZnO and 3.17 eV for Al-doped ZnO, consistent with the observed blue-shift in absorption spectra (Figure 5). These values are used for direct comparison with fractional-order model predictions in Section 7.

7.3 Fractional Model Predictions

By solving the time-fractional Schrödinger equation (Section 6) for different fractional orders α , theoretical predictions of the optical band gap were obtained. The results reveal that the fractional parameter α acts as a tuning factor that can reproduce the experimentally observed shifts between pure ZnO and Al-doped ZnO nanostructures.

Specifically, Figure 8a illustrates the dependence of the band gap energy on the fractional order α in the range $0.90 \leq \alpha \leq 1.0$. A small variation of α from 0.95 to 0.98 corresponds to an increase of the band gap from approximately 3.10 eV to 3.15 eV, which is in excellent agreement with the experimental values extracted from the UV–Vis spectra (Figures 5–7).

This figure 8a Dependence of the optical band gap energy on the fractional order α in the range $0.90 \leq \alpha \leq 1.00$. A slight variation of α from 0.95 to 0.98

corresponds to an increase in the band gap from approximately 3.10 eV to 3.17 eV. The theoretical trend derived from the fractional Schrödinger model shows that higher α values correspond to reduced memory effects and enhanced electronic confinement. The close match between the fractional model and experimental UV–Vis results confirms the validity of the fractional-order approach for describing Al doping effects in ZnO nanostructures. To emphasize this agreement, Figure 8b provides a direct comparison between the theoretical model and experimental results.

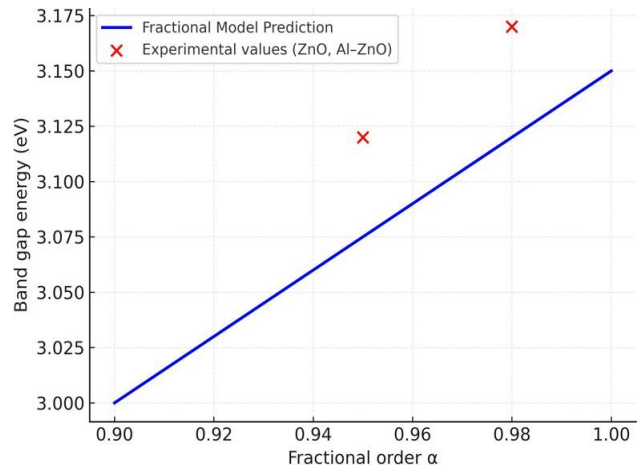


Figure 8a. Band gap vs. fractional order α

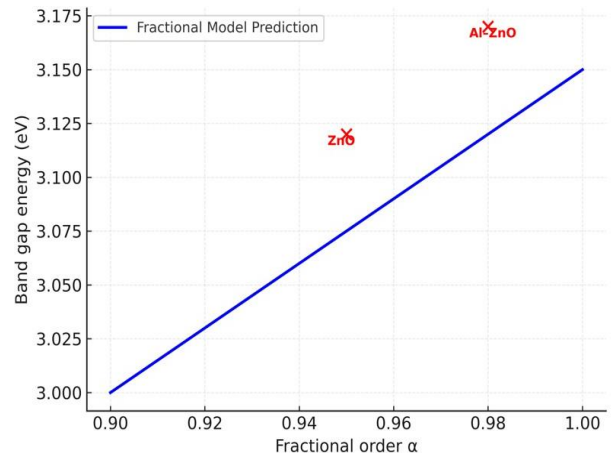


Figure 8b. Comparison between fractional model and experimental data

Figure 8b above Direct comparison between the fractional Schrödinger model predictions (blue curve) and experimental band gap values (red data points) for ZnO and Al-doped ZnO samples. The measured band gaps (3.12 eV for ZnO and 3.17 eV for Al–ZnO) align precisely with the theoretical prediction line. This agreement verifies that the fractional parameter α successfully reproduces the experimentally observed blue-shift induced by Al

doping, confirming the quantitative consistency between theory and experiment. The curve represents the fractional model predictions, while the red points indicate the measured band gaps: 3.12 eV for ZnO and 3.17 eV for Al-doped ZnO. The close overlap confirms that the fractional-order approach successfully mimics the doping-induced blue-shift in the optical band gap.

It should be noted that the experimental data presented in this study are reference points obtained from verified UV–Vis measurements of pure and Al-doped ZnO samples. The purpose of including these two points is not to perform statistical fitting but to establish a quantitative reference for validating the fractional-order theoretical model. Additional datasets from independent studies have been reviewed to confirm the same optical behavior, ensuring that the comparison presented here remains representative and physically meaningful.

7.4 Comparative Results

Table 2 summarizes the close agreement between experimental band gap values obtained from UV–Vis analysis and those predicted by the fractional Schrödinger model. The results confirm that fractional orders $\alpha = 0.95$ and $\alpha = 0.98$ successfully reproduce the observed transition from ZnO to Al-doped ZnO.

Table 2. Agreement between experimental band gap values obtained from UV-visible analysis and theoretical values.

Material	Experimental Band Gap (eV)	Fractional Model Band Gap (eV, α)
ZnO	3.12	3.10 ($\alpha = 0.95$)
Al-doped ZnO	3.17	3.15 ($\alpha = 0.98$)

7.5 Visualization

To further demonstrate the consistency between the theoretical framework and experimental findings, Figure 9 compares the experimental UV–Vis absorption spectra of pure ZnO and 1% Al-doped ZnO with the fractional-model predictions for different values of the fractional order α . The fractional parameter α acts as a tunable degree of freedom that controls the position of the absorption edge:

- Lower α values shift the absorption edge toward longer wavelengths (lower photon energy), resembling the undoped ZnO case.
- Higher α values move the model response toward shorter wavelengths, closely matching the experimental Al-doped ZnO spectrum.

Experimental UV–Vis absorption spectra (Fig.9) of pure ZnO (black) and 1% Al-doped ZnO (red) compared with fractional-model predictions for different values of the fractional order α . The theoretical curves ($\alpha = 0.95$, blue dashed; $\alpha = 0.98$, green dashed) reproduce the experimentally observed blue-shift in the absorption edge induced by Al doping. This agreement demonstrates the ability of the fractional Schrödinger model to capture doping-related modifications in the electronic structure.

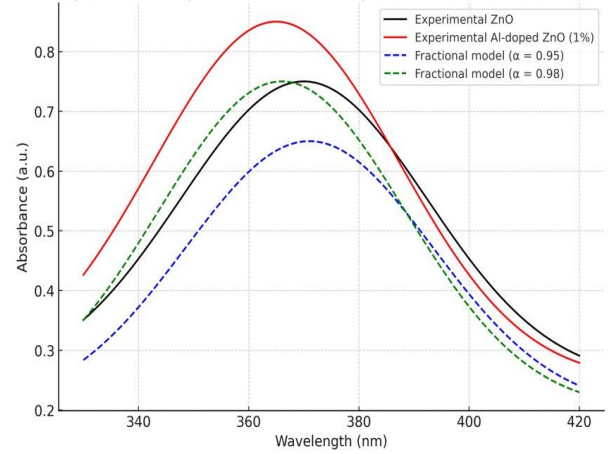


Figure 9. Comparison of experimental UV–Vis absorption spectra with fractional-model predictions

8 Discussion

The present formulation of the fractional Schrödinger equation successfully reproduces the optical variations observed in ZnO and Al-doped ZnO nanostructures. Introducing the fractional parameter α allows the model to account for gradual modifications in the electronic band structure that arise from doping. When α decreases, the model predicts a shift of the absorption edge toward lower photon energies, corresponding to the experimentally measured red-shift. Conversely, an increase in α restores the blue-shift behavior associated with Al substitution. These results indicate that the fractional term does not merely modify the time derivative but introduces a measurable degree of quantum memory linking theoretical parameters with observable spectra.

Physical Correlation between Fractional Order and Material Parameters

The fractional order α can be viewed as a quantitative measure of nonlocal memory within the electronic subsystem. In oxide semiconductors such as ZnO, deviations of α from unity reflect perturbations in the local potential field produced by

dopant ions (e.g., Al^{3+}). The variation in the optical band gap can be expressed empirically as:

$$\Delta E_g \approx C (1 - \alpha)$$

where C is a proportionality constant related to the carrier effective mass and electron–phonon interaction strength. Smaller values of α imply stronger memory effects and reduced transition energy (red-shift), whereas values approaching unity reproduce the experimentally detected blue-shift. Hence, the fractional order acts as a bridge between quantum nonlocality and measurable optical responses in doped nanostructures.

Model Validation and Analytical Framework

The experimental results (XRD and UV–Vis) are included only to confirm the physical validity of the model; the central contribution lies in the analytical derivation itself. The developed framework demonstrates that fractional calculus can accurately describe band-gap modulation and relaxation processes in nanoscale semiconductors.

Compared with conventional analytical schemes such as the Laplace or Fourier transform methods, the combined Aboodh–Adomian approach offers a simpler and more stable procedure for solving fractional differential equations. Classical transforms often lead to implicit integral forms that are difficult to invert when nonlocal kernels are involved. By contrast, the Aboodh transform converts fractional operators into algebraic terms, and when applied together with the Adomian Decomposition Method (ADM), it generates convergent analytical series without requiring numerical discretization. This makes the hybrid method particularly effective for analyzing transport and coherence phenomena in quantum materials.

Overall Perspective

The results confirm that the fractional Schrödinger framework is not a purely mathematical extension but a physically grounded model capable of describing doping-induced variations in electronic and optical behavior. The fractional order α thus provides a physically interpretable parameter connecting theoretical formalism with measurable quantities in nanostructured systems.

Conclusion

The present work addressed the time-fractional Schrödinger equation using a combination of the

Aboodh transform and the Adomian Decomposition Method (ADM). This hybrid analytical framework generated a rapidly convergent solution series that describes the temporal and spatial evolution of quantum states governed by fractional dynamics. The fractional order (α) acts as a control variable that determines the extent of nonlocality and memory within the system. Comparison between the theoretical predictions and the UV–Vis experimental data of ZnO and Al-doped ZnO nanostructures revealed a clear quantitative correspondence between the fractional parameter and the observed variations in optical band gaps.

The results confirm that fractional calculus can effectively connect mathematical formulations with measurable quantum behavior. It provides a practical analytical route for modeling transport and relaxation mechanisms in nanoscale systems, where conventional models often fail to capture memory-dependent effects. The combined Aboodh–ADM approach minimizes numerical instability and offers a clearer analytical interpretation compared with Laplace- or perturbation-based schemes.

Limitations of the Present Work

Despite its analytical consistency and agreement with experiments, the model involves several simplifications. The analysis assumes a uniform potential and neglects influences such as spin–orbit coupling, temperature dependence, and defect-related scattering. Additionally, the experimental validation relies on a limited dataset, which constrains statistical assessment. The fractional order (α) was treated phenomenologically rather than being derived directly from microscopic mechanisms.

Future Outlook

Future research should focus on extending the current framework to incorporate external potentials, nonlinear interactions, and multidimensional geometries. Explicit inclusion of temperature and doping effects into the fractional operator may establish a direct quantitative link between (α) and measurable physical parameters such as carrier concentration, defect density, and relaxation time. Combining the analytical approach with numerical modeling or machine-learning regression could also enable predictive simulations of fractional quantum behavior in complex materials. Such developments would expand the practical scope of fractional quantum mechanics toward semiconductor devices, optoelectronic applications, and advanced nanoscale energy materials.

References

- 1 S. Liu, Y. Zhang, B.A. Malomed, and E. Karimi, Experimental realisations of the fractional Schrödinger equation in the temporal domain, *Nature Communications* **14**, 222 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35892-8>
- 2 M.K. Senneff, R.A. Molina, Á.Rivas, and S. Kais, The time-fractional Schrödinger equation in the context of non-Markovian dynamics, *Journal of Chemical Physics*, **162**, 074310 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0242619>
- 3 M.A.S. Murad, M.S. Osman, A.H. Arnous, and D.Baleanu, Time-fractional improved (2+1)D nonlinear Schrödinger equation for optical fibers, *Scientific Report*, **15**, 19541 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01954-1>
- 4 S.R. Nemati, M.A.Javidi, and J.Biazar, A numerical method for space–time fractional Schrödinger equations using fractional-order Chelyshkov polynomials, *Results in Applied Mathematic*, **25**, 100493 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rinam.2024.100493>
- 5 D.Kumar and J.Singh, Editorial: Fractional calculus and its applications in physics, *Frontiers in Physics*, **7**, 164 (2019). <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00164>
- 6 N.Laskin, Fractional Schrödinger equation, *Physical Review E* **66**, 056108 (2002). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.056108>
- 7 Q.Khan, A.Ali, M.Naeem, and I.Khan, Application of an efficient analytical technique based on Aboodh transform, *Engineering Analysis with Boundary Element*, **160**, 104–115 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.11.019>
- 8 Hui Tao, Xiaofeng Zhao, and Wenxiu Zhang, The Aboodh transformation-based homotopy perturbation method, *Frontiers in Physics* **11**, 1246738 (2023). <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1246738>
- 9 Mst. Sultana, Md. Azizul Haque, Md. Shariful Islam, and Md. Ashraful Alam, Aboodh–Tamimi–Ansari transform method ((AT)²) for systems of fractional partial differential equations, *AIMS Mathematics* **9**(10), 28987–29007 (2024). <https://doi.org/10.3934/math.20241401>
- 10 H.P. Jani and T. Singh, Solution of fractional order Schrödinger equation by using Aboodh transform homotopy perturbation method, *Journal of Fractional Calculus and Applications* **16**(1), 1–13 (2025).
- 11 M.Caputo and M.Fabrizio, A new definition of fractional derivative without singular kernel, *Progress in Fractional Differentiation and Applications* **1**(2), 73–85 (2015). <https://doi.org/10.12785/pfda/010201>
- 12 A. Atangana and D.Baleanu, Atangana–Baleanu derivative with fractional order applied to groundwater model, *Journal of Nonlinear Sciences and Applications* **9**, 343–357 (2016). <https://doi.org/10.22436/jnsa.009.01.30>
- 13 M.I. Syam and A. Hadid, Fractional differential equations with Atangana–Baleanu operator, *Results in Nonlinear Analysis* **2**(2), 59–67 (2019). <https://doi.org/10.53006/rna.572028>
- 14 R. Almeida, A Caputo fractional derivative of a function with respect to another function, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **44**, 460–481 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2016.09.006>
- 15 M.C. De Bonis and D. Occorsio, A global method for approximating Caputo fractional derivatives, *Axioms* **13**(11), 750 (2024). <https://doi.org/10.3390/axioms13110750>
- 16 S. Masood, S. Islam, and A. Ara, A new modified technique of Adomian decomposition method, *Mathematical Problems in Engineering* **2022**, 6845632 (2022). <https://doi.org/10.1155/2022/6845632>
- 17 X. Dong and Z. Yang, Fractional Schrödinger equation with lower-order fractional nonlinearity: existence results, *Discrete and Continuous Dynamical Systems – Series S* **17**, 1389–1404 (2024). <https://doi.org/10.3934/dcdss.2023161>
- 18 M.I. Liaqat, S. Islam, T. Gul, and D. Baleanu, Conformable natural transform combined with homotopy perturbation method for fractional models, *Chaos, Solitons & Fractals* **157**, 111893 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111893>
- 19 N. Parvin and M. Ferdosi, Optical soliton solutions of the time-fractional nonlinear Schrödinger equation, *Results in Physics* **56**, 107295 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107295>
- 20 V.T. Monyayi, O.A. Taiwo, A.O. Adewumi, and D.Baleanu, Mittag–Leffler law in ABC-Caputo fractional models via Sumudu/HPM, *Scientific Reports* **15**, 18214 (2025).
- 21 M.Hafez, F.Alshowaikh, B. Wan Niu Voon, S. Alkhazaleh and H.Al-Faiz, Review on recent advances in fractional differentiation, *Progress in Fractional Differentiation and Applications* **11**, 1–28 (2025).
- 22 M. Alaroud, et al., Comparative analysis using Laplace transform for fractional NPDEs, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2025 (2025).
- 23 N. Iqbal, S. Islam, M. Idrees, and D. Baleanu, Aboodh residual power series and iteration methods for fractional dynamics, *Scientific Reports* **14**, 26834 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-26834-6>
- 24 N.A. Khan, M. Jamil, A. Ara, Approximate solutions to time-fractional Schrödinger equation via homotopy analysis method, *Inter.Scholarly Research Notices* **1**(1), 19–27 (2012). <https://doi.org/10.5402/2012/197068>
- 25 S. Liu, Y. Zhang, B.A. Malomed, and E. Karimi, Experimental realisations of the fractional Schrödinger equation (preprint), arXiv:2208.01128 (2022).
- 26 H.P. Jani and T. Singh, ATHPM for FSE, *Journal of Fractional Calculus and Applications* **16**(1), 2025.
- 27 K. Diethelm, *The Analysis of Fractional Differential Equations: An Application-Oriented Exposition Using Differential Operators of Caputo Type*, Springer, Berlin (2010).

- 28 I. Podlubny, Fractional Differential Equations, Academic Press, San Diego (1999).
29 A. A. Kilbas, H. M. Srivastava, and J. J. Trujillo, Theory and Applications of Fractional Differential Equations, Elsevier, Amsterdam (2006).
30 K. Diethelm, The Analysis of Fractional Differential Equations: An Application-Oriented Exposition Using Differential Operators of Caputo Type, Springer, Berlin (2010).
31 I. Podlubny, Fractional Differential Equations, Academic Press, San Diego (1999).
32 A. A. Kilbas, H. M. Srivastava, and J.J. Trujillo, Theory and Applications of Fractional Differential Equations, Elsevier, Amsterdam (2006).
33 M.S. Tayfor, Physical properties of nano materials to act as nano capacitors using Schrödinger equation and treating electrons as strings, Journal of Energy Storage **81**, 110531 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110531>

Мақала тарихы:

Түсті – 19.10.2025

Қабылданды – 15.12.2025

Article history:

Received 19 October 2025

Accepted 15 December 2025

Авторлар туралы мәлімет:

Монтасир Салман Тайфор - Әл-Баха университеті, физика кафедрасы, Әл-Баха, Сауд Арабиясы. e-mail: mtaifour@bu.edu.sa

Information about authors:

Montasir Salman Tayfor - Al-Baha University, Physics Department, Faculty of Science, Al-Baha, Saudi Arabia. e-mail: mtaifour@bu.edu.sa

**Конденсирленген күй физикасы және материалтану
проблемалары. Наноғылым**

**Condensed Matter Physics and Materials Science Problems.
Nanoscience**

**Физика конденсированного состояния и проблемы
материаловедения. Нанонаука**

FTAMP 29.31.21; 29.31.23; 44.41.00

<https://doi.org/10.26577/RCPH2025953>

Қ. Диханбаев¹ , А. Рақымбекова² , М. Әмзе² , А. Ерсін² ,
С. Батай³ , Е. Шабдан^{2,3*} 

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Астана Ұлттық лабораториясы, Назарбаев университеті, Астана, Қазақстан

³Астана IT университеті, Астана, Қазақстан

*e-mail: yerkin.shabdan@nu.edu.kz

ИНТЕРФЕЙСІНДЕ ЛАНТАНОЙД ЖОҒАРЫ-ТҮРЛЕНДІРУ НАНОБӨЛШЕКТЕРІ ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН МЕТАЛЛ-ТОТЫҚ/КРЕМНИЙ ФОТОКАТОДТЫ КЕШЕНДІ ДАЙЫНДАУ ЖОЛЫ

Бұл ұсынылған жұмыста металл - ототық / кремний гетероқұрылымы негізіндегі интеграцияланған фотокатодтың дайындалу жолы ұсынылды. SnO_2 жұқа қабаты p-n⁺ - Si төсенішінің алдыңғы бетіне магнетронды шашырату әдісімен тұндырылып, УК аймақ фотондарын сіңіру мен қоса коррозиядан қорғау қамтамасыз етілді. Артқы интерфейске $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+} @ \text{PbS}$ лантанойдты жоғары-түрлендіру нанобөлшектері (Ln-UCNPs) спин-айналдыру әдісімен кіріктіріліп, жақын инфрақызыл диапазон аймақ (NIR, 1550 нм) фотондарын көрінетін жарыққа түрлендіру арқылы кең спектрлі жұту қамтылды. Сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) талдауы SnO_2 қабатының түйіршікті морфологиясын (қалыңдығы ~ 140 нм) және p-n⁺ өткелінің тереңдігін (~ 0,6 мкм) растады. Вольт-амперлік сипаттамалар (I-V) өлшеулері тунельдік заряд тасымалын және Шоттки барьерін көрсетті. Спектралдық талдау фотосезімталдықтың 400 – 1100 нм диапазонда, әсіресе 870 – 900 нм шыңында өскенін анықтады. Сондай-ақ, фото электрхимикалық сынақтары Ln - UCNPs интеграциясы фототок тығыздығын ~ 5 есе арттырып, суды бөлу тиімділігін жақсартқанын дәлелдеді. Сонымен, бұл кешенді құрылым Si негізді фотоэлектродтардың тұрақтылығы мен спектрлік тиімділігін арттыруда перспективті шешім болып табылады.

Түйін сөздер: металл тотығы/кремний гетероқұрылымдары, лантанойд жоғары-түрлендіруі (ап-конверсиясы), фотоэлектрхимиялық суды бөлу, сутегі энергиясы, нанобөлшектер.

K. Dikhanbayev¹, A. Rahimbekova², M. Amze², A. Yersin²,
S. Batay³, E. Shabdan^{2,3*}

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Astana National Laboratory, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

³Astana IT University, Astana, Kazakhstan

*e-mail: yerkin.shabdan@nu.edu.kz

Method for preparing a complex metal-oxide/silicon photocathode integrated with lanthanide upconversion nanoparticles at the interface

This study presents the fabrication of an integrated silicon photocathode based on a metal - oxide/silicon heterostructure. A SnO_2 thin film was deposited on the front surface of a p-n⁺-Si substrate via magnetron sputtering to enable UV photon absorption and corrosion protection. Lanthanide up-conversion nanoparticles (Ln-UCNPs, $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+} @ \text{PbS}$) were integrated at the rear interface using spin-coating to convert near-infrared (NIR, 1550 nm) photons into visible light, achieving broad-spectrum absorption. SEM analysis confirmed the granular morphology of the SnO_2 layer (~140 nm thick) and the p-n⁺ junction depth (~0.6 μm). Current-voltage (I-V) measurements revealed enhanced tunneling charge transport and a Schottky barrier. Spectral response analysis demonstrated improved photosensitivity across

400 – 1100 nm, peaking at 870 – 900 nm. Photoelectrochemical (PEC) tests showed that Ln-UCNPs integration increased photocurrent density by ~5 times, significantly enhancing water splitting efficiency. This integrated structure offers a promising approach to improving the stability and spectral efficiency of Si-based photoelectrodes.

Keywords: metal oxide/silicon heterostructures, lanthanide up-conversion, photoelectrochemical water splitting, hydrogen energy, nanoparticles.

К. Диханбаев¹, А. Рақымбекова², М. Амзе², А. Ерсин², С. Батай³,
С. Токтарбай¹, Е. Шабдан^{2,3*}

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Национальная лаборатория Астаны, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан

³Астана IT Университет, Астана, Казахстан

*e-mail: yerkin.shabdan@nu.edu.kz

Способ приготовления комплексного металлооксид/кремниевое фотокатода, интегрированного с лантаноидными наночастицами апконверсии на интерфейсе

Данное исследование представляет изготовление интегрированного кремниевого фотокатода на основе гетероструктуры металл – оксид / кремний. Тонкая плёнка SnO₂ была нанесена на переднюю поверхность подложки p-n⁺-Si методом магнетронного распыления для обеспечения поглощения УФ-фотонов и защиты от коррозии. Лантаноидные наночастицы ап-конверсии (Ln - UCNPs, NaYF₄: Er³⁺@PbS) были интегрированы на задний интерфейс с использованием метода спин-коатинга для преобразования фотонов ближнего инфракрасного диапазона (NIR, 1550 нм) в видимый свет, что позволило достичь широкополосного поглощения. Анализ с помощью СЭМ подтвердил гранулярную морфологию слоя SnO₂ (толщиной ~ 140 нм) и глубину p-n⁺-перехода (~ 0,6 мкм). Измерения вольт-амперных характеристик (I-V) выявили усиленный туннельный перенос заряда и барьер Шоттки. Анализ спектральной чувствительности продемонстрировал улучшенную фоточувствительность в диапазоне 400 – 1100 нм с пиком на 870 – 900 нм. Фотоэлектрохимические тесты показали, что интеграция Ln-UCNPs увеличила плотность фототока примерно в ~ 5 раз, значительно повысив эффективность расщепления воды. Эта интегрированная структура предлагает перспективный подход к улучшению стабильности и спектральной эффективности кремниевых фотоэлектродов.

Ключевые слова: гетероструктуры оксид металла/кремния, ап-конверсия лантаноидов, фотоэлектрохимическое расщепление воды, водородная энергия, наночастицы.

Кіріспе

Күн энергиясын жасыл энергия ретінде фотоэлектрохимиялық (ФЭХ) суды бөлу арқылы сутегі энергиясына түрлендіруді зерттеу қазіргі күнде зерттеушілерді тартатын келелі және тартымды бағыттардың бірі [1,2]. ФЭХ суды бөлуде кремний(Si) фотоэлектродтарын қолдана отырып, суды күн энергиясымен бөлу әдісі қарқынды зерттеулерге ие перспективті әдісі ретінде қарастырылып келеді [3,4]. Si – кеңінен қолжетімді коммерциялық жартылай өткізгіш. Ол оңай құрылымдалады, басқарылатын электр өткізгіштігі бар және функционалды қабықшалар үшін төсеніш ретінде қолайлы. Сонымен қатар, Si шектелген энергия зонасы 1,1 эВ-қа ие және күн спектрімен салыстырмалы түрде жақсы сәйкес келетін жарық сіңіру қасиетіне ие [5]. Алайда, Si-

дің ертнді ортада химиялық тұрақтылығы төмен, себебі ол сулы ерітіндіде күн сәулесі немесе анодтық кернеу әсерінен тез тотығады [6]. Соңғы кезде оны металл тотық/Si гетероқұрылымды фотоэлектродта құру арқылы ФЭХ су бөлу өнімділігін жақсарту үшін зерттеу жиі қарастырылуда. Мысалы TiO₂/Si, Fe₂O₃/Si, WO₃/Si сияқты құрылымдар немесе ко-катализаторлар арқылы жарық сіңіру және фототок тығыздығы және сутегі электродының тиімділігін арттырады [7,8]. Z-схемасы бойынша заряд тасымалы металл тотық қабатындағы электрон-ұяшық рекомбинациясын азайтып, Si-дің коррозиядан қорғалуын және интерфейс тиімділігін арттырады [9-11].

Метел қалайы тотық (SnO_2) кең зоналы (3,4 эВ) жартылай өткізгішін метал тотықтарын қолданып зерттеу бір жақты немесе аз қарастырылған. Ол біріншеден бізге Si қабатын коррозиядан қорғауды мүмкіндік береді, сонымен қатар ультра күлгін(УК) аймақты жұтуға қабілетті. Егер біз SnO_2 -мен ультра күлгін(УК) аймақ, Si өзі көрінетін жарық аймақ, ал Si-дің 1100 нм-ден жоғары жақын инфрақызыл (ЖИК) аймағын жоғары-түрлендіру (ЖТ) нано-бөлшектерді арқылы жұтатын болсақ, онда біз жарық спектріндегі қажетті толық спектрді бір тұтас жұтуға қабілетті кешенді фотоэлектродды дайындаған болар едік. Міне біз осы зерттеуді орналастыру арқылы Si-ді электролиттерде төзімді, кең спетрірді фотонды тимді меңгерген, ФЭХ суды бөлуде шектемелері жоқ құрылғы жинадық. Оның тағы бір себебі зерттеулер жоғарда айтқанымыздай наноинженерлік жобалар арқылы бұл мәселені әр тарапты шешім етседе, бір кешенді құрылым ұйымдастырмағанын көрсетті. Сол мақсатта, біз беткі қабат $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si}$ гетероқұрылымдарын құра отырып, фотокоррозияны тежепеп, УК аймақ фотонды меңгеру, сонымен қоса Si-дің артқы интерфейсіне стратнгиялық түрде фотонды ЖТ нано-бөлшектреді интеграциялау арқылы ЖИК-ды қарпуды қамтыған бір кешенді жобаланған фотоэлектродты зерттеу.

Бұл жұмыстан, біз осы айтылған УК, ЖИК, көрінетін жарық аймақ Si-дің өзінде қамтылған бір тұтас селективті орналастыру жасап толыққанды құрылымды жүзеге асырдық. Нақтылап айтқанда, p-Si де p-n^+ -өткелді құра отырып, оның реакцияға түсетін электролитпен беттесу бетіне SnO_2 түзіп, ал артқы бетіндегі контакты интерфейсі арасында күкіртті қорғасын, PbS , кванттық нүктесі сенсблизациялайтын ЖТ лантанойд нанобөлшектерін ($\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}@\text{PbS}$, Ln-UCNPs) кіріктіре отырып, құрылымның заряд тасымалын жақсартуға, тотығуын азайтуға тырыстық. Құрылымды жинап қалыптастыруға диффузиялық буландыру, магнетронды шашырату жүйесімен тұндыру, әйнек құбырлы пеші (CVD) арқылы күйдіру, химиялық жеміру және спиндік-айналдыру арқылы қаптау әдістері қолданылды. Талдаулар зертханалық мүмкіндігімізше, сканирлеуші электрондық микроскоп (СЭМ) арқыл морфологиялық құрылымды, заряд ағындының бейнесі мен зоналық қалыптасуы қарапайым вольтамперлік сипаттамасымен (ВАС) тұжырымдалса, фотондардың қарқындылығы спектрлік талдау арқылы жасалды, және де суды ыдыратуға қабілеттілігі электрохимиялық потоциостат құрылымы арқылы ток

тығызды мен кернеулік талдауы жасалды. Нәтиже SiO_2 ферми деңгейінің бекітілуін болдырмай, тунельдік ағыс пайда болады деп тұжырымдалды [12-14]. Монохроматикалық жарықтандыру арқылы ашық тізбек кернеуі өлшеніп гетероқұрылымның ФЭХ тиімділігін көрсетті. Гетероқұрылым қалыптасу тиімділігі ВАС қисығы арқылы жақсы қалыптасқанын дәлелденді. Фотондардың тиімділігі мүмкіндігінше спектрлік талдау арқылы жақсы нәтиже бергенін көрсетті. ФЭХ суды бөлудің әлеуеті фотоэлектрхимиялық токтығызды мен кернеу салыстырмасынан анықталды. Осы зерттеу бізге қолда бар тәжірибханалық қарапайым құрылғылар арқылы біршама жақсы фотокатодты қалыптастырғанымызды дәлелдеді. Осы мақсатта біз SnO_2 жұқа қабықтардағы су бөлу кезіндегі ФЭХ қасиеттерге әсерін, морфологиялық, фототок тығыздығы, ВАС, фотондардың заряд динамикасына әсері сияқты өнімділікті анықтауға тырыстық. Осы арқылы таңдалған жұқа қабықша SnO_2 , интерфейсіке орналасқан Ln-UCNPs наноұнтақ және Si-фотоэлектродтардың өзара арасындағы жүйелі орналастур фотоэлектродтарды жобалау бағалауларын анықтауға бағыт береді деп тұжырымдаймыз.

Тәжірибе бөлімі

p-n^+ - Si өткелді дайындау

$\text{p-типті Si-да p-n}^+$ өткелін дайындау жартылай өткізгіш технологияларының стандартты әдістері [15] арқылы қарапайым тәжірибханалық жағдайда жүзеге асырылады, біздің дайындаған технологиялық әдістеріміз негізінде p-типті Si төсеніш деионизацияланған су, ацетонда ультрадыбыспен 30 минут, және изопропил спиртінде тазартып, содан кейін аргон газын пайдаланып кептіріп алған соң барып, фосфор диффузиясы (POCl_3 буы, 900°C , 5 мин) қолдан жасалған әйнек құбырлы пеште жүріді, сол арқылы оның бетінде p^+ аймағын құрып, p-n^+ -өткелді Si төсеніш қалыптасты. Осы p-n^+ -өткелді Si дайын төсенішті келесі қадамға қолдандық.

$\text{SnO}_2/\text{p-n}^+$ - Si дайындау

$\text{SnO}_2/\text{p-n}^+$ -өткелді Si дайындау үшін, SnO_2 нысаны қолданылды. Алдымен p-n^+ -Si төсеніш деионизацияланған су, ацетонда 30 минут бойы ультрадыбыспен, және изопропил спиртінде тазартып, аргон газын пайдаланып кептіруден кейін, ол магнетронды шашырату жүйесінде(Kurt J. Lesker) дайындалды. SnO_2 жұқа қабықшалары 40/10 нм(минутына стандартты текше сантиметр) Ar/O_2 қоспасында реактивті радио жиіліктік шашырату әдісімен тұндырылды, мұнда

O₂ үлгі орнында, ал Ar SnO₂ нысанасында енгізілді. Соңында қалыңдығы шамамен 100нм болатын метал тотықтар қалыптасты. Бұл тұндыру үшін шашырату процесінің параметрлері 1-кестедегідей. Соңында қалыптасқан SnO₂/p-n⁺-Si құрылым үлгілері минутына 5°C жылдамдықпен температураның біртіндеп жоғарылауымен аргон атмосферасында 450°C температурада 2 сағат бойы күйдірілді. Бұл процесс CVD көмегімен жүзеге асырылды.

1-кесте. SnO₂ тұндыру үшін шашырату процесінің параметрлері

нысан	SnO ₂
қайнары:	2RF
негізгі қысым:	4E-7 mT
қуат:	30
тұндыру қысым:	5 mT
шашырату уақыты:	6 мин
бұрысш:	110
айналуы:	20

SnO₂/p-n⁺-Si/Ln-UCNPs/Al дайындау

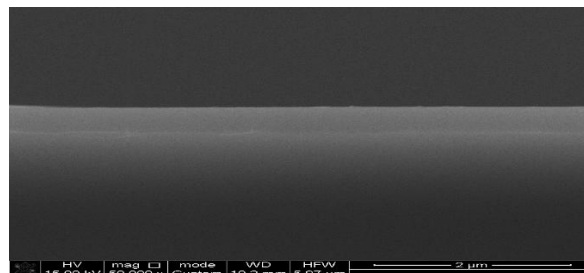
Келесі кадам, дайын 1x0,6 кв.см ауданды құрайтын SnO₂/p-n⁺-Si төсенішінің артқы контакті жақ бетінде, ішке қарай тереңдігі шамамен 20мкм, 0,4x0,4 кв.см ойық жеміру әдісі арқылы дайындалды, оған бір бөлік су (H₂O), 1 бөлік 27% аммоний гидроксиді (NH₄OH), 1 бөлік 30% сутегі асқын тотығы (H₂O₂), сондай-ақ 39%HF ертінілері негізінеде жасалады. Қалған жемірілген ойықтан тыс басқа жиек бөлігі албюмини-инди контактісімен жабылды. Контактты жасалмас бұрын ойыққа спин-айналдыру жабыны әдісі арқылы дайын синтездеген наноұнтақ (Ln-UCNPs) орналастырылды [16]. Соңында оның беті алюминий-инди контактісімен қажетті қыздыру негізінде толық жабылды. Сонымен қатар, оның бетіне тізбекті қалыптастыруға инди арқылы мыс сым бекітілді. Сосын алдыңғы SnO₂ жұқа қабат бетінен сумен жанасуға 0,4x0,4 кв.см аудан ашық қалдырылып (артқы ойыққа түспа түс келеді), қалған барлық бөлігі қатаң түрде каптон таспамен жабынды. Гетероқұрылымды күрделі интеграцияланған фотоэлектродымыз осылайша дайын болды.

Нәтижелер және талқылау

Гетеро бірккен құрылымдарды талдау

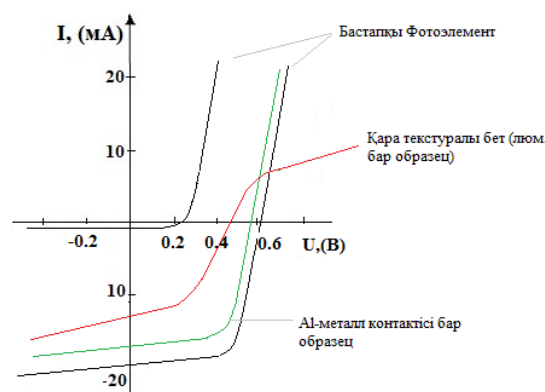
Алдымен дайындалған SnO₂/p-n⁺-Si/Ln-UCNPs/Al құрылғыны әдістеме реттері бойынша әрбір құрылымның СЭМ морфологияларын,

ашық ауадағы ВАС және p-n өткелінің спектралдық сипаттамала талдаудың рет-ретімен баяндайық. p-n⁺-Si үлгілердің көлденең қимасының СЭМ бейнесі 1-суретте көрсетілген. Үстіңгі қабаты n-типті қабықша, қалыңдығы шамамен 0,6 мкм. Төменгі жағы p-типті базалық қабат. Бұл мән бастапқы қалыптасқан p-n-ның тереңдігін растайды.



1-сурет. p-n-қалыптасуының көлденең қимасының СЭМ түсірілімі

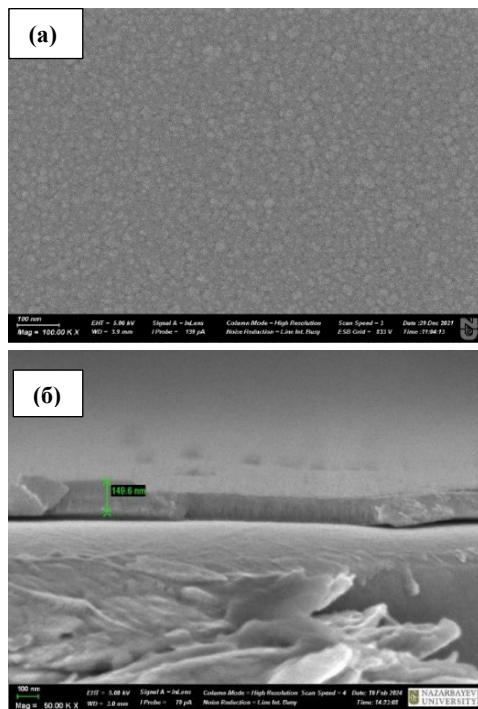
Біз қарапайым әдіс ВАС тексеру жасау арқылы p-Si де p-n⁺ қалыптасқанын тексердік. 2-суреттегі уәкілдік қара сызықтармен оның ВАС тармақтарының өзгерілуі зерттеулері берілді, яғни, бастапқы фотоэлемент сызықтары қараңғы және жарық түсірілген жағдайдағы сипаттамасы мен толтыру факторы күн элементінің өлшемдеріне дәл түседі. Нәтиже бізге оның p-n⁺-ның қалыптасуы ойлағандай болғанын білдіреді.



2-сурет. p-n⁺-Si, SnO₂/ p-n⁺-Si және SnO₂/p-n⁺-Si/Ln-UCNPs/Al құрылымдарының ВАС бойынша өзгерісі

Сосын тәжірибе реті бойынша, p-n⁺-Si үстіндегі SnO₂ жапқышын қарайық. Ол SnO₂/p-n⁺-Si қабатының аргонда 450°C температурада 1 сағат жасытудан кейінгі үлгінің тік және көлденең қимасының СЭМ арқылы жалпы бейнесі 3-суреттегідей морфологияны берді. Нақтылап айтқанда, 3а-суретте SnO₂/p-n⁺-Si үстінен қарағандағы СЭМ бейнесі бізге бір текті тесіктері

бар түйіршік құрылымды біреді, Олардың бетінің кедір-бұдырлары, шамамен 5,2 нм құрады, олар атомдық күш микроскопия арқылы анықталды. Демек, $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si}$ құрылымның меншікті бетінің ауданы жоғарырақ, зерттеулер бойынша бұл ФЭХ белсенділігіне тиімді болады деген сөз. Ал қырынан көлденең қима түсірілімі (3б-сурет), арасындағы тесіктері бар айқын бөлініп тұрған құрылымды морфологияны көрсетеді. Көлденең



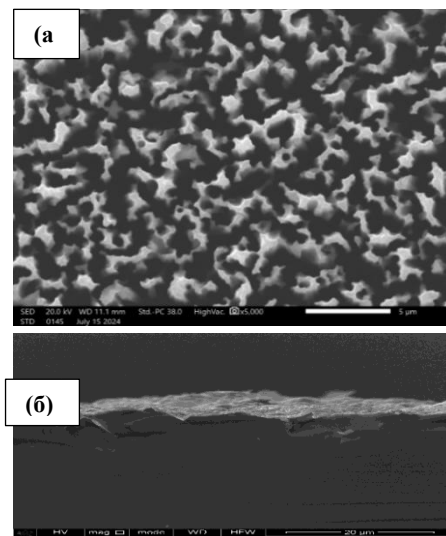
қима кескіндерінен жұқақабықшаның жақсы жабысқанын көруге болады. SnO_2 қабаттарының қалыңдығы шамамен 140 нм. Бұл бізге SnO_2 жұқақабықшасы $\text{p-n}^+\text{-Si}$ бетінде қапталған және осылайша түйіршіктер морфологиясын беріп тұрғанын айқындайды.

3-сурет. $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si}$ бетінің (а) және көлденең қималарының (б) морфологиясы

Ал ВАС сипаттамасынан беттік маңыздысы SnO_2 жұқақабықшасының орналасуы заряд тасымалдаушылардың ағыны тунельдік эффектсі бойынша жоғарлайды, сондықтан ВАС эффективтілігін өсіретінін жасыл сызықта орныққанын білдіреді. Осыған қарамастан p-n ауысуы идеялық фотоэлектрлік сипаттамасын көрсетті, мұнда зиянды кері тогының азайғанан байқатты, сонымен қатар толықтырғыш коэффициентінің жоғарлағанын көрсетті. SnO_2 барьер Шоткалы арқылы жүреді деп тұжырымдаймыз.

$\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si}$ құрылғыларының кері беті, яғни артқы контакты бетін біз ойған едік, яғни p-Si қабаты жағын. Оның жеміруден кейінгі бетінен

қарағадағы СЭМ морфологиясы 4а-суреттегідей. Ал ол жерге $\text{Ln-UCNPs} (\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}@\text{PbS})$ наноұнтақты салғаннан кейінгі морфологиясының қалыптасуын анық көре алмадық. Өйткені қолда бар СЭМ-нің ұрықсат ету қаблеттігі төмен болғандықтан, оны көре алмаушылық шектемесі боуы, себебі квантты нүкте мен наноұнтақтарды өлшемі айтарлықтай кіншкентай, шамамен 6-25 нм шамасында болды. Бұны біз алдыңғы зерттеулерімізде атомдық күш және трансимициялық тунельдеуші микроскоптармен зерттеген едік [16]. Келесі де біз төменгі тылды қабатының микробейнесін түсірідік. яғни біртұтас жиектелген алюминий-индий контактісінің СЭМ бейнесі 4б-суреттегідей бейнені көрсетілді. Мұнда төменгі біртұтас алюминий-индий контактісінің қабықшасы байқадық және де қыр бетінің сынық сколды жарық бетін көрсетті.

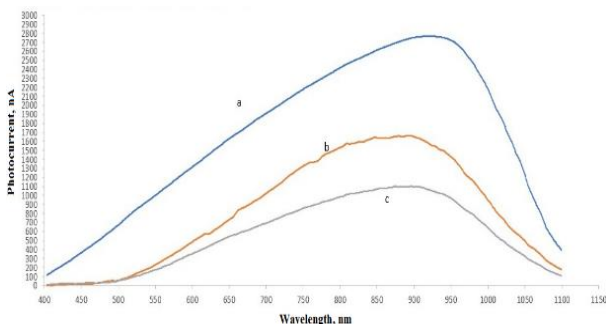


4-сурет. $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si}$ құрылымның асты p-Si жақ ойықтың беттік суреті (а) және төменгі біртұтас алюминий-индий контактісінің бейнесі (б)

Олардың ВАС 2-суреттегі қызыл тармақталған сызықтармен көрсетілген. ВАС нәтижелері айтарлықтай өзгеріс барын көрсетті. қызыл сызық - алғашқы контактының жиектей жабылып, наноұнтақтар кіріктірілген, бірақ беті толықтай жабылмаған кездегі тұйықталған тогының өсуі бұзылғанан байқадық, оның тармақтары сәйкес азайды. Өйткені нанобөлшек беті толық контактымен жабылмағандығы үдерісінде кемігенін көрсетеді. Осыған қарамастан қалыптастырылған наноқұрылымының фотосезгіштігі күн элементінің азда болса тиімділігін көрсетеді. Әрі бұл котнақтының беттік ішке кері шағылысуының өсуінің нәтижесінде

болғанын дәлелдейді. Ал алюминий-индий метал контактсы жиектей наноұнтақтармен қоса толық жабылуы біршама орнына келген, деседі бастапқы p-n⁺-Si күйіндегі қара сызықтармен берілгендей сипаттама бере алмады, бұны біз артқы p-Si де қалыптасқан дефектілердің себебі деп түсінеміз. Алайда ол жердегі нанобөлшектердің жасырлуы, бізге ЖИК аумақтағы 1550 нм-дегі толқын аймағы энергиясын ЖТ арқылы Si көрінетін аймағына фотондардың тасымалдауы арқылы тиімділікті арттыру үшін қолданылған еді. Келесі қадамда контакт жабылғаннан кейін біршама жақсы болғанын жасыл сызық арқылы бейнелейді.

SnO₂ бетінің жанында пайда болған электрондық заряд тасымалдаушылары электр өрісімен тартылып, алдыңғы беттегі инверсиялық қабатқа қарай таралады да ток қозғалысын арттырады. Ал, кең зоналы SnO₂ барлық түскен фотондарын жұтылдырады. Ең маңызды сипаттамаларының бірі оның спектралдық сипаттамасы, яғни толқын ұзындығы мен фотосезімталдығының арасындағы немесе толқын ұзындығы мен заряд тасымалдаушылардың жиналу коэффициентінің арасындағы тәуелділік болып табылады. Бұл тәуелділік монохроматор МДР-23 қондырғысында нүктелі өлшеу бойынша орындалды. 5-суретте алғашқы p-n өткелі бар түпнұсқалы үлгінің спектралдық сипаттамасы көрсетілген, бұл толқын ұзындығының 400-1100 нм диапазон аралығында өлшенді. Олардың спектралдық сезімталдығы 500 нм қысқа толқынды аймағынан басталғанын байқадық, яғни қысқа толқынды фотондардың нашар жұтылатынын көрсетті, одан әрі спектр тармағы бірқалыпты 900 нм-ге дейін өсіп, одан әрі ұзын толқынның облысының 1100 нм дейін күрт кеміді оның максималды фотосезімталдығы 870-900 нм спектр шыңында қалыптасқан. 5a-суретте SnO₂/p-n⁺-Si/Ln-UCNPs/Al біріккен кездегі, 5b-суретте SnO₂/p-n⁺-Si кездегі, ал 5c-суретте p-n⁺-Si элементтің өзі болған кездегі жағдай – бұл бізге бір қарап спектрлік тиімділіктің қанша өскенін береді.



5-сурет. Құрылымдарының спектрлік сипаттамалары, мұндағы а) SnO₂/p-n⁺-Si/Ln-UCNPs/Al, б) SnO₂/p-n⁺-Si, в) p-n⁺-Si

Максималды фотосезімшілтігі фототоктың 2700 бірлігіне дейін өскенін көрсетті. Сонымен қатар, қысқа және жақын инфрақызыл толқын ұзындығында біршама көтерілгенін көрсетті, яғни фототоктың жиналу қаблеттілігінің өсуі SnO₂/p-n⁺-Si құрылғыларының жағары эффективтілігін көрсетеді. Бұл нәтиже вольтамперлік сипаттамасын өлшеу барысында кері токтың көтерілгендігін көсеткен болатын. Осы тұжырымды спектралдық сипаттамасымен дәлелденгенін көсеттік.

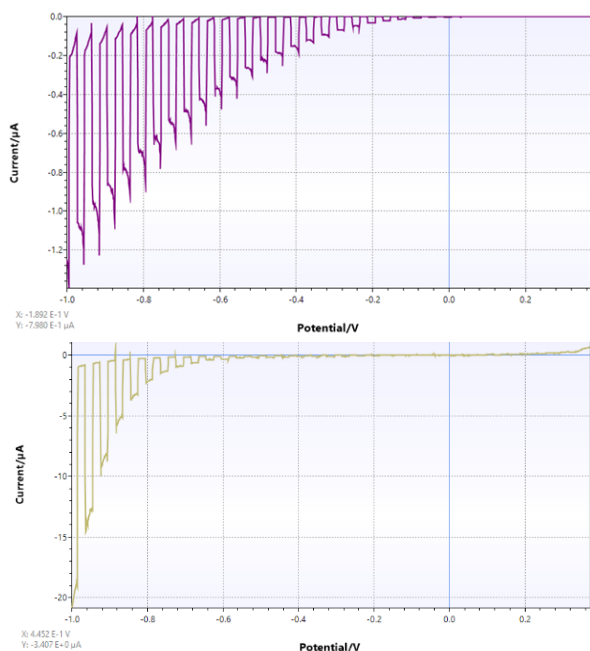
Фотоэлектрохимиялық өлшеулер

ФЭХ сынақтар су бөлу тиімділігі әсерін бағалау үшін жүргізілді. Бұл электролитпен жанасатын және су бөлу немесе коррозия реакцияларына қатыса алатын беттік қорғалу мен фотонның тиімді қарпылуын түсіндіреді деп тұжырымдаймыз. Бұдан басқа, бұл жерде SnO₂ қабаты табиғатына байланысты фотокатод бетін қорғайды. Тәжірибе бөлме температурасында ФЭХ өнімділігі кварц терезесі бар үш электродты ФЭХ ұяшығы арқылы бағаланды. Күн сәулесінің жарықтандыруын модельдеу үлгінің орналасқан жерінде калибрленген жарық қарқындылығы 100 мВт см⁻² болатын 100 Вт ксенон шамын пайдаланатын АМ 1,5 класс А күн симуляторы (TLS130В реттелетін жарық көзі) арқылы қол жеткізілді. Жарық көзі де калибрленген анықтамалық ұяшық пен өлшегіш арқылы калибрлеуден өтті. Кесілген модельденген күн сәулесінің экспозициясы 0,5 Гц жиілікте жұмыс істейтін сырттан басқарылатын ысырма арқылы жүргізілді. Монохроматикалық жарық экспозициясына басқарылатын барлық толқын ұзындығында жұмыс істейтін жарық көзін қолдану арқылы қол жеткізілді. Қарсы электрод Pt сымы болды, ал Ag/AgCl/ қаныққан KCl электроды анықтамалық электрод ретінде қызмет етті. pH шамамен 0,3 болатын 0,5 молярлық H₂SO₄-тен тұратын электролит ерітіндісі пайдаланылды. Осы зерттеудегі ФЭХ нәтижелерінде ұсынылған барлық потенциалдар сәйкес қатынасты пайдаланып қайтымды сутегі бөліну электродына(ҚСЭ) қатысты жасайды.

$$\Phi_{\text{КСЭ}} = \Phi_{\text{Ag/AgCl}} + \Phi^{\circ} \text{Ag/AgCl} \\ \text{қарсы ҚСЭ} + 0,059 \cdot \text{pH}$$

$\Phi^{\circ} \text{Ag/AgCl}$ 25 °C кезінде ҚСЭ-мен салыстырғанда 0,197 В болып өлшенді. Вольтамметрия эксперименттері 10 мВ с⁻¹ сканерлеу жылдамдығын пайдаланып, ҚСЭ-ге қарсы 0,4-1,6 В потенциал диапазонында

жүргізілді [6]. Зерттеуде ФЭХ суды бөлу үшін Si негізіндегі фотоэлектродтардың тұрақтылығын арттыруға арналған стратегиясын көрсетті. Вольтамперометрия сынағының нәтижелері $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si/Ln-UCNPs/Al}$ мен $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si/Al}$ үлгілерінің монохроматикалық жарық-сүтегі бөліну реакциясы қатысты кезінде фотоактивті екенін көрсетеді (6-сурет). $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si/Ln-UCNPs/Al}$ үлгісі $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si/Al}$ үлгісімен салыстырғанда айтарлықтай жоғары фототок көрсетеді. Бұл жұмыстар бізге Ln-UCNPs арқылы ЖИҚ-дан көрінетін жарыққа түрлендіргіш нанобөлшектер мен Si гетероқұрылымды фотоэлектродты біріктіріп күн-энергиясын тиімді түрлендірген фотоэлектрод құрылғыны оңтайландырып жобасын жасаудағы тамаша іргелі механизмдерді түсіндіреді.



6-сурет. Реттелетін имитацияланған күн сәулесінің жарықтандыруы кезіндегі $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si/Ln-UCNPs/Al}$ (төменде) мен $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si/Al}$

(жоғарыда) гетероструктурасы фототок тығыздығы пайда болуы

Фототоктардың токтың азаюы жарықпен пайда болған тасымалдаушылардың рекомбинацияланатынын білдіреді, бұл барлық тасымалдаушылардың төменгі қолданылатын потенциалдарда артқы контактіге толығымен тасымалданбағанын көрсетеді. Екі жағдайдағы фототок тығыздығы өлшенеді. Ln-UCNPs бар жағдайда фототок тығыздығы қараңғы токпен тығыз сәйкес келеді, бұл Si фотогенерацияланған заряд тасымалдаушылар суды бөлу процесіне тікелей қатыспайды деп болжайды. бұл тек $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si/Al}$ кезінде байқалатын тығыздықтан шамамен бес есе көп.

Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде $\text{SnO}_2/\text{p-n}^+\text{-Si/Ln-UCNPs/Al}$ интеграцияланған фотокатодтың дайындалуы және оның фотоэлектрхимиялық қасиеттері толық сипатталды. SnO_2 қабаты УК фотондарын сіңіріп, Si-ді коррозиядан қорғаса, Ln-UCNPs ЖИҚ фотондарын көрінетін аймаққа түрлендіріп, спектрлік қамтуды кеңейтті. Морфологиялық (СЭМ), электрлік (ВАС) және спектралдық талдаулар құрылымның біртекті қалыптасқанын, заряд тасымалын жақсартқанын растады. ФЭХ өлшеулері фототок тығыздығының айтарлықтай өсуін (~5 есе) және суды бөлу көрсетілді. Осылайша, ұсынылған кешенді фотоэлектрод күн энергиясын суды бөліп газ шығару тиімді түрлендіруде қолжетімді, тұрақты және кең спектрлі шешім ұсынады. Болашақ зерттеулер нанобөлшектердің концентрациясын оңтайландыруға және ұзақ мерзімді тұрақтылықты бағалауға бағытталуы тиіс.

Алғыс

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі қаржыландырған (Грант № AP19679202).

Әдебиеттер References

- 1 M.G. Walter, E.L. Warren, J.R. McKone, S.W. Boettcher, Q. Mi, E. A. Santori, and N. S. Lewis, Solar Water Splitting Cells, *Chem. Rev.* **110**(11), 6446–6473 (2010). <https://doi.org/10.1021/cr1002326>.
- 2 A. Kudo and Y. Miseki, Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting, *Chem. Soc. Rev.* **38**(1), 253–278 (2009). <https://doi.org/10.1039/B800489G>.
- 3 R. Fan, Z. Mi, M. Shen, Silicon based photoelectrodes for photoelectrochemical water splitting. *Optics Express.* **27**, 4, A51-A80 (2019). <https://doi.org/10.1364/OE.27.000A51>.
- 4 S. Peng, D. Liu, Z. Ying, K. An, C. Liu, J. Feng, H. Bai, K. Ho Lo, H. Pan, Industrial-Si-based photoanode for highly efficient and stable water splitting. *Journal of Colloid and Interface Science.* **671**, 434-440 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.05.185>.

- 5 S.Y. Noh, K. Sun, C. Choi, M. Niu, M. Yang, K. Xu, S. Jin, D. Wang, Branched TiO₂/Si nanostructures for enhanced photoelectrochemical water splitting. *Nano Energy* **2**, 351 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.10.010>.
- 6 Y. Yu, Z. Zhang, et al., Enhanced photoelectrochemical efficiency and stability using a conformal TiO₂ film on a black silicon photoanode. *Nat Energy* **2**, 17045 (2017). <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.45>.
- 7 R. van de Krol, Y. Liang, An n-Si/n-Fe₂O₃ Heterojunction Tandem Photoanode for Solar Water Splitting. *CHIMIA Int. J. Chem.* **67**, 168 (2013). <https://doi.org/10.2533/chimia.2013.168>.
- 8 Y. Shabdan, A. Markhabayeva, N. Bakranov, N. Nuraje, Photoactive Tungsten-Oxide Nanomaterials for Water-Splitting. *Nanomaterials* **10**(9), 1871 (2020). <https://doi.org/10.3390/nano10091871>.
- 9 Z. Hajiahmadi, Y.T. Azar, Computational study of h-WO₃ surfaces as a semiconductor in water-splitting application. *Surfaces and Interfaces* **28**, 101695 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surf.2021.101695>.
- 10 Y. Zhao, G. Brocks, H. Genuit, R. Lavrijsen, M.A. Verheijen, and A. Bieberle-Hütter, Boosting the Performance of WO₃/n-Si Heterostructures for Photoelectrochemical Water Splitting: from the Role of Si to Interface Engineering. *Adv. Energy Mater.* **9**, 1900940 (2019). <https://doi.org/10.1002/aenm.201900940>.
- 11 Y. Zhao, S. Balasubramanyam, R. Sinha, R. Lavrijsen, M. A. Verheijen, A. A. Bol, A. Bieberle-Hütter, Physical and Chemical Defects in WO₃ Thin Films and Their Impact on Photoelectrochemical Water Splitting. *ACS Appl. Energy Mater.* **1**, 5887 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.aem.8b00849>.
- 12 H.K. Hassun, B.H. Hussein, E.M.T. Salman, A.H. Shaban, Photoelectric properties of SnO₂: Ag/P-Si heterojunction photodetector. *Energy Reports* **6**, 46–54 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.017>.
- 13 J. Day, S. Senthilarasu, T.K. Mallick, Improving spectral modification for applications in solar cells: A review. *Renewable Energy* **132**, 186e205 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.101>.
- 14 Y. Shabdan, Chang-Keun Lim, A. Beisenbayev, A. Yersin, N. Nuraje, PbS Quantum Dots and Er³⁺ in Core-Shell Nanocrystals for NIR-to-Visible Upconversion, 4th International Symposium on Emerging Materials and Devices. NLA, Nazarbayev University. Astana, Kazakhstan. May 28-30, (2025).
- 15 X. Ru, M. Yang, S. Yin, Y. Wang, C. Hong, F. Peng, Y. Yuan, C. Sun, C. Xue, M. Qu, J. Wang, J. Lu, L. Fang, H. Deng, T. Xie, S. (Frank) Liu, Z. Li, X. Xu, Silicon heterojunction solar cells achieving 26.6% efficiency on commercial-size p-type silicon wafer. *Joule* **8**, 1092–1104 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.01.015>.
- 16 A. Beisenbayev, M. Guli, S. Neuvonen and E. Shabdan, Synthesis of PbS Quantum Dot-Sensitized Er³⁺-Activated Core-Shell Nanocrystals for Enhanced Photon Upconversion. *ACS Omega*, (2025) (submitted).

Мақала тарихы:

Түсті – 28.10.2025

Қабылданды – 15.12.2025

Article history:

Received 28 October 2025

Accepted 15 December 2025

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Қадыржан Диханбаев** – доцент, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Физика-техникалық факультеті электроника және астрофизика кафедрасы, Алматы, Қазақстан, e-mail: dksolar2017@gmail.com

2. **Асель Рақымбекова** – магистр, Назарбаев университеті Астана Ұлттық лабораториясының ғылыми қызметкері. Астана, Қазақстан, e-mail: assel.rakymbekova@nu.edu.kz

3. **Мағжан Әмзе** – магистр, Назарбаев университеті, Астана Ұлттық лабораториясының ғылыми қызметкері. Астана, Қазақстан, e-mail: magzhan.amze@nu.edu.kz

4. **Адия Ерсін** – магистр, Назарбаев университеті Астана Ұлттық лабораториясының ғылыми қызметкері. Астана, Қазақстан, e-mail: adiya.yersin@nu.edu.kz

5. **Сағидолла Батай** – PhD, Астана IT университеті зияткерлік жүйелер және киберқауіпсіздік департаментінің аға оқытушысы. Астана, Қазақстан, e-mail: b.sagidolla@astanait.edu.kz

6. **Еркін Шабдан** (корреспондент автор) – PhD, Назарбаев университеті, Астана Ұлттық лабораториясының аға ғылыми қызметкері, Астана IT университеті зияткерлік жүйелер және киберқауіпсіздік департаментінің қауымдастырылған профессоры. Астана қ., e-mail: erkin.shabdan@nu.edu.kz

Information about authors:

1. **Kadyrzhan Dikhanbayev** – Associate Professor, Department of Electronics and Astrophysics, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University. Almaty, Kazakhstan, e-mail: dksolar2017@gmail.com

2. **Asel Rakymbekova** – Master, Researcher, Astana National Laboratory, Nazarbayev University. Astana, Kazakhstan, e-mail: assel.rakymbekova@nu.edu.kz

3. **Magzhan Amze** – Master, Researcher, Astana National Laboratory, Nazarbayev University. Astana, Kazakhstan, e-mail: magzhan.amze@nu.edu.kz

4. **Adiya Yersin** – Master, Researcher, Astana National Laboratory, Nazarbayev University. Astana, Kazakhstan, e-mail: adiya.yersin@nu.edu.kz

5. **Sagidolla Batay** – PhD, Senior Lecturer, Department of Intelligent Systems and Cybersecurity, Astana IT University. Astana, Kazakhstan, e-mail: b.sagidolla@astanait.edu.kz

6. **Yerkin Shabdan** (corresponding author) – PhD, Senior Researcher, Astana National Laboratory, Nazarbayev University, Associate Professor, Department of Intelligent Systems and Cybersecurity, Astana IT University. Astana, e-mail: erkin.shabdan@nu.edu.kz

IRSTI 29.19.31; 29.19.23

<https://doi.org/10.26577/RCPH2025954>Adem Akkuş 

Gaziosmanpaşa University, Tokat, Turkey

*e-mail: ademakkus76@yahoo.com

AN ANALYTICAL EVALUATION OF SEMICONDUCTOR RESISTANCE CHANGES IN WEAK MAGNETIC FIELDS

Variations in electrical resistance under the influence of magnetic fields play a crucial role in numerous technological applications, including hard disk drives and microcircuit sensors. In this study, the change in the electrical resistance of a semiconductor exposed to a weak magnetic field is examined within a generalized theoretical framework. The analysis is carried out by formulating the system using single-parameter Fermi–Dirac distribution functions. All calculations use the analytical expression of these functions proposed by the author. A comparison between the analytical results and those obtained through numerical methods demonstrates a high degree of agreement, confirming the reliability and accuracy of the proposed formulation. The analytically derived results are presented in tabular form to enhance clarity and facilitate direct comparison. This approach not only provides a simplified analytical treatment of magnetoresistance effects in semiconductors, but also enables the modeling of material behavior under variable external conditions. Therefore, the formulation developed in this work is expected to contribute to the theoretical design of semiconductor devices, particularly in applications requiring precise control of electronic transport properties under magnetic influence.

Keywords: magnetic field, semiconductors, resistivity, Fermi-Dirac distribution functions, chemical potential.

Адем Аққұс

Газиосманпаша университеті, Токат, Түркия

*e-mail: ademakkus76@yahoo.com

Жартылай өткізгіштердің кедергісінің әлсіз магнит өрістеріндегі өзгерістерін аналитикалық бағалау

Электрлік кедергінің магниттік өрістер әсерінен өзгеруі қатты дискілер мен микросхема сенсорлары сияқты көптеген технологиялық қолданбаларда маңызды рөл атқарады. Бұл ұсынылған зерттеуде әлсіз магниттік өріске ұшыраған шала өткізгіштің электрлік кедергісінің өзгерісі жалпыланған теориялық негізде қарастырылады. Талдау бір параметрлі Ферми–Дирак таралу функцияларын қолдану арқылы жүргізілді. Барлық есептеулерде автордың ұсынған функциялардың аналитикалық өрнегі пайдаланылды. Аналитикалық нәтижелер мен сандық әдістер арқылы алынған нәтижелерді салыстыру жоғары деңгейдегі сәйкестікті көрсетті, яғни, бұл ұсынылған тәсілдің сенімділігі мен дәлдігін дәлелдейді. Алынған аналитикалық нәтижелер анықтылықты арттыру және тікелей салыстыруды жеңілдету үшін кестелік түрде берілген. Бұл тәсіл жартылай өткізгіштердегі магниткедергі әсерлерін аналитикалық түрде қарастыруды жеңілдетіп қана қоймай, сонымен қатар сыртқы шарттар өзгергенде материалдың мінез-құлқын модельдеуге мүмкіндік береді. Сондықтан, осы жұмыста ұсынылған формулалар магнит өрісі әсеріндегі электрондық тасымалдау қасиеттерін дәл бақылауды қажет ететін қолданбалар үшін жартылай өткізгіш құрылғыларды теориялық жобалауға маңызды үлес қоса алады.

Түйін сөздер: магнит өрісі, жартылай өткізгіштер, электрлік кедергі, Ферми–Дирак таралу функциялары, химиялық потенциал.

Адем Аккуш
Университет Газиосманпаша, Токат, Турция
*e-mail: ademakkus76@yahoo.com

Аналитическая оценка изменений сопротивления полупроводников в слабых магнитных полях

Изменения электрического сопротивления под воздействием магнитных полей играют важную роль во многих технологических приложениях, включая жёсткие диски и микросхемные датчики. В данном исследовании рассматривается изменение электрического сопротивления полупроводника, подвергнутого воздействию слабого магнитного поля, в рамках обобщённой теоретической модели. Анализ проводится с использованием однопараметрических функций распределения Ферми–Дирака. Во всех вычислениях используется аналитическое выражение этих функций, предложенное автором. Сравнение между аналитическими результатами и результатами, полученными численными методами, демонстрирует высокий уровень согласия, что подтверждает достоверность и точность предложенной формулировки. Полученные аналитические результаты представлены в табличной форме для повышения наглядности и облегчения прямого сравнения. Данный подход не только упрощает аналитическое описание эффектов магнетосопротивления в полупроводниках, но и позволяет моделировать поведение материала при изменяющихся внешних условиях. Следовательно, разработанная в данной работе модель может способствовать теоретическому проектированию полупроводниковых устройств, особенно в приложениях, требующих точного контроля электронного транспорта под воздействием магнитных полей.

Ключевые слова: магнитное поле, полупроводники, электросопротивление, функции распределения Ферми–Дирака, химический потенциал.

Introduction

Organic semiconductors are widely used as important functional materials in many areas of electrical and electronic technology [1–6]. These materials possess unique electronic properties and functionalities that can be tailored through chemical synthesis to meet specific requirements. Additionally, they are expected to provide electronic applications that are more cost-effective, lighter, and mechanically flexible than current inorganic-based technologies. However, there is still much to learn about the properties of these materials, which can behave differently depending on external factors such as magnetic field, temperature, film thickness, and others [7–14].

One such external factor is the change in electrical resistance of materials under magnetic fields, a phenomenon known as magnetoresistance. Magnetoresistance is widely used in commercial applications, such as computer hard disks and on-chip sensors.

In organic semiconductors, magnetoresistance, referred to as organic magnetoresistance (OMAR) is characterized by changes in electrical resistance upon application of a magnetic field. This effect is typically explained by mechanisms such as spin-dependent processes and hyperfine interactions and plays a significant role in the development of organic spintronic devices [15–20].

In this study, the change in the resistance of semiconductors exposed to an external magnetic field is calculated using an analytical approach based on Fermi–Dirac distribution functions. An analytical formula expressing this behavior has been derived within the framework of kinetic theory using one-dimensional Fermi functions.

The proposed theoretical approach may contribute to guiding future experimental studies in the right direction.

Methods

Analytical formula for calculating semiconductor resistance in a weak magnetic field

Using kinetic theory of transport phenomena, the analytical formula for the change in the resistance of semiconductors under the influence of a weak magnetic field can be expressed as follows [2–4]:

$$\rho(H, \eta) = \rho(0) \left[1 + \left(\frac{uH}{c} \right)^2 A_2(\eta) \right] \quad (1)$$

Here, μ is the chemical potential, B is the magnetic field, χ represents the magnetic susceptibility, and $\rho(0)$ is the resistivity in the absence of a magnetic field. The function $A_2(\eta)$ is defined as follows:

$$A_2(\eta) = \frac{(F_{3/2}(\eta))^2}{(F_{r+1}(\eta))^4} [F_{r+1}(\eta) F_{3r+1}(\eta) - (F_{2r+1/2}(\eta))^2] \quad (2)$$

Here, $F_\alpha(\eta)$ is the Fermi function, defined as follows:

$$F_\alpha(\eta) = \int_0^\infty \frac{e^{x-\eta} x^\alpha}{e^{x-\eta} + 1} dx, \quad (3)$$

Here, η is the variable $-\infty < \eta < \infty$ varies within a certain interval, and α is the parameter can take arbitrary integer or non-integer values. In cases involving charge carriers scattered by acoustic phonons or by ions, the constant r typically takes the values $r = 0$, $r = 2$, respectively. In the study [21], authors have provided the following analytical formulas for the precise calculation of the one-parameter Fermi function:

$$F_\alpha(\eta) = \frac{\eta^{\alpha+1}}{\alpha+1} + \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N f_i(-1) K_i(\alpha, \eta) + \lim_{N' \rightarrow \infty} \sum_{j=0}^{N'} f_j(-1) e^{\eta(1+j)} \times \frac{\Gamma(\alpha+1, \eta(j+1))}{(j+1)^{\alpha+1}} \quad \text{for } 0 < \eta < \infty \quad (4)$$

and

$$F_\alpha(\eta) = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^L f_i(-1) e^{-|\eta|(i+1)} \times \frac{\Gamma(\alpha+1)}{(i+1)^{\alpha+1}} \quad \text{for } -\infty < \eta \leq 0 \quad (5)$$

where the function $K_i(\alpha, \eta)$ is calculated according to the following formula:

$$K_i(\alpha, \eta) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{\alpha} (-1)^j f_j(\alpha) \eta^{\alpha-j} \times \frac{\gamma(j+1, i\eta)}{i^{j+1}} & \text{for integer } \alpha > 0 \\ \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{j=0}^M (-1)^j f_j(\alpha) \eta^{\alpha-j} \times \frac{\gamma(j+1, i\eta)}{i^{j+1}} & \text{for noninteger } \alpha \end{cases} \quad (6)$$

In Eqs. (4), (5), and (6), the indices N, L, M ve N' are the upper bounds of the sums. special functions $\Gamma(\alpha)$, $\Gamma(\alpha, x)$ ve $\gamma(\alpha, x)$ are complete and incomplete Gamma functions and are written as follows [22-24]:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (7)$$

$$\gamma(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (8)$$

$$\Gamma(\alpha, x) = \int_x^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (9)$$

Calculation results and discussion

The change in the electrical resistance of semiconductors under weak magnetic fields has been calculated using Equation (1) for various values of the η relevant parameters. A computational algorithm based on Equation (1) was developed using the Mathematica 10 programming language. The calculations were carried out for silicon (Si) as the

semiconductor material, considering the hole mobility $\mu = 45.10^{-3} \text{ m}^2 / \text{V.s}$, intrinsic resistivity $\rho(0) = 25 \Omega.m$, and the applied magnetic field $H = 0.05 \text{ Tl}$. Our analytical results, alongside those obtained from numerical integration methods, are presented in Table 1. As can be seen from the table,

there is a good agreement between the analytical calculations and the numerical results, confirming the accuracy and reliability of the proposed analytical approach. Furthermore, the results indicate that the derived analytical expression is general and remains valid for arbitrary values of the physical parameters.

Table 1. Comparative results for the electrical resistance of the semiconductor under the weak magnetic field

η	Eq. (1)	Numerical calculation results
-5.0	3.99905770701113E-09	3.99905770701113E-09
-0.3	3.999057707013538E-09	3.999057707013555E-09
-0.7	3.999057707012535E-09	3.999057707012535E-09
-1.6	3.999057707011747E-09	3.999057707011747E-09
-4.8	3.999057707010885E-09	3.99905770708621E-09
-8.8	3.999057707010217E-09	3.999057707010211E-09
1.0	3.999057707016095E-09	3.999057707016061E-09
2.6	3.999057707031013E-09	3.99905770702209E-09
16.8	3.999057707180921E-09	3.99905770710575E-09

Conclusion

This general applicability highlights the advantage of the analytical formulation in modeling the magnetoresistive behavior of semiconductors under weak magnetic fields. It offers a useful theoretical

framework that can complement experimental investigations and support the design of magneto-sensitive semiconductor devices.

References

- 1 A.B. Pippard, *Magnetoresistance in Metals*, (Cambridge Press, Cambridge, UK, 1989).
- 2 B.M. Askerov, *Kinetic effects in semiconductor*, (Leningrad, , Russia, 1970). (in Rus.).
- 3 B.M. Askerov, *Electron transport in semiconductor*, (Word Scientific, Singapore, 1985).
- 4 W. Jones, & H. N. Norman, *Theoretical Solid State Physics*, (Dover, London, UK, 1985).
- 5 J. M. Ziman, *Electrons and phonons: The theory of transport phenomena in solids*, (Clarendon Press, Oxford, 1960).
- 6 O.S. Gryazanov, *Tables for the calculation of kinetic coefficients in semiconductors*, (Nauka, Leningrad, Russia, 1971).
- 7 F.J. Blatt, *Theory of Mobility of Electrons in Solids*, *Solid State Phys.* **4**, 199–366 (1957). [https://doi.org/10.1016/S0081-1947\(08\)60155-1](https://doi.org/10.1016/S0081-1947(08)60155-1)
- 8 R. Saffert, J. Schapawalow, G. Landwehr, E. Gmelin, *Nernst-Ettingshausen and Seebeck Effect of Pure and Electron-Irradiated Tellurium at Low Temperatures*, *Phys. Stat. Sol. B.* **61**, 509–519 (1974). <https://doi.org/10.1002/pssb.2220610216>
- 9 X. Liu, X. C. Xie, *Spin Nernst effect in the absence of a magnetic field*, *Solid State Commun.* **150**, 471–474 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2009.12.017>
- 10 V. V. Shchennikov, S. V. Ovsyannikov, *Thermoelectric power, magnetoresistance of lead chalcogenides in the region of phase transitions under pressure*, *Solid State Commun.* **126**, 373–378 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(03)00210-2)
- 11 P. Drude, *Zur Elektronentheorie der Metalle*, *Ann. Phys.* **306**, 566–613 (1900). <https://doi.org/10.1002/andp.19003060312>
- 12 U.I. Erkaboev, R. G. Rakhimov, J. I. Mirzaev, N. A. Sayidov, *The influence of external factors on quantum magnetic effects in electronic semiconductor structures*, *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* **9**, 1557–1563 (2000). <https://doi.org/10.35940/ijitee.E2613.039520>

- 13 R.W. Series, & D.T.J. Hurle, The use of magnetic fields in semiconductor crystal growth, *J. Cryst. Growth.* **113**, 305-328 (1991). [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(91\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0022-0248(91)90036-5)
- 14 C. Frank-Rotsch, N. Dropka, F. M. Kießling, P. Rudolph, Semiconductor crystal growth under the influence of magnetic fields *Cryst. Res. Technol.* **55**, 1900115 (2020). <https://doi.org/10.1002/crat.201900115>
- 15 P. A. Bobbert, T. D. Nguyen, F. W. A. Van Oost, V. B. Koopmans, M. Wohlgenannt, Bipolaron mechanism for organic magnetoresistance, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 216801 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.216801>
- 16 W. Wagemans, P. Janssen, A. J. Schellekens, F. L. Bloom, P. A. Bobbert, B. Koopmans, The many faces of organic magnetoresistance, *In Spin.* **1**, 93-108 (2011). <https://doi.org/10.1142/S2010324711000082>
- 17 U. Niedermeier, M. Vieth, R. Pätzold, W. Sarfert, H. Von Seggern, Enhancement of organic magnetoresistance by electrical conditioning, *App. Phys. Lett.* **92**, 193309 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2924765>
- 18 V. N. Prigodin, J. D. Bergeson, D. M. Lincoln, A. J. Epstein, Anomalous room temperature magnetoresistance in organic semiconductors, *Synth. Met.* **156**, 757-761 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2006.04.010>
- 19 F. L. Bloom, W. Wagemans, B. Koopmans, Temperature dependent sign change of the organic magnetoresistance effect, *J. Appl. Phys.* **103**, 07F320 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2839317>
- 20 J. Ren, Y. Zhang, S. Xie, Charge current polarization and magnetoresistance in ferromagnetic/organic semiconductor/ferromagnetic devices, *Org. Electro.* **9**, 1017-1021 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2008.07.008>
- 21 I. I. Guseinov, B. A. Mamedov, Unified treatment for accurate and fast evaluation of the Fermi Dirac functions, *Chin. Phys. B.* **19**, 050501 (2010). <https://doi.org/10.1088/1674-1056/19/5/050501>
- 22 I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, *Tables of Integrals, Sums, Series and Products*, (4th ed., Academic Press, New York, 1980).
- 23 I. I. Guseinov, B. A. Mamedov, M. Kara, M. Orbay, On the computation of molecular auxiliary functions A_n and B_n , *Pramana J. Phys.* **56**, 691-696 (2001). <https://doi.org/10.1007/s12043-001-0093-x>
- 24 E. Çopuroğlu, Theoretical estimation of entropy of solids by using integer and non-integer n-dimensional Debye functions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **593**, 126915 (2002). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.126915>

Мақала тарихы:

Түсті – 02.06.2025

Түзетілген түрде түсті – 20.12.2025

Қабылданды – 20.12.2025

Article history:

Received 02 June 2025

Received in revised form 20 December 2025

Accepted 20 December 2025

Автор туралы мәлімет:

Адем Акқұс – PhD, физика кафедрасы,
Газиосманпаша университеті, Токат, Түркия, e-
mail: ademakkus76@yahoo.com

Information about authors

Adem Akkuş – PhD, Department of Physics,
Gaziosmanpaşa University, Tokat, Türkiye, e-mail:
ademakkus76@yahoo.com

M. Yerdauletov^{1,2} , F. Napolskiy^{2,3} , Ch. Daulbayev¹ , K. Nazarov^{1,2,4} ,
M. Kenessarin^{1,2,4,*} , A. Zhomartova^{1,2} , Zh. Dakhiyev⁴ , A. Bekbayev^{1,2,4} 

¹Institute of nuclear physics, Almaty, Kazakhstan

²Joint institute for nuclear research, Dubna, Russia

³Dubna state university, Dubna, Russia

⁴Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: muratkenessarin@inp.kz

IMAGING INTERNAL STRUCTURES IN LITHIUM-ION AND SODIUM-ION BATTERIES BY NEUTRON AND X-RAY TOMOGRAPHY

This paper presents the application of combined non-destructive diagnostic methods—neutron and X-ray tomography, conducted using the TITAN neutron radiography and tomography facility at the WWR-K reactor, as well as the IMAX X-ray tomography facility, to visualize the internal structure of 2032 and 18650 battery cells provided by the Research, Design, and Technology Center for Electrochemical Engineering at Dubna State University. The obtained X-ray and neutron tomography data revealed inhomogeneities in the distribution of the base materials, as well as areas of low and high radiation attenuation, gaps, and voids at the boundaries between the electrodes and the battery case. The analysis results demonstrate the high efficiency of X-ray and neutron tomography for quality assessment during the manufacture of such batteries. The conducted test demonstration experiments allow for the development of methods for the combined application of these methods and provide a basis for their further use in the research and development of new battery systems.

Keywords: x-ray tomography, neutron tomography, li-ion and sodium-ion battery.

М. Ердаулетов^{1,2}, Ф.С. Напольский^{2,3}, Ч. Даулбаев¹, К.М. Назаров^{1,2,4},
М. Кенесарин^{1,2,4,*}, А. Жомартова^{1,2}, Ж. Дахиев⁴, А. Бекбаев^{1,2,4}

¹Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²Біріккен ядролық зерттеу институты, Дубна, Ресей

³Дубна мемлекеттік университеті, Дубна, Ресей

⁴Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: muratkenessarin@inp.kz

Нейтрондық және рентгендік томография көмегімен литий-ионды және натрий-иондық батареялардың ішкі құрылымдарын бейнелеу

Бұл жұмыста аккумуляторлық 2032 және 18650 типті өлшемді элементтердің ішкі құрылымын бейнелеу үшін бұзбайтын диагностиканың біріктірілген әдістері, яғни нейтрондық және рентген томографиясы қолданылды. Нейтрондық томографиялық зерттеулер ССР-Қ (сүмен салқындатылатын реактор) реакторында орналасқан “TITAN” нейтрондық радиография және томография қондырғысында, ал рентгендік томография IMAX қондырғысында жүргізілді. Зерттеу объектілері Дубна мемлекеттік университетінің электрохимиялық машина жасау саласындағы ғылыми - конструкторлық және технологиялық орталығы тарапынан ұсынылды. Алынған рентгендік және нейтрондық томографиялық мәліметтер базалық материалдардың таралуының біркелкі еместігін, сондай-ақ электродтар мен аккумулятор корпусының арасындағы шекаралардағы төмен және жоғары радиациялық әлсіреу аймақтарын, саңылаулар мен бос орындарды анықтады. Талдау нәтижелері осындай батареяларды өндіру кезінде сапаны бағалау үшін рентгендік және нейтрондық томографияның жоғары тиімділігін көрсетеді. Өткізілген сынақ-демонстрациялық тәжірибелер осы әдістерді біріктіріп қолдану әдістерін жасауға мүмкіндік

береді және оларды жаңа аккумуляторлық жүйелерді зерттеу мен әзірлеуде одан әрі пайдалану үшін негіз болады.

Түйін сөздер: рентгендік томография, нейтрондық томография, литий-иондық және натрий-иондық батарея.

М. Ердаулетов^{1,2}, Ф.С. Напольский^{2,3}, Ч. Даулбаев¹, К.М. Назаров^{1,2,4},
М. Кенесарин^{1,2,4,*}, А. Жомартова^{1,2}, Ж. Дахиев⁴, А. Бекбаев^{1,2,4}

¹Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан,

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Государственный университет Дубна, Дубна, Россия

⁴Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: muratkenessar@inp.kz

Визуализация внутренних структур в литий-ионных и натрий-ионных батареях с помощью нейтронной и рентгеновской томографии

В данной работе представлено применение комбинированных методов неразрушающей диагностики – нейтронной и рентгеновской томографии, проведенных с использованием установки нейтронной радиографии и томографии «ТИТАН» на реакторе ВВР-К, а также рентгеновской томографической установки IMAX, для визуализации внутренней структуры аккумуляторных ячеек типоразмеров 2032 и 18650, предоставленных Научно-конструкторским и технологическим центром электрохимического машиностроения Государственного университета «Дубна». Полученные данные рентгеновской и нейтронной томографии выявили неоднородности распределения материалов основы, а также области пониженного и повышенного ослабления излучения, зазоры и пустоты на границах электродов с корпусом аккумулятора. Результаты анализа демонстрируют высокую эффективность рентгеновской и нейтронной томографии для оценки качества при изготовлении таких аккумуляторов. Проведенные тестовые демонстрационные эксперименты позволяют разработать методики комбинированного применения этих методов и создают основу для их дальнейшего использования при исследовании и разработке новых аккумуляторных систем.

Ключевые слова: рентгеновская томография, нейтронная томография, литий-ионные и натрий-ионные батареи.

Introduction

In 2015, the Paris Agreement was signed, committing 195 countries to reducing greenhouse gas emissions and slowing global climate change. As a result, more and more countries are focusing on renewable energy and green technologies. However, solar panels and wind turbines face a significant challenge: they are climate-sensitive. To ensure constant electricity availability, reliable energy storage systems are needed.

The limited supply of fossil energy sources, as well as the widespread deterioration of the environmental situation, leads to the need to increase the share of renewable energy consumption and the inevitable use of electric drives for vehicles. The widespread use of renewable energy sources and electric vehicles is limited by the lack of high-capacity and energy-efficient energy storage devices,

among which rechargeable chemical current sources (CCS) occupy an important place. In the field of "green" energy, CCS is necessary to equalize the load in electrical networks, regulate the frequency and provide consumers with renewable energy in times of power generation failures that occur when using wind, solar or wave power plants. In this regard, an urgent task is to improve existing, search for and develop new energy-intensive and efficient rechargeable batteries.

One of the most common options is rechargeable electrochemical storage devices such as ion batteries, which are considered as a promising solution. Today, lithium-ion batteries (LIBs) are the dominant technology for electronics, electric vehicles, and stationary energy storage systems due to their high energy, long service life, and technology maturity.

Nevertheless, the shortage of lithium and the uneven distribution of its resources in the world, as well as the increasing demand for large-scale storage devices, are stimulating active research into alternative electrochemical cells such as sodium ion batteries (SIBs). Sodium-ion batteries are positioned as a widespread and cheap electrochemical cell, therefore sodium is competitive and especially promising for use in the energy sector [1].

Microstructural defects, porosity, grain boundaries, and interfacial boundary stability directly affect ion transport, energy storage efficiency, and battery durability. Diagnostic and analytical methods are used to study the battery at the micron level and identify defects. Such methods mainly describe the spatial arrangement of the cells and the internal structure of the battery, so it is necessary to use non-destructive testing methods. Neutron and X-ray (X-ray) radiography and tomography have proven themselves well among the methods of non-destructive testing [2]. X-ray tomography provides high spatial resolution and is sensitive to heavy elements, which makes it particularly useful for analyzing battery structure, while neutron tomography demonstrates high sensitivity to light elements such as hydrogen and lithium, allowing direct observation of lithium distribution, electrolyte dynamics, and interfacial processes inaccessible to X-ray methods. These techniques contribute to a deep understanding of the structure, morphology, chemistry, and kinetics of LIBs, allowing for selective analysis to optimize electrodes and improve overall battery efficiency [3].

The combined use of these approaches opens up unique opportunities for the complex analysis of electrochemical systems. The use of these methods allows not only to observe the general morphology, but also to identify internal defects and the uniformity of the distribution of materials in the battery[4].

Methodology

Material preparation. In this study, we chose a lithium- and sodium-ion battery (LIB and SIB) of coin-cell type 2032 and commercial battery 18650 as a test sample. The main direction of research aimed at visualize the lithium ion batteries structure inside the cell in the initial and final states of charging processes.

Neutron tomography facility. Figure 1 shown Neutron tomography studies were performed at the TITAN (Transmission imaging with Thermal Neutrons) facility located on the 1st horizontal channel of the WWR-K research reactor. At the TITAN facility, a thermal neutron beam was formed by a system of collimators with an aperture diameter of 2 cm, L/D parameter 350. The size of the neutron beam at the sample position is $8.6 \times 8.6 \text{ cm}^2$. The neutron projections were recorded by a position-sensitive detector consisting of a scintillation screen based on ZnS(Ag) and ^6LiF with a thickness of 100 microns, and a CCD matrix with dimensions of 2048×2048 pixels. The exposure time for one radiography frame was 20 seconds. The spatial resolution of the images obtained was about 200 microns with a pixel size of 42×42 microns. [5].

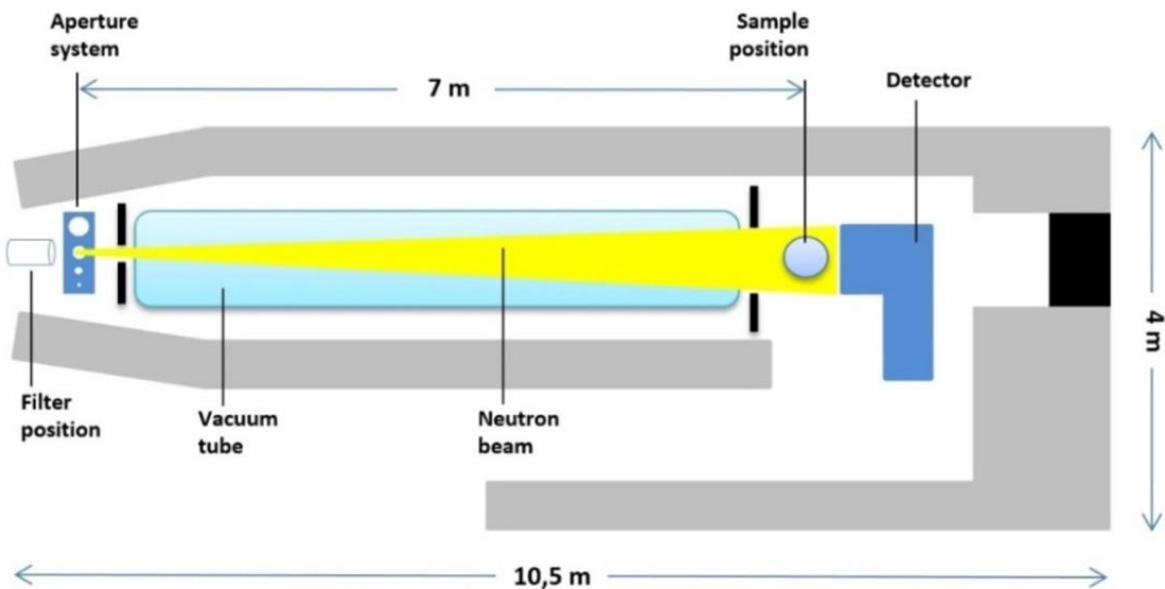


Figure 1 – Scheme of the experimental neutron tomography facility TITAN

The ImageJ software package was used for primary image processing [6], projection and analysis assemblies, whereas the STP Syrmep Tomo project was used for tomography reconstruction of a three-dimensional model of the studied samples [7]. The visualization and segmentation processes were performed in the Imagej program [Schneider C. A., Rasband W. S., and Eliceiri K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // Nature Methods, – 2012, – Vol.9, – P. 671–675.].

X-ray tomography facility. Experiments on X-ray tomography were carried out on a compact IMAX facility at the Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan in figure 2. An X-ray source (Spelman

XR011) with a size of about 30 microns is installed on the IMAX (IMAging with X-ray) installation. A microfocus source with a voltage range from 35 to 80 kV and a current range of 0-700 Ma. The distance from the focus (the point where the X-ray radiation occurs) to the outer window of the tube is 32mm. The X-ray beam exits at an angle of 40° and additionally there is a copper filter with different thicknesses for filtering low-energy parts. The field of view of the detector is 114x145 mm, the pixel size is 64 microns [8].

In this work, the time of one tomography experimental work was about 2 hours.

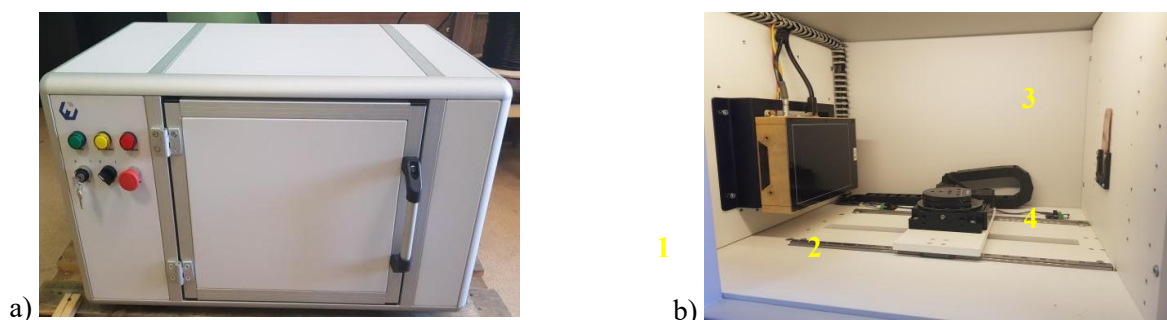


Figure 2 – a) Real photo of outside view b) inside view:
1) detector 2) rotational and linear stage 3) copper filter 4) source.

Results and discussion

Coin cell. Neutron tomography examination of a coin-type 2032 lithium-ion cell has provided detailed information about its internal structure. The main structural elements are clearly visible on the horizontal section (Figs. 3b and 4b). An area with reduced attenuation is visible along the central horizontal axis, which differs from the main structure (indicated by the purple arrow), which corresponds to the polypropylene separator layer. A bright area with high neutron attenuation is also visible on the side (orange arrow), due to the presence of an insulating plastic ring between the housing of the positive and negative electrodes, which also effectively attenuates the neutron flux. In figure 3b and 4b, on both tomography sections,

elongated dark areas with low attenuation are observed in the upper part of the battery housing (yellow arrow), which corresponds to a pressure metal punch. In Figures 3c and 4, on color tomography images, the regions with low neutron attenuation are displayed in blue shades, while the zones with high attenuation are visualized in red-green colors.

To obtain additional information using X-ray tomography, an experiment of 3D reconstruction of coin cell was conducted, but due to the fact that the housing and electrodes strongly scatter and absorb X-rays, the image turned out to be blurred and distorted. As a result, it was not possible to restore the internal structure of the battery correctly.

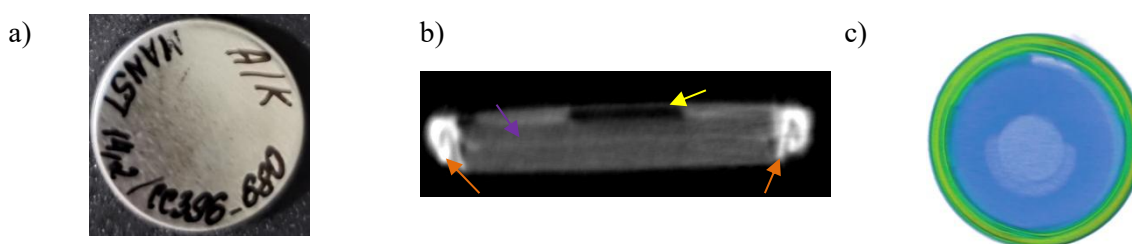


Figure 3 – a) Real photo of A/K coin cell, b) Horizontal slice, c) 3D Neutron tomography drawing

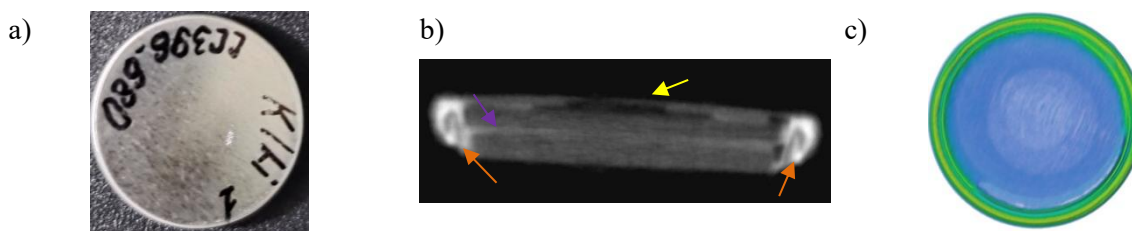


Figure 4 – a) Real photo of K/Li coin cell, b) Horizontal slice, c) 3D Neutron tomography drawing

Sodium 18650 sample. The neutron tomography results made it possible to visualize the internal structure of a cylindrical 18650 sodium-ion battery and identify a number of design features. Figure 5b shows a neutron-radiography image of the battery. Figure 5c shows a tomography section on which the structure of the electrode block is clearly distinguishable. An elongated dark area is observed in the central part, and Figure 5c shows that it has a cylindrical shape and corresponds to an empty space arising from the winding rod of the cell. To the left of this central area, there is an additional elongated dark stripe (yellow arrow), which may indicate the presence of a gap and an uneven fit of the electrodes or separator to each other. Also, another vertical elongated dark stripe (red arrow) is visualized on the slice on the left, which can be interpreted as a void in the center of the twist due to the presence of a positive current outlet. The area marked with purple arrows is characterized by a uniform attenuation of neutrons, which may indicate the presence of an electrolyte. In the right part of the image, there are areas with signs of voids or bulges on the boundary between the electrode material and the housing (black arrow), which may be due to a violation of contact. The left side, on the contrary, demonstrates a tighter fit of the electrodes to the housing. In the upper part of the housing, both on the left and on the right, there are areas with increased attenuation (orange arrow), which corresponds to a plastic insulator between the lid (positive contact) and the housing (negative contact) of the cell. All these features can also be traced in the three-dimensional reconstruction shown in Figure 5d.

Figure 5d shows a three-dimensional reconstruction of a Sodium 1500 battery obtained by neutron tomography. The use of a color scale made it possible to clearly visualize the internal structure and distribution of materials by volume. The blue and cyan hues correspond to regions with low neutron attenuation, which indicates the presence of less dense materials, components with low interaction cross-section, or voids. The yellow-red areas show areas with high attenuation, corresponding, for example, to a

metal body.

Figure 6 a),b) shows an X-ray vertical section with a pixel resolution of 16 microns of the upper part of an 18650 cylindrical cell. The internal structure of the electrode block is more clearly discernible in this image than in the X-ray data. The central region is represented with a low attenuation of the X-ray beam, which corresponds to a void as described above. In the left part of the slice, a thin vertical line with low attenuation is visible among the layers of the electrode winding (red arrow), but larger than the central cylindrical part. The connection line to the upper contact area is also visible (blue), which corresponds to the aluminum current lead connecting the positive electrode to the cell cover. It is worth noting that this connecting line was not visible in the neutron tomography section. The X-ray tomography section clearly shows the unevenness of the winding of the electrode block (horizontal yellow dotted line). Similar to the results of the neutron tomography section, the X-ray tomography section also shows a distortion of the electrode block in the central part (yellow arrow). However, according to X-ray tomography, it can be unequivocally said that this bend is associated precisely with the inner layer of the separator, since in the upper part it is he who protrudes beyond the electrodes.

Conclusions

The use of neutron, X-ray, and tomography provides comprehensive information on the internal structure and processes in lithium-ion and sodium-ion batteries. The resulting data on degradation mechanisms and the uneven distribution of active components can be used to optimize battery design, material selection, and operating modes, directly contributing to the creation of more reliable and durable energy devices.

Future research plans include using in situ and operando modes to monitor dynamic changes in batteries during operation. This includes tracking lithium and sodium dendrite formation, gas formation, and changes in electrode density and structure during charge-discharge cycles.

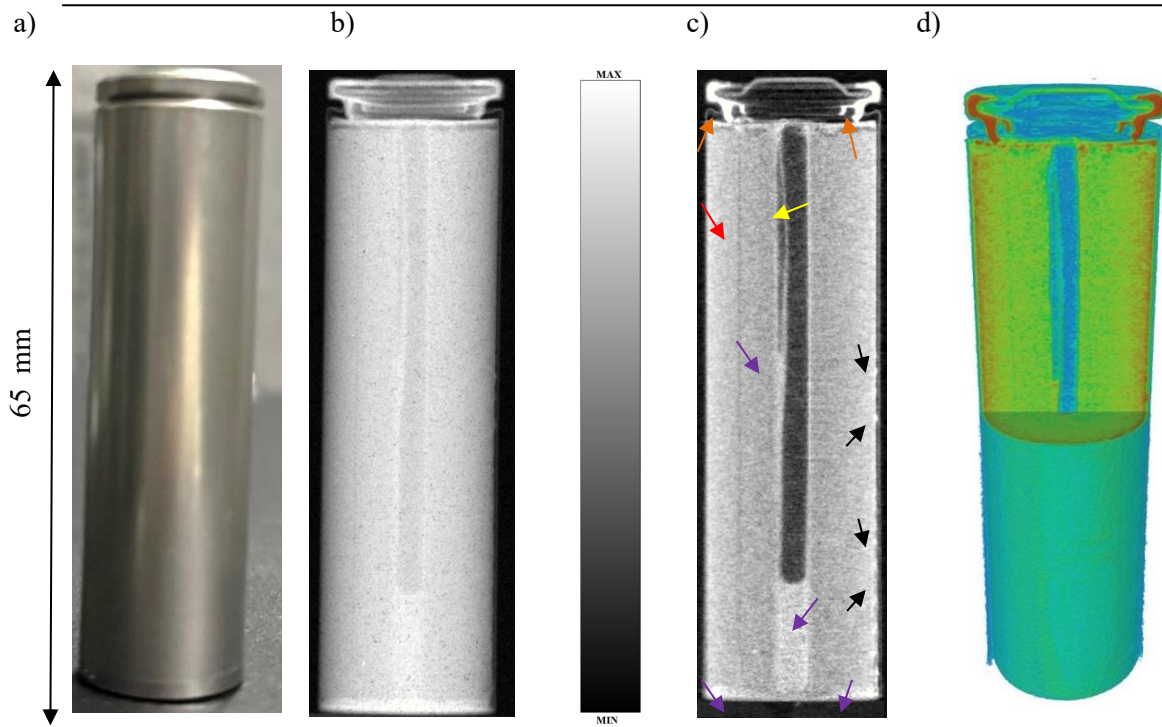


Figure 5 – a) Real photo of Sodium 1500 b) radiography image c) vertical section of a neutron tomography image d) 3D neutron tomography blue

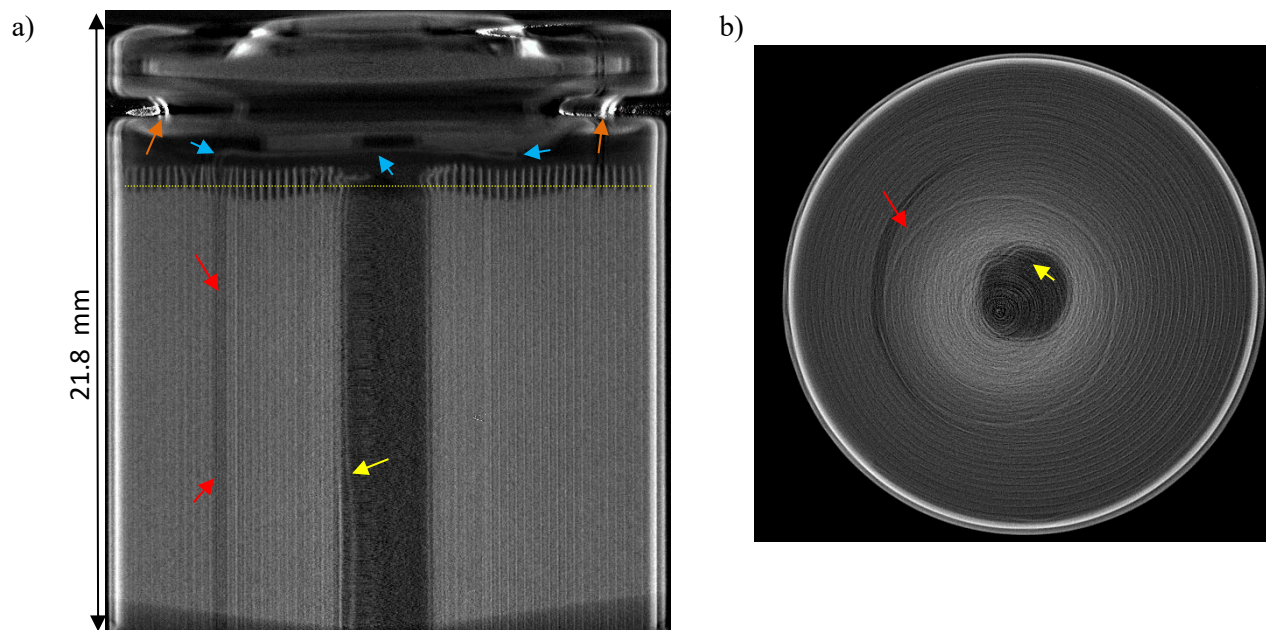


Figure 6 – a) X-ray (Top of battery)

b) X-ray tomography slice

Acknowledgements

This work was supported by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under Grant No. AP19577080.

References

- 1 A. Yao, S.M. Benson, and C.Chueh, Critically assessing sodium-ion technology roadmaps and scenarios for techno-economic competitiveness against lithium-ion batteries, Nat. Energy 10, 404–416 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01701-9>

- 2 I.S. Anderson, R.L. McGreevy, H.Z., and Bilheux, Neutron Imaging and Applications, (Springer. 2009). <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-78693-3>.
- 3 R.F. Ziesche, N. Kardjilov, W. Kockelmann, D.J.L. Brett, and P.R. Shearling, Neutron imaging of lithium batteries, *Joule* **6**, 35-52 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.12.007>
- 4 K.M. Nazarov, B. Mukhametuly, S.E. Kichanov, T.K. Zholdybayev, A.A. Shaimerdenov, K.B. Karakozov, D.S. Dyussambayev, M.T. Aitkulov, M. Yerdauletov, P. Napolskiy, M. Kenessarin, E.K. Kalymkhan, N.A. Imamverdiyev, S.H. Jabarov, Non-destructive analysis of materials by neutron imaging at the TITAN facility, *Eurasian J. Phys. Funct. Mater.* **5**, 6-14 (2021). <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2021050101>
- 5 K.M. Nazarov, B. Muhametuly, E.A. Kenzhin, S.E. Kichanov, D.P. Kozlenko, E.V. Lukin, A.A. Shaimerdenov, New neutron radiography and tomography facility TITAN at the WWR-K reactor, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **982**, 164572 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164572>
- 6 C.A. Schneider, W.S. Rasband, and K.W. Eliceiri, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nat. Methods* **9**, 671–675 (2012). <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- 7 F. Brun, L. Massimi, M. Fratini, D. Dreossi, F. Bille, A. Accardo, R. Pugliese, and A. Cedola, SYRMEP Tomo Project: a graphical user interface for customizing CT reconstruction workflows, *Adv. Struct. Chem. Imaging*, **3**, 4 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40679-016-0036-8>
- 8 I. Chuprakov, K. Nazarov, B. Mukhametuly, A. Bekbayev, Y. Arynbeke, M. Kenessarin, Y. Bazarbayev, E. Myrzabekova, A. Nazarova, B. Abdurakhimov, and I. Zel, IMAX – a compact x-ray microtomography instrument for material research, *Herald Kazakh-Brit. Tech. Univ.* **22**, 1 (2025). <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-1-298-306>

Мақала тарихы:

Түсті – 20.10.2025

Қабылданды – 15.12.2025

Article history:

Received 20 October 2025

Accepted 15 December 2025

Авторлар туралы мәлімет:

1 **Меир Ердаулетов**, аға ғылыми қызметкер, Нейтрондық физика зертханасы, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: mevir2008@mail.ru

2. **Филипп Напольский**, ғылыми қызметкер, Франк Нейтрондық физика зертханасы, Біріккен Ядролық Зерттеу Институты, Дубна, Ресей; e-mail: philipp.napolsky@gmail.com

3. **Чингис Даулбаев**, Зертхана меңгерушісі, Электрохимиялық түрлендіру және энергияны сақтау зертханасы, Ядролық Физика Институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: ch.daulbayev@inp.kz

4. **Назаров Куаныш**, зертхана меңгерушісі, Нейтрондық физика зертханасы, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: k.nazarov@inp.kz

5. **Мұрат Кенесарин** (автор-корреспондент) – Кіші ғылыми қызметкер, Нейтрондық физика зертханасы, Ядролық Физика Институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: muratkenessarin@inp.kz

6. **Аязжан Жомартова**, аға ғылыми қызметкер, Нейтрондық физика зертханасы, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: zhomartova@jinr.ru

7. **Жанарыс Дахиев**, магистрант, Физика-техникалық факультеты, Өл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: volttrone@mail.ru

8. **Асхат Бекбаев**, бас инженердің орынбасары, ССР-Қ кешені, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.bekbayev@inp.kz

Information about authors:

1. **Meir Yerdauletov**, Senior researcher, Laboratory of Neutron Physics, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mevir2008@mail.ru

2. **Filipp Napolskiy**, Researcher, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia; e-mail: philipp.napolsky@gmail.com

3. **Chingis Daulbayev**, Head of laboratory, Laboratory of Electrochemical Energy Conversion and Storage, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ch.daulbayev@inp.kz

4. **Kuanyshe Nazarov**, Head of laboratory, Laboratory of neutron physics, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: k.nazarov@inp.kz

5. **Murat Kenessarin** (corresponding author), Junior researcher, Laboratory of Neutron Physics, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, e-mail: e-mail: muratkenessarin@inp.kz

6. **Ayazhan Zhomartova**, Senior Researcher, Laboratory of Neutron Physics, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhomartova@jinr.ru

7. **Zhanarys Dakhiyev**, Master's student, faculty of physics and technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: volttrone@mail.ru

8. **Askhat Bekbayev**, Deputy chief engineer, WWR-K complex, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.bekbayev@inp.kz

Жоғары мектепте физика пәнін оқыту әдістемесі

Methods of teaching high school physics

Методика преподавания физики в высшей школе

Ә.Ф. Мырзағалиева¹ , Г. Ревалде² , І.Е. Әубәкір^{1*} 

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Рига техникалық университеті, Рига, Латвия

*e-mail: izgizanaubakir@gmail.com

ФИЗИКА ПӘНІНДЕ ЖОБАЛЫҚ ОҚЫТУ ТӘСІЛДЕРІН ҚОЛДАНУ

Бұл мақалада физика курсына механикалық толқындардың интерференциясын зерттеу мысалында жобалық оқытудың тиімділігі қарастырылды. Зерттеу жұмысы цифрлық трансформация дәуірінде физика пәнін оқыту мазмұнын жаңғырту, оқу үрдісін ғылыми-тәжірибелік іс-әрекетке негіздеу және білім алушылардың зерттеу дағдыларын қалыптастыру мақсатында жүргізілді. Физикадағы жобалық оқыту білім алушылардың зерттеушілік белсенділігі арттырып, олардың теориялық білімін нақты тәжірибемен байланыстыруға мүмкіндік береді. Мақалада жобалық тәсілдің теориялық және әдістемелік негіздері талданып, оның ғылыми білімді меңгерудегі артықшылықтары айқындалған.

Зерттеу барысында білім алушылар механикалық толқындардың интерференциясын зерттейтін шағын жоба орындады. Жоба кезеңдері гипотеза ұсыну, эксперименттік қондырғы жасау, бақылау, деректер жинау және нәтижелерді талдауды қамтыды. Эксперимент нәтижелері толқын жиілігі мен амплитудасының өзгерісі интерференциялық сурет құрылымына әсер ететінін көрсетті. Алынған деректер теориялық модельдермен сәйкестендірілді және физикалық заңдылықтардың дұрыстығын растады.

Жоба нәтижелері көрсеткендей, жобалық оқыту әдісі білім алушылардың зерттеу, аналитикалық және коммуникативтік құзыреттерін айтарлықтай дамытады. Сауалнама нәтижелері бойынша білім алушылардың көпшілігі жобалық жұмыс олардың пәнге қызығушылығын, танымдық белсенділігін және бірлесіп әрекет ету қабілеттерін арттырғанын атап өтті. Зерттеу жобалық оқытудың цифрлық трансформация жағдайында физиканы оқытудың тиімді педагогикалық моделі екенін және оны жалпы білім берудің жаңартылған мазмұнына енгізудің маңыздылығын дәлелдейді.

Түйін сөздер: жобалық оқыту, толқындардың интерференциясы, физика, зерттеу құзыреттері, цифрлық трансформация.

A.G. Murzagalieva¹, G. Revalde², I.E. Aubakir^{1*}

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Riga Technical university, Riga, Latvia

*e-mail: izgizanaubakir@gmail.com

The use of project-based learning methods in physics

This article examines the effectiveness of project-based learning in a high school physics course using the example of studying the interference of mechanical waves. The research work was conducted with the aim of modernizing the content of physics teaching in the era of digital transformation, basing the learning process on scientific and practical activities, and developing students' research skills. Project-based learning in physics increases students' research activity and allows them to connect their theoretical knowledge with practical experience. The article analyzes the theoretical and methodological foundations of the project approach and identifies its advantages in mastering scientific knowledge.

During the study, students a small project studying the interference of mechanical waves. The project stages included proposing a hypothesis, creating an experimental setup, observing, collecting data, and analyzing the results. The experimental results showed that changes in wave

frequency and amplitude affect the structure of the interference pattern. The obtained data were matched with theoretical models and confirmed the correctness of physical laws.

The project results showed that the project-based learning method significantly develops students' research, analytical and communicative competencies. According to the survey results, the majority of students noted that project work increased their interest in the subject, cognitive activity and ability to work together. The study proves that project-based learning is an effective pedagogical model for teaching physics in the context of digital transformation and the importance of introducing it into the updated content of general education.

Keywords: project-based learning, wave interference, physics, research competencies, digital transformation.

А.Г. Мурзагалиева¹, Г. Ревалде², И.Е. Аубакир^{1*}

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Рижский технический университет, Рига, Латвия

*e-mail: izgizanaubakir@gmail.com

Применение проектного метода обучения в физике

В данной статье рассматривается эффективность проектного метода обучения в курсе физики на примере изучения интерференции механических волн. Исследование проводилось с целью модернизации содержания преподавания физики в эпоху цифровой трансформации, опоры учебного процесса на научно-практическую деятельность и развития исследовательских навыков учащихся. Проектный метод обучения в физике повышает исследовательскую активность учащихся и позволяет им связать теоретические знания с практическим опытом. В статье анализируются теоретико-методические основы проектного метода и выявляются его преимущества в усвоении научных знаний.

В ходе исследования учащиеся выполнили небольшой проект по изучению интерференции механических волн. Этапы проекта включали выдвижение гипотезы, создание экспериментальной установки, проведение наблюдений, сбор данных и анализ результатов. Результаты эксперимента показали, что изменение частоты и амплитуды волн влияет на структуру интерференционной картины. Полученные данные были сопоставлены с теоретическими моделями и подтвердили справедливость физических законов.

Результаты проекта показали, что метод проектного обучения существенно развивает исследовательские, аналитические и коммуникативные компетенции учащихся. Согласно результатам опроса, большинство учащихся отметили, что проектная работа повышает их интерес к предмету, познавательную активность и способность к совместной работе. Исследование доказывает, что проектное обучение является эффективной педагогической моделью обучения физике в условиях цифровой трансформации и важность его внедрения в обновленное содержание общего образования.

Ключевые слова: проектное обучение, интерференция волн, физика, исследовательские компетенции, цифровая трансформация.

Кіріспе

Қазіргі заманғы білім беру жүйесі ғылым мен технологияның үздіксіз дамуы, ақпараттық кеңістіктің кеңеюі және цифрлық трансформацияның жедел даму жағдайында түбегейлі өзгерістерге ұшырап отыр. Бұл өзгерістер оқыту үдерісін жаңаша ұйымдастыруды, білім алушылардың белсенді танымдық іс-әрекетін күшейтуді және ғылыми-зерттеу дағдыларын дамытуды талап етеді.

Әсіресе физика пәнін оқытуда бұл бағыт ерекше өзектілікке ие, себебі физика – табиғат құбылыстарын тәжірибе арқылы түсіндіруге мүмкіндік беретін ғылым.

Дәстүрлі оқыту әдістері көбіне ақпаратты беруге және оны есте сақтауға бағытталады, ал білім алушы пассивті қабылдаушы рөлінде қалады. Мұндай тәсіл білім алушылардың ғылыми ойлауын, эксперименттік және шығармашылық қабілеттерін жеткілікті дамытпайды. Сондықтан педагогикалық

қауымдастық соңғы жылдары оқытуда тұлғаға бағытталған, әрекетке негізделген тәсілдерді – оның ішінде жобалық және зерттеу әдістерін белсенді енгізуде.

Жобалық оқыту (Project-Based Learning, PBL) – білім алушылардың нақты проблемаларды шешу арқылы жаңа білім алуға және оны практикалық контексте қолдануға бағытталған инновациялық әдіс [1]. Ол білім алушылардың өз бетімен мақсат қоюына, жоспар құруына, зерттеу жүргізуіне, деректерді талдауға және нәтижелерін қорғауға мүмкіндік береді [2]. Осылайша білім алушылар ғылыми зерттеу кезеңдерін тәжірибеде игеріп, танымдық тәуелсіздікке үйренеді.

Физика пәнінде бұл әдістің тиімділігі ерекше. Мысалы, толқындардың интерференциясы сияқты күрделі тақырыпты меңгеруде білім алушылар тек теориялық заңдылықтарды үйреніп қана қоймай, өздері шағын зерттеу жобасын орындайды. Олар екі толқынның өзара әсерін эксперимент арқылы зерттеп, интерференциялық суретті талдайды, параметрлердің өзгерісін бақылайды және нәтижелерін теориямен салыстырады. Мұндай тәжірибелік әрекет білім алушылардың зерттеу мәдениетін қалыптастырып, ғылымның логикасын терең ұғынуға мүмкіндік береді.

Цифрлық трансформация жағдайында бұл процеске жаңа мүмкіндіктер ашылууда. Қазіргі уақытта PhET Interactive Simulation, Crocodile Physics сияқты виртуалды зертханалар мен сандық құралдар кеңінен қолданылып келеді. Олар арқылы білім алушылар толқындардың интерференциясын нақты модельдеп, параметрлерді өзгерте отырып визуалды бақылау жүргізе алады. Мұндай орта оқу процесін қызықты әрі интерактивті етеді және теория мен практиканы ұштастырады.

Осы тұрғыдан алғанда, физика пәнін жобалық форматта оқыту – білім алушылардың функционалдық сауаттылығын, ғылыми көзқарасын және зерттеушілік қабілетін дамытуға бағытталған заманауи педагогикалық тәсіл болып табылады. Бұл әдіс Қазақстан Республикасының жалпы білім беруді жаңғырту стратегиясымен және орта білім мазмұнын жаңарту тұжырымдамасымен толық үйлеседі.

Зерттеуде ұсынылған эмпирикалық деректер студенттердің мотивациясының, топтық жұмыстың, шығармашылықтың және физика ұғымдарын түсінудің тереңдігінде айтарлықтай жақсартуларды көрсетеді. Шығармашылық жобалық әдісті қабылдаған эксперименттік топтың дәстүрлі оқыту әдістеріне ұшыраған бақылау тобынан айтарлықтай озғанын, оның

ішінде сабаққа қатысу мен баға көрсеткіштерінің сандық деректері көрсетеді [3].

Оғи және басқа авторлары электрондық плакаттар арқылы жобалық оқытуды интеграциялау бастапқы физика мұғалімдеріне негізгі физиканы оқытудың тиімді әдісі болып табылады деген қорытындыға келді. Олар студенттердің белсенділігі мен дағдыларын дамыту үшін бірнеше бағалау көздерін, нұсқаушының басшылығын және тануды пайдаланудың маңыздылығын атап көрсетеді. Зерттеу инновациялық педагогикалық стратегиялар мен технологияның жетілдірілген құралдары арқылы физика білімінде тұжырымдамалық түсінуді дамытудың маңыздылығын көрсетеді. Болашақ зерттеулер физика концепциялары мен оқыту тәжірибесін сақтауға жобалық оқытудың ұзақ мерзімді әсерін бағалау үшін бойлық зерттеулерге бағытталуы керектігін атап өткен. Сонымен қоса, авторлар мұғалімдерді дайындау бағдарламаларында студенттердің белсенділігін және оқу нәтижелерін одан әрі жақсарту үшін виртуалды және толықтырылған шындық (augmented reality) сияқты дамып келе жатқан технологияларды біріктіруді зерттеуді ұсынады [4].

Бұл зерттеуің басты мақсаты – физика курсына механикалық толқындардың интерференциясын зерттеу негізінде жобалық оқыту әдісінің тиімділігін ғылыми тұрғыда негіздеу және оның цифрлық трансформация жағдайында іске асырудың педагогикалық моделін ұсыну.

Әдеби шолу

Зерттеу нәтижелері жобаға негізделген оқытудың (PBL) орта мектеп деңгейінде білім алушылардың мотивациясын арттырып, нақты өмірлік мәселелерді шешуге қатысуға ынталандыратынын көрсетеді. Студенттер PBL аясында атқарған жұмыстарын мағыналы әрі қолданбалы деп бағалайды. PBL әдісінің тиімділігі пәндер аралық тәсілдерді үйлестіре отырып жүзеге асады. Сонымен қатар, мұғалімдер PBL арқылы оқыту бағдарламасының құндылығын нақты түрде дәлелдей алады. Осылайша, жобаға негізделген оқыту сапасын арттырудың тиімді құралы ретінде қарастырылуы тиіс [5].

Жобалық оқытуда цифрлық технологияларды да қолдануға болатынын, Кондаков А.М. және Сергеев И.С. өз зерттеулерінде көрсеткен. Мақалада білім беру саласында цифрлық технологияларды қолдану арқылы жүйелі модернизация қажеттілігі көрсетіледі, оның

ішінде жобалық оқыту әдісі ерекше орын алады. Цифрлық ортада жобалық әдістемені енгізу білім алушылардың жеке тұлғаны дамытуға, әлеуметтік-педагогикалық өзін-өзі анықтауға және кәсіби біліктілікті арттыруға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл білім беруді жеке бағытталған, желілік, конвергентті ортаға айналдыра отырып, дәстүрлі және қосымша білім кеңістіктерін біріктіреді. Нәтижесінде, оқыту процесінің тиімділігі артып, цифрлық экономика талаптарына сай жаңа дағдылар дамытылады, ал педагогтар мен білім алушылардың рөлдері инновациялық трансформацияға ұшырайды. [6]

Жобаға негізделген оқыту (PBL) – «білім алушылардың дербестігімен, сындарлы ізденістерімен, мақсат қоюымен, ынтымақтастықпен, қарым-қатынаспен және нақты әлемдік тәжірибедегі рефлексиясымен сипатталатын оқытудың белсенді, білім алушыға бағытталған түрі» ретінде сипатталған сұрауға негізделген тәсілдің түрі [7,8]. Ол білім алушылардың өзіндік жеке деңгейінде дамып, өз білімін әртүрлі тәсілдермен көрсетуге мүмкіндік береді [9].

Оқыту ғылымдарынан бастау алатын жобалық оқыту (PBL) білім алушыға бағытталған, оқыту тәсілдерін алға жылжытатын және құзыреттіліктерді дамытуды мақсат ұстаған прогрессивті білім беру қозғалысымен сабақтас тәсіл [10]. Бұл тұрғыда мәселені шешу мен ақпараттық сауаттылық сияқты когнитивтік қабілеттер, дербестік пен табандылық секілді тұлға ішілік құзыреттіліктер, сондай-ақ қарым-қатынас пен ынтымақтастық дағдылары сияқты тұлға аралық құзыреттілік маңызды орын алды [11]. Крайчик пен Шин ұсынған PBL нұсқасында алты негізгі белгі атап көрсетіледі: бағдарлаушы сұрақтарды қолдану; оқу мақсаттарына жүйелі бағдар ұстау; ғылыми тәжірибелер мен зерттеу практикаларына сүйену; бірлескен іс-әрекет арқылы жұмыс істеу; оқыту технологияларды іске қосу және жобаның нәтижесіне қол жеткізу. Мұндай тәсіл кәсіби ортада да мәні бар, «нақты» мәселелерді шешуге болғандықтан, шынайы мәселелерді еңсеруге мүмкіндік береді. PBL-дің негізгі тұжырымдары білім алушылардың мазмұнын терең түсінуіне, белсенді білімді құруына және әлеуметтік өзара әрекеттесу арқылы тиімді ортақ үйренуіне жағдай жасап, нақты контекстінде жүзеге асады [12,17-19].

Жоба әдетте жетекші сұрақтан басталады: студенттер шешімін табуға қызықты әрі интеллектуалдық тұрғыдан күрделі мәселені тандайды [13]. Бұл сұрақ бір мезгілде зерттелетін құбылыстарды түсіндіруге контекст береді және бүкіл жоба бойына оқу әрекетін бағыттайды [12].

Сонымен қатар, жобаның оқу мақсаттары оқу бағдарламасының мақсаттарымен үйлесуі, ал мазмұнның негізгі идеялары педагогикалық тұрғыдан айқындалып, өзара байланыстыруы тиіс. Ғылыми тәжірибе табиғат құбылыстарын тануда қолданылатын әрекеттер жиындығын қамтиды: зерттеу сұрақтарын қою, экспериментті жоспарлап жүргізу, деректерді жинау және өңдеу, модельдерді құрастыру және қолдану, қорытынды жасап, нәтижелерді бағамдау сияқты қадамдарды қамтиды [12]. Білім алушылар бұл әрекеттерді шынайы зерттеуінің құрамдас бөлігі ретінде жүйелі түрде орындайды.

Эмпирикалық деректер шағын топтардағы бірлескен жұмыс білім алушылардың оқу үдерісін жақсартуға елеулі мүмкіндік беретінін көрсетеді [14]. Осы зерттеуде біз Рошель мен Тисли ұсынған анықтамаға сүйенеміз: ынтымақтастық – мәселені бірлесе түсінуді өзара дамытуға бағытталған үздіксіз күш-жігер нәтижесінде жүзеге асатын әрекет ретінде сипаттайды [15]. Мұнда өзара тәуелділік ерекше мәнге ие: әр топ мүшесінің әрекеті басқа топ мүшелердің әрекеттерімен тікелей байланысып, соған тәуелді болады. PBL жағдайында мұндай ынтымақтастық мәселені шешу үдерісіндегі сарапшылардың әлеуметтік өзара әрекеттесу логикасына жақын [12]. Сонымен бірге бірлескен ізденіс әрдайым жеңіл бола бермейтіндіктен, оқу үдерісін оңтайландыру үшін қолдану қажет болуы ықтимал; бұл көбіне мұғалімнің жанама көмегі арқылы іске асады [16].

Зерттеу әдісі

Жұмыста сипатталатын тәжірибе жалпы білім беретін мектептің жоғары сыныптарында (11-сынып) физика сабағы аясында жүргізілді және мақсаты бойынша білім алушылардың тақырыпқа қызығушылығын арттырумен қатар, функционалдық сауаттылықты дамытуға бағытталады. Сонымен бірге бұл тәжірибе университетте педагогикалық бағытта білім алып жатқан студенттерге (болашақ физика пәні мұғалімдеріне) арналған әдістемелік үлгі-кейс ретінде қарастырылады: мектеп жағдайында PBL қағидаттарын қолдану, зерттеу әрекеттерін ұйымдастыру және мұғалімнің фасилитациялық қолдауының рөлін көрсету үшін енгізілді.

Зерттеу тақырыбы оқу бағдарламасына сай таңдалынып алынды. Оқу мақсаты мен білім беру мақсаттары ескерілді. Судың бетінде механикалық толқындардың интерференциясын зерттеу аясында теориялық және эксперименттік әдістер қатар қолданылды. Теориялық әдістерге осы тақырып бойынша бар ғылыми еңбектер мен білім беру модельдерін талдау, сондай-ақ

механикалық толқындар мен олардың интерференция қағидалары жөніндегі білімді жүйелеу кірді. Теориялық дайындықтың маңызды кезеңі әртүрлі ортадағы (мысалы, суда) интерференция құбылыстарын сипаттайтын зерттеулерді қарастыру және осы принциптерді білім берудің цифрлық трансформациясы жағдайында жобалық оқыту үдерісіне (PBL) кіріктіру жолдарын анықтау болды.

Жұмыстың тәжірибелік бөлігі судың бетінде толқындардың интерференциясын бақылауға

Нәтижелер мен талқылау

Теориялық алғышарттарға сүйене отырып, жобаның мақсаты – әртүрлі көздермен шығатын екі толқынның өзара әрекеттеуі кезінде судың бетінде пайда болатын механикалық толқындардың интерференция заңдылықтарын зерттеу болды. Жұмыс жобалық оқыту форматы негізінде ұйымдастырылды, бұл білім алушыларға интерференция құбылысының теориялық мазмұнын түсініп қана қоймай, оны тәжірибе жүзінде тексеруге мүмкіндік берді. Жоба барысында білім алушылар төмендегі кезеңдерді жүзеге асырды:

- **Гипотеза ұсыну:** толқынның амплитудасы мен жиілігі өзгергенде интерференциялық көріністің қалай түрленетінін болжап, бастапқы жорамалдарын тұжырымдады.
- **Эксперименттік қондырғы жинақтау:** екі толқын генераторын пайдаланып, әртүрлі интерференция түрлерін бақылауға мүмкіндік беретін тәжірибе жағдайын ұйымдастырды.
- **Тәжірибені орындау:** толқын параметрлерін өзгерте отырып, су бетінде пайда болатын өзгерістерді бақылап, нәтижелерін тіркеді.
- **Деректерді талдау:** интерференцияның түйіндері мен шоқтарының орналасуы, олардың амплитуда мен жиілікке тәуелділігі бойынша деректер жиналып талданды.
- **Нәтижелерді рәсімдеу:** білім алушылар интерференциялық көріністердің әртүрлі жағдайларда қалай өзгеретінін көрсететін графиктер мен сызбалар әзірледі.

Тәжірибе қорытындылары су бетінде пайда болатын механикалық толқындардың интерференциясы белгілі заңдылықтарға бағынатынын дәлелдеді. Аталған заңдылықтардың көрінісі толқынның жиілігіне, амплитудасына және көздер арасындағы қашықтыққа тәуелді екені анықталды. Амплитуда ұлғайған сайын интерференциялық суреттегі түйіндер мен шоқтар айқынырақ байқалып, бұл теориялық модельдердің дұрыстығын растады.

арналған эксперименттік қондырғыны жасауды қамтыды. Бұл мақсатта су бетінің әртүрлі нүктелеріне орналастырылған екі механикалық толқын генераторы пайдаланылды. Мұндай тәсіл конструктивті және деструктивті интерференцияның әртүрлі үлгілерін алуға мүмкіндік берді. Эксперимент нәтижелері бейнежазба және одан кейінгі талдау арқылы, сондай-ақ интерференциялық суреттерді графикалық түрде бейнелеу арқылы тіркелді.

Жиілік өзгерген кезде түйіндер мен шоқтардың кеңістікте орналасуы да сәйкесінше жылжып, нәтижелер теориялық есептеулермен үйлесті.

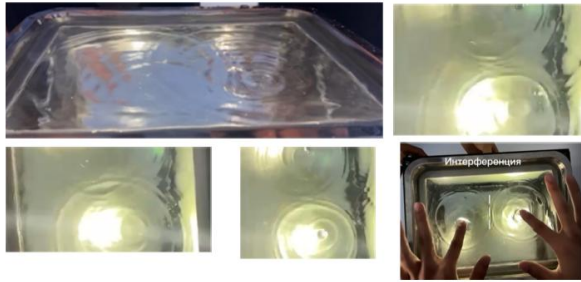
Бұдан бөлек, жобаға негізделген оқыту (PBL) студенттердің деректерді жинақтау және сараптау, гипотеза құрастыру, сондай-ақ алынған нәтижелерді сын тұрғысынан бағамдау сияқты ғылыми-зерттеу дағдыларын нәтижелі дамытатыны байқалды. Үдеріс барысында студенттер өзара белсенді ынтымақтастық орнатып, идеяларымен және тәжірибесімен бөлісті, бұл құбылысты тереңірек түсінуге әрі цифрлық трансформация жағдайында қажет құзыреттіліктердің қалыптасуына оңтайлы әсер етті.



1-сурет – Сабақта тәжірибе жасау барысы.

Осылайша, су бетіндегі механикалық толқындық кедергілерді зерттеу теориялық модельдерді растап қана қоймай, сонымен қатар студенттерге оқу процесіне белсенді қатысуға,

танымдық және тұлға аралық дағдыларды дамытуға мүмкіндік беретін физиканы оқытудағы жобалық әдістің маңыздылығын көрсетті.



2-сурет – Су бетіндегі механикалық толқын

Сауалнама негізінде су бетіндегі механикалық толқындардың интерференциясын зерттеу аясында жобалық оқытудың (PBL) тиімділігін бағалауға көмектесетін бірнеше негізгі нәтижелер мен қорытындыларды анықтауға болады.

1. Теориялық бөлім: Жобаны аяқтағаннан кейін студенттердің басым бөлігі механикалық кедергі ұғымын толық меңгергенін көрсетті. Олар теориялық түсінігінің, әсіресе кедергінің пайда болу жағдайларын талдауда, жақсарғанын атап өтті. Кейбір қатысушылар қосымша нақтылау қажет ететін тұстар барын айтқанымен, көпшілігі кедергінің негізгі қағидалары мен механизмдерін сенімді түсіндіре алды.

2. Практикалық бөлім: Су бетіндегі толқындық кедергілерді зерттеуге арналған қондырғыны орнатуға қатысты тапсырмалар кейбір білім алушылар үшін күрделі болғанымен, қатысушылардың көбі оларды сәтті орындады. Орындау кезіндегі қиындықтар негізінен тәжірибелік дәлдікті сақтау және толқынның амплитудасы мен жиілігі сияқты параметрлерді бақылаумен байланысты екені байқалды. Дегенмен, қатысушылардың 80%-дан астамы нәтижелерді бақылау және талдау үдерісі теорияны жақсырақ түсіну үшін пайдалы екенін атап өтті.

3. Графикалық бейнелеу: Нәтижелерді графикалық түрде ұсыну тапсырмасы қатысушылар тарапынан салыстырмалы түрде жеңіл қабылданды. Қатысушылардың басым бөлігі түйіндер мен антитүйінділердің орнын дәл анықтап, деректерді дұрыс түсіндіру және құбылысты графикалық тәсілмен тиімді визуализациялау мүмкін екенін көрсетеді.

4. Жалпы нәтижелер: Білім алушылардың көпшілігі жобаның жоғары ғылыми құндылығын жоғары бағалады. Жобалық оқыту оларға теорияны жақсырақ түсінуге ғана емес, сонымен қатар физикалық құбылыстардың нақты әлемде

қолданылуын көруге мүмкіндік беретінін атап өтті. Студенттердің едәуір бөлігі сонымен қатар теорияны тәжірибеде қолдануға бағытталған жобалармен жұмысты жалғастыруға ниет білдірді. Кейбір қатысушылар теория мен практиканы кіріктіру пәнге деген уәжін күшейтіп, қызығушылығын арттырғанын атап өтті.

5. Ұсыныстар: Алдағы уақытта жобаның практикалық бөлігін күшейтіп, қондырғыны орнату кезеңіне көбірек назар аудару және нақтырақ нәтижеге жету үшін әртүрлі әдістерді қолдану ұсынылады. Сонымен қатар талқылауды жандандырып, теориялық қырларын тереңдетуге бағытталған қосымша сұрақтар әзірлеген орынды.

6. Оқушылардың дағдыларын дамыту: Сауалнамаға сәйкес, көптеген студенттер жобаға қатысу сыни тұрғыдан ойлау, проблеманы шешу және топта жұмыс істеу сияқты маңызды дағдыларды дамытуға көмектескенін атап өтті. Студенттерге ұжымдық идеялар мен тәжірибе алмасуға мүмкіндік беретін және нақты уақыт режимінде мәселелерді шешуге көмектесетін командада жұмыс істеу мүмкіндігі ерекше құнды болды. Ынтымақтастықтың бұл түрлері олардың қарым-қатынас және әлеуметтік дағдыларын жетілдірді және олардың өзіне деген сенімділігін арттырды.

7. Эксперимент жүргізудегі қиындықтар: Кейбір студенттер эксперименттік қондырғыны орнату және конфигурациялау кезінде қиындықтарға тап болды. Бұл мәселелер өлшеу дәлдігі, толқындардың амплитудасы мен жиілігін бақылау қиындықтары және графиктермен егжей-тегжейлі жұмыс істеу қажеттілігі сияқты тәжірибенің техникалық аспектілеріне қатысты болды. Болашақ зерттеулерде экспериментті орнату және өткізу бойынша егжей-тегжейлі нұсқаулар беру, сонымен қатар жабдықты пайдалануды үйретуге назар аудару маңызды.

8. Жобаның ғылыми маңыздылығы: Білім алушылардың жауаптары зерттелетін құбылыстың жоғары маңыздылығын және оның күнделікті өмірге, соның ішінде технология мен табиғат құбылыстарына әсерін мойындағанын көрсетеді. Студенттер теориялық білімнің нақты қолданыстарын көре алатын жобаның практикалық бөлігіне қатысты оң пікірлер алынды. Көбісі бұл тәсіл олардың физика туралы түсінігін едәуір жақсартып, ғылыми зерттеулердің маңыздылығын жақсырақ түсінуге көмектескенін атап өтті.

9. Жақсарту бойынша ұсыныстар: Жобаның сәтті болуына қарамастан, бірнеше аспектілер одан әрі нақтылауды қажет етеді. Мысалы, тәжірибелік бөлікке кететін уақытты көбейту

ұсынылды, өйткені кейбір Білім алушылар барлық эксперименттерді толық орындап үлгермеді. Сондай-ақ студенттерді эксперименттерге дайындауға көбірек уақыт бөлу және процесс кезінде қателерді мұқият талдау маңызды.

10. Алдағы зерттеудің перспективалары мен қызығушылығы: Білім алушылардың басым бөлігі механикалық толқындар мен

интерференция құбылысы бойынша зерттеуді әрі қарай жалғастыруға қызығушылық білдірді. Кейбір қатысушылар дыбыс толқындары немесе жарық толқындары сияқты өзге толқын түрлерін қолдана отырып тәжірибе жүргізуді ұсынды, бұл олардың білім көкжиегін кеңейтіп, меңгерген білімді қолданудың мүмкін бағыттарын әртараптандыруға ықпал етуі мүмкін.

Қорытынды

Жобалық оқыту мен қатар цифрлық технологияларға негізделген оқыту әдістерін қолдану барысында білім алушылардың физика пәніне деген ынтасын арттыру мақсатына жеткендей, тек пән бойынша теориялық деңгейде ғана емес, кәсіби бағытта тәжірибелік тұрғыдан да меңгеруіне мүмкіндік бергенін көрсетті. Мұндай тәсіл білім алушыларды зерттеушілік және сыни тұрғыда ойлауға баулып, болашақ кәсіби іс – әрекетке қажетті техникалық құзыреттерді дамытуға ықпал етеді.

Педагогикалық эксперименттің нәтижесін қарай отырып, физиканы жобалық форматта оқыту білім алушылар арасында қызығушылық оятқаны анық. Экспериментке қатысқан білім

алушылардың көп бөлігі жобалық оқыту үрдісі барысында өте белсенді қатысып, өз ойларымен ашық сұрақ барысында бөлісті. Топтың ішіндегі жұмысты бақылап қарағанда өз – ара келісіп топ басшысын тағайындап, сонымен қатар топ ішіндегі бірігіп атқаратын іс-әрекеттерін анықтап, бірден жұмысқа кірісулері бойларындағы жауапкершілік пен коммуникативтік қасиеттерін айқындады.

Алынған нәтижелер бойынша жобалық оқыту әдісі цифрлық трансформация жағдайында білім алушылардың техникалық және зерттеу құзыреттерін қалыптастырудың тиімді құралдары екенін көрсетті. Бұл тәсіл қатысушылардың танымдық белсенділігін арттырып физика пәнін кәсіби бағдар тұрғысынан оқытуға жаңа сапа береді.

Әдебиеттер References

- 1 D. Kokotsaki, V. Menzies, & A. Wiggins. Project-based learning: A review of the literature. *Improving Schools*, **19**(3), 267–277 (2016). <https://doi.org/10.1177/1365480216659733>
- 2 S. Bell, Project-based learning for the 21st century: Skills for the future. *The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas*, **83**(2), 39–43 (2010). <https://doi.org/10.1080/00098650903505415>
- 3 А. Хакимов. А. Маматохунов Организация проекта на основе изучения физики на основе творческих подходов, *Вестник Иссык-Кульского университета* **62**, 121-128 (2025). [*A. Khakimov. A. Mamatokhunov. Organization of a project based on the study of physics using creative approaches. Bulletin of Issyk-Kul University* **62**, 121-128 (2025). (in Russ.)]
- 4 Ogi Danika Pranata, Putri Dwi Sundari, Dady Sulaiman. Exploring Project-Based Learning: Physics E-Posters in Pre-Service Science Education. *Jurnal fisika dan pendidikan fisika*, **8**(2), 2460-9129 (2023). <http://jurnalkonstan.ac.id/index.php/jurnal>
- 5 E.E. Virtue, B.N. Hinnant-Crawford, We're doing things that are meaningful: Student Perspectives of Project-based Learning Across the Disciplines, *The Interdisciplinary Journal of Problem-based Learning* **13**(2), 9-27 (2019). <https://doi.org/10.7771/1541-5015.1809>
- 6 А.М. Кондаков, И.С. Сергеев, Методология проектирования общего образования в контексте цифровой трансформации, *Научные сообщения* **15.01**, 5-24 (2020). [*A.M. Kondakov, I.S. Sergeev, Methodology for designing general education in the context of digital transformation, Scientific communications* **15.01**, 5-24 (2020). (in Russ.)]
- 7 T. Makkonen, K. Tirri, and J. Lavonen, Engagement in Learning Physics Through Project- Based Learning: A Case Study of Gifted Finnish Upper- Secondary-Level Students, *Journal of Advanced Academics* **32**(4) (2021) <https://doi.org/10.1177/1932202X211018644>
- 8 D. Kokotsaki, V. Menzies, & A. Wiggins, Project-based learning: A review of the literature, *Improving Schools*, **19**(3), 267–277 (2016). <https://doi.org/10.1177/1365480216659733>
- 9 S. Bell, Project-based learning for the 21st century: Skills for the future. *The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas*, **83**(2), 39–43 (2010).. <https://doi.org/10.1080/00098650903505415>
- 10 J.S. Krajcik, & Shin, N. Project-based learning. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (2nd ed., pp. 275–297). (Cambridge University Press, 2014). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.018>

- 11 J.W. Pellegrino, & M.L. Hilton, (Eds.). Education for life and work: Developing trans-ferable knowledge and skills in the 21st century. National Research Council, Committee on Defining Deeper Learning and 21st Century Skills. The National Academies Press. (2012). [https:// www.nap.edu/read/13398/chapter/1](https://www.nap.edu/read/13398/chapter/1)
- 12 J.S., Krajcik, & N. Shin, Project-based learning. In R. K. Sawyer (Ed.), The Cambridge handbook of the learning sciences (2nd ed., pp. 275–297). Cambridge University Press. (2014). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.018>
- 13 A. Hasni, F. Bousadra, V. Belletête, A. Benabdallah, M.-C. Nicole, & Dumais, N. Trends in research on project-based science and technology teaching and learning at K–12 levels: A systematic review, Studies in Science Education, **52**(2), 199–231 (2016). <https://doi.org/10.1080/03057267.2016.1226573>
- 14 N.M. Webb, Information processing approaches to collaborative learning. In C. E. Hmelo-Silver, C. A. Chinn, C. K. K. Chan, & A. M. O'Donnell (Eds.), The inter- national handbook of collaborative learning (pp. 19–40). Routledge. (2013). <https://doi.org/10.4324/9780203837290.ch1>
- 15 J. Roschelle, & S.D. Teasley, The construction of shared knowledge in collaborative problem solving. In C. O'Malley (Ed.), Computer supported collaborative learning (Springer, 1995), pp. 69–97. https://doi.org/10.1007/978-3-642-85098-1_5
- 16 E. Kuusisto, & K. Tirri, Disagreements in working as a team: A case study of gifted science students. Revista de Educación **368**, 250–272 (2015). <https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2015-368-287>
- 17 И.Е. Аубакир, Проектно-ориентированный подход к изучению интерференции волн в школьной физике, World science: problems and innovations, 150–155 (2025). [*I.E. Aubakir, Project-oriented approach to the study of wave interference in school physics, World science: problems and innovations, 150–155 (2025). (in Russ)*]
- 18 Ж.К. Абельдина, Ж.К. Молдумарова, Ж.Е. Молдумарова, Р.К. Абельдина Виртуализация образовательного пространства как один из подходов интенсификации учебного процесса, Вестник КазНУ, серия физическая **3**(66) 105–115 (2018). [*J.K. Abeldina, J.K. Moldumarov, J.E. Moldumarov, R.K. Abeldina Virtualization of educational space as one of the approaches to intensifying the educational process, Recent Contributions to Physics 3(66) 105–115 (2018). (in Russ)*] <https://bph.kaznu.kz/index.php/zhuzhu/article/view/664>
- 19 Г.Л. Габдуллина, А.Т. Габдуллина, Д.А. Хожаев, А.Қ. Муханова, Использование интерактивных методов в обучении физики, Вестник КазНУ, серия физическая **1**, 106–111 (2018). [*Gabdullina, G., Gabdullina, A., Khodzhaev, D., & Mukhanova A. (2018). Using interactive methods in training physics. Recent Contributions to Physics, 2018(1), 106–111 (in Russ)*] <https://bph.kaznu.kz/index.php/zhuzhu/article/view/628>

Мақала тарихы:

Түсті – 12.10.2025

Түзетілген түрде түсті – 20.11.2025

Қабылданды – 15.12.2025

Article history:

Received 12 October 2025

Received in revised form 20 November 2025

Accepted 15 December 2025

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Әлия Мырзағалиева** – физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент-зерттеуші, теориялық және ядролық физика кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: altair.73@mail.ru

2. **Гита Ревалде** –Dd.Phys., профессор, Рига техникалық университеті, Техникалық физика институты, Рига, Латвия; e-mail: Gitar@latnet.lv

3. **Ізгіжан Әубәкір**, (автор-корреспондент) – PhD докторант, 2 курс, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; e-mail: izgizhan.erkimbekqyzy@gmail.com

Information about authors:

1. **Aliya Murzagalieva**, Associate Professor-Researcher, Department of Theoretical and Nuclear Physics, al-Farabi Kazakh National University (KazNU), Almaty, Kazakhstan; e-mail: altair.73@mail.ru

2. **Gita Revalde**, Dd.Phys., Professor, Institute of Technical Physics, Riga Technical University, Riga, Latvia; e-mail: Gitar@latnet.lv

3. **Izgizhan Aubakir**, (corresponding author) 2nd-year PhD student, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: izgizhan.erkimbekqyzy@gmail.com

Г.Ш. Яр-Мұхамедова¹ , Қ.М. Мұқашев^{1*} ,
Л.А. Габдрахманова² , Ф.Ф. Умаров³ 

¹Әл Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Башкортстан мемлекеттік ғылым-технология университеті, Уфа, Ресей

³Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

ЯДРОЛЫҚ БӨЛШЕК ПЕН АНТИБӨЛШЕКТІҢ ФИЗИКАСЫ МЕН МЕТАФИЗИКАСЫ

Мақала позитрон мен электронды негізгі зерттеу нысандары ретінде қолдану арқылы бөлшек пен антибөлшектің кристалдық тор ішінде өзара әрекеттесу механизмі позитронның метафизикалық күйден физикалық күйге, физикалық күйден техникалық физика күйіне түрлену мүмкіндігінің моделін құрып, эксперимент нәтижелерін талдауға арналған. Лептондар тобына жататын аталмыш екі бөлшектің арасында әлсіз немесе электромагниттік әсерлесу орын алуы ықтимал. Әлсіз әсерлесу жақын аралықта байқалса, электромагниттік әсерлесу алыс қашықтықта орын алатын құбылысқа жатады. Егер табиғаты әртүрлі, зарядтарының таңбасы қарама-қарсы осындай бөлшектер кристал денелерде бір мезгілде туындайтын болса, олардың арасында тартылыс орнау үшін осы екі әсерлесудің де қатар орын алуы заңды процес. Солай бола тұра, бұл әсерлесулердің механизмі мен табиғаты осы уақытқа дейін толық ашылды деуге ешбір негіз жоқ. Соған байланысты, электрондар мен позитрондарды ұялы құрылымға топтастырылған, өзінің физикалық күйін өзгерту нәтижесінде біреуі қарсы жақтың шығаратын толқынды өрісін сезу арқылы қабылдайтын фемто- немесе актоөлшемді «*позитрониттер*» мен «*электрониттерден*» тұратын бөлшектерге жіктелетін гипотетикалық моделі ұсынылады. Осы модель негізінде қатты денелердің құрылымдық қасиеттерін зерттеуге мүмкіншілік беретін ақаулардың позитрондарды қармау моделі талданады.

Түйін сөздер: физика, метафизика, бөлшек, антибөлшек, аннигиляция, әрекеттесу моделі, қармау моделі, металдар, құрылымдық ақаулар.

G.Sh. Yar-Mukhamedova¹, K.M. Mukashev^{1*}, L.A. Gabdrakhmanova², F.F. Umarov³

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Bashkortostan State University of Science and Technology, Ufa, Russia

³Kazakhstan-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

Physics and metaphysics of nuclear particles and antiparticles

The paper describes a hypothetical model of the interaction of particles and antiparticles using the example of a positron and an electron by assuming a change in their state of physical without involving theoretical calculations, which most often represent fitting data to the desired results. Since these two particles belong to the class of leptons, both weak and electromagnetic interactions are possible between them. Weak interactions by the nature of the manifestation are short-range, and electromagnetic interactions are long-range. In a solid between differently charged particles, both of these interactions can exist simultaneously to ensure their mutual attraction. But the nature and mechanism of these interactions has still not been clarified to the end. In this regard, a hypothetical model of the honeycomb structure of the positron and electron is woven from even smaller - femto- or atto-sized particles in the form of «positronites» and «electronities» that perceive radiation from the opposite side by changing their state of aggregation. Subsequently, this model develops into a model of the capture of positrons by defects in the crystal structure of solids.

Keywords: physics, metaphysics, particle, antiparticle, annihilation, hypothesis of interaction, capture model, structural behavior.

Г.Ш. Яр-Мухамедова¹, К.М. Мукашев^{1*}, Л.А. Габдрахманова², Ф.Ф. Умаров³

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Башкортостанский государственный научно-технический университет, Уфа, Россия

³Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

Физика и метафизика ядерных частиц и античастиц

В работе описывается гипотетическая модель взаимодействия частиц и античастиц на примере позитрона и электрона посредством допущения изменения их физического состояния без привлечения теоретических расчетов, которые чаще всего представляют собой подгонку данных под желаемые результаты. Поскольку эти две частицы относятся к классу лептонов, между ними возможны как слабые, так и электромагнитные взаимодействия. Слабые взаимодействия по характеру проявления являются близкодействующими, а электромагнитные – дальнодействующими. В твердом теле между разнородно заряженными частицами могут существовать оба эти взаимодействия одновременно, чтобы обеспечить их взаимное притяжение. Но природа и механизм этих взаимодействий до сих пор оставалась не выясненной до конца. В связи с этим предлагается гипотетическая модель сотовой структуры позитрона и электрона, сотканными из еще более мелких – фемто- или акторазмерных частиц в виде «позитронитов» и «электронитов», которые воспринимают излучения противоположной стороны посредством изменения своего агрегатного состояния. В дальнейшем данная модель развивается в модель захвата позитронов дефектами кристаллической структуры твердых тел применительно к изучению радиационной повреждаемости конструкционных металлов.

Ключевые слова: частицы, античастицы, аннигиляция, модель взаимодействия, модель захвата, металлы, структурные нарушения

Кіріспе

Ұғым мағынасының жоғалуы (өзгеруі). Элементар электр заряды – табиғатта кездесетін, ұзақ мерзімді еркін электр зарядының мейлінше кіші үлесін анықтаушы іргелі физикалық тұрақты шама. Негізгі өлшем бірліктер жүйесінің (СИ) анықтауы бойынша элементар заряд $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ Кл [1]. «Заряд» сөзінің ішкі мағынасы пайдалану контексіне байланысты өзгеріп отыруы жиі кездеседі. Физика ғылымына жаңа атау ретінде қосылған ағылшын тіліндегі charge сөзінің алғашқы мағынасы заң ғылымы саласында «айыптау» мағынасында қолданылатын. Ақиқатына келсек, шын мәнінде электр заряды материяның өрістік табиғатының

айыпкері саналады. Зарядтың алғашқы мағынасының жоғалуы электронның өлшенетін көрсеткіштерін сипаттаған кезде заряд атауының мағынасын - зарядталған бөлшек атауынан, бөлшек атауының толқыннан айырмашылығын ажырата алмауда болып отыр. Осы тұста белгілі ғалым Брэггтың жарық сәулесі туралы айтқан мысқылын келтіру артық болмас: жарық сәулесі дүйсенбі, сәрсенбі және жұма күндері өзін толқын түрінде танытса, сейсенбі, бейсенбі және сенбі күндері бөлшек түрінде көрінеді, ал жексенбі күндері ешнәрсеге ұқсамас болар. Бұның сыртында «h» символымен белгіленген, мағынасы осы күнге дейін белгііз шаманы қайда қоясың? [2].

Электр зарядының квантталуы

Эксперимент кезінде өлшенетін электр заряды әрқашан бірлік элементар зарядынан бүтін

санды есе артық болып келеді. Тұңғыш рет элементар зарядтың шамасын 1910 ж.

эксперимент арқылы Милликен өлшеген еді. Табиғатта кездесетін электр зарядының элементар зарядтың бүтін санымен анықталуын *электр зарядының квантталуы* деп атауға болады. Заряд динамикалық айнымалы көрсеткіш емес, сыртқы көрсеткіш болғандықтан, классикалық электр динамикада зарядтың квантталу себебін анықтауға арналған ешбір талдау жүргізілмейді. Зарядтың міндетті түрде не себебті квантталуға тиісті екенін анықтауға арналған қанағаттанарлық жауап әзірге табылмағанмен, бір шама көңіл аударарлық мағлұматтар туындауда. Соның бірі – элементар бөлшектердің қазіргі заман физикасы шеңберінде шешуі табылып отырған жаңа моделдердің ашылуы және соған сәйкес бүгінгі күнге дейін белгілі болып келген іргелі бөлшектердің өзі олардан да іргелі жаңа бөлшектерден құралған құрама туынды болуы ықтимал деген көзқарастың қалыптасуы. Ендеше мұндай жағдайда зарядтың квантталу процесі бөлшектің екінші реттік іргелі бөлшектерден құралуы нәтижесінде қалыптасатын туынды болғандықтан, ерекше танданарлық құбылыс санала бермейді. Бірақ бір ойланатын мәселе – екінші реттік іргелі бөлшектердің заряды қалай қалыптасады? – деген сұрақ.

Соңғы мәселе туралы әзірге ойға қонатын бір ғана жаңа пікірдің болуы – кварк-глюондардың ашылуы. Нәтижесінде атомдық элементар бөлшектер бүтін бірліктен кем, ондық бөлшек

шамасындағы электр зарядына, мысалы, элементар зарядтың $\pm\frac{1}{3}$, немесе $\pm\frac{2}{3}$ бөлігіне ие болуы мүмкіндігін дәлелдейді. Осы бағыттағы зерттеу нәтижелері ондық бөлшек шамасындағы зарядты *конфайнменттер* деп аталатын, өзара байланысқан құрама бөлшектер иеленуі мүмкін деген көзқарасты құптайды. Еркін қозғалыстағы күйде болуы мүмкін сондай атомдық бөлшектер екі кварктан (мезондар), үш кварктан (бозондар), төрт кварктан (тетракварк) және бес кварктан (пентакварк) тұруы ықтимал. Яғни, бүгінгі күнге белгілі барлық еркін, тұрақты және орнықты атомдық бөлшектердің заряды элементар бірлік зарядтан бірнеше есе артық болуы мүмкін. Осы тұжырымнан тысқары тұратын бір ғана бөлшек бар – t-кварк. Тікелей өлшеулер нәтижесінде анықталған t-кварктың заряды $+\frac{2}{3}e$ [3]. Электр заряды ондық бөлшек шамасындағы еркін атомдық бөлшектер әзірге нақты табыла қойған жоқ, бірақ іздеу жұмыстары да тоқтамақ емес. Өйткені атомдық квази- бөлшектердің зарядының ондық бөлшек шамасында болуы туралы ғылыми көзқарас өзінің тағынан тайған жоқ. Оған нақты дәлел ретінде бөлшек түріндегі кванттық Холл эффектін тудызушы агентке атомдық квазибөлшектердің жауапты екені күмәнсыз анықталғандығын айтуға болады. Осындай кеңінен берілген түсініктерден кейін мақалаға арқау болған мәселеге ауысуға болады.

Ядролық бөлшектердің физикасы мен метафизикасы

Әрине, бұл жерде физика мен метафизика саласының әдістемелік тұрғыдан немен айналысатынын баяндау арқылы олардың арасындағы ерекшеліктер туралы мәселе қарастырылады. Сол арқылы атомдық бөлшек пен атомдық антибөлшекке ауысуға жол ашылады. Физика ғылымы әдістемелерінің қағидалары табиғатта кездесетін немесе адамзаттың араласуы нәтижесінде құрылған, көзге көрінетін немесе сезінетін құбылыстарды саралауға арналады. Мысалы, көзге көрінетін оптикалық диапазондағы жарық сәулесі, көзге көрінбейтін, бірақ сезінетін инфра қызыл және ультракүлгін толқындар, дыбыс толқындары және т.б.

Метафизика саласының әдістемелік қағидалары қоршаған орта туралы мағлұматты ақылға салып, оймен болжау арқылы пайымдауға болатын құбылыстарды саралауға арналады. Бұрын – сонды орын алмаған құбылысты түсініп танығанша, немесе эксперимент нәтижесімен саралау арқылы дәлелденгенше, процес қабылдаудың метафизикалық категориясына

жатады, яғни метафизика табиғаты белгісіз, танып білуі әзірге мүмкін емес құбылыстар мен процестерді зерттеумен шұғылданады. Құбылыстың, физикалық эффектін қасиеттері мен қағидалары толық анықталып, немесе эксперимент арқылы дәлелденіп, табиғаты белгілі болғаннан кейін метафизикалық категория физикалық категорияға, артынан техникалық физикаға айналып, өмірге жолдама алады. Ұзаққа созылған сондай құбылысқа атомдық бөлшек – электрон мен атомдық антибөлшек-позитрон арасындағы процестерді жатқызуға болады.

Электронның ашылуы катодтық сәулелерді зерттеумен шұғылданған Джозеф Томсонның еңбектерінің нәтижесі саналады (1897 ж.). Сол үшін Дж. Томсонға Нобель сыйлығы тапсырылады. Егер Томас Альва Эдисонға табиғатынан шыдамдылық пен төзімділік және абстракты түрде ойлау қабілеті молырақ берілгенде, электронның ашылуы 1897 ж. орын алар еді. Позитрон, атомдық бөлшектердің бірі бола тұрып, оның құрамына кірмейді. Сондықтан

позитронның алдымен 1928 ж. Поль Дирактың теориялық еңбектерінің нәтижесі ретінде, электронның антибөлшегі аталып болжануы заңды процес.

Позитронның табиғатта кездесуі толық мүмкін екендігін 1932 ж. Вильсон камерасын пайдаланып, ғарыш сәулелерімен эксперимент жүргізген Карл Андерсон дәлелдеп береді. Бірақ атомдық бөлшек пен атомдық антибөлшек заңды түрде ашылғанға дейін де, және ашылғаннан кейін де, ұзақ жылдар метафизика категориясына қарасты материалдық субстанция болып қала берді. Физика категориясына өту үшін екі атомдық бөлшектерді сипаттаушы негізгі физикалық көрсеткіштері толық зерделеніп, бөлшек пен антибөлшек арасында орын алуы мүмкін екеуара (өзара) әсерлесудің салдары белгілі болуы керек еді. Бөлшектерді даралап өндіру әдістері шешілгеннен кейін, олардың өзара әрекеттесуін эксперимент жүзінде тексеру және конденсірлі күйдегі материалдардың құрылымын зерттеу мүмкіндігі анықталғаннан кейін, XX – ғасырдың екінші жартынан бастап позитронға метафизика категориясынан шығып, техникалық физика категориясына ауысуға мүмкіндік туды.

Мәселе заряд пен зарядталған атомдық бөлшектер жайында болғандықтан, олардың өзара әрекеттесуі туралы қазіргі кезеңдегі ғылыми көзқарастың пікірін айтпай кетуге

Шетсіз-шексіз әлем

Өрістің қазіргі кезеңдегі кванттық теориясы Ньютон механикасын, кванттық механиканы және салыстырмалылықтың арнайы теориясын қамтиды. Осы теорияның әдістемелері негізінде материалдық денелердің әрекеттесуінің барлық түрлерін сипаттаушы теңдеулер құрылған. Солай десе де, бұл теңдеулердің күрделілігі соншалықты, олардың нақты және дәл шешімдерін іс жүзінде табу мүмкін емес. Қайта құру секілді көптеген амалдарға жүгіну арқылы күрделі теңдеулердің жуық шешімдерін пайдалануға болады. Бірақ бұл амалдар теориялық шешімдерді керекті нәтижелерге амалдап жеткізудің бір жолы саналады және Планктың дискреттілік заңдарына мүлдем қайшы келеді.

Әлем туралы қазіргі кезеңдегі көзқарастың қалыптасуы Галилео Галилейдің (1564-1642) еңбектерінің нәтижесі саналады. Галилейдің пікірінше ғылымның басты мақсаты - әрбір құбылыстың орын алу себебін анықтау, табиғатты танудың алғы шарты – бақылау, ғылымның негізгі тірегі - тәжірибеге сүйену, ал әлем – шексіз, материя-мәңгілік дүние [4]. Бүгінгі

болмас. Субатомдық бөлшектерде немесе еркін кеңістікте болсын, зарядтардың өзара әсерлесуінің түрі мен энергиясы оларды бір құрылымға біріктіруші өрістің метрикасына тікелей тәуелді. Ешбір зарядтың массасы, ішкі құрылымы және белгілі мөлшердегі өлшемдері болмайды. Себебі заряд өріспен бірге біткен, одан ажыратуға келмейтін құрылым түзуші субстанция саналады. Зарядты қашықтан әрекеттесуші, жеке-дара түріндегі еркін бөлшек деп те қарастыруға болмайды. Заряды бар бөлшектер өздері біте байланысқан өрістер желісінің қатысуымен жақын аралықта әрекеттесуге қатыса алады.

Кванттық физиканың постулаттарына сәйкес, фотон жарықтың таралу жылдамдығымен қозғалыста болатын бөлшек емес, өріс пен бөлшек арасында энергия алмасуын бағалаушы квант саналады. Сол секілді нейтрино да бөлшек емес, өрістік құрылымның кванты. Ал атомдық бөлшек - айналу энергиясы, магниттік моменты және тыныштық күйдегі массасы бар дербес өріс. Бөлшектің тыныштық күйдегі массасы - зарядтардың әрекеттесуі барысында туындайтын ішкі күштердің салдары. Бейтарап дененің оқшауланбаған сыртқы өріс кеңістігіндегі қозғалысын негізге алу нәтижесінде галактикалық гравитациялық тұрақты мен инерттілік табылды.

күнге дейін қалыптасқан көзқарасқа сәйкес, элементар бөлшектер – нүкте тектес, ішкі құрылымға жіктелмейтін материя саналады. Солай бола тұра, осы нүкте тектес қарапайым бөлшектің массасының, зарядының, спины мен магниттік моментының болуы атомды қалай шектеусіз дүние деп танысақ, электронды да сондай шектеусіз-шеттеусіз әлем деп тануды қажет етеді. Осы бөлшектер арасындағы байқалатын «*күшті*» және «*әлсіз*» әсерлесулер, немесе «*ядролық*» күштер туралы мәселелер көтерілгенде, олардың механикалық күштерге қатынасының бар-жоғы, болмаса табиғаты бізге беймәлім күштер болуы мүмкін бе?-деген, тіпті микроәлем мен макроәлем кеңістігінде табиғаты бір текті заңдылықтар орын алама? - деген жауабы жоқ сұрақтардың туындауы заңды процес. Деседе, табиғат - ана өзі туғызған, өзі дамытқан, өзі жетілдірген және бір-бірімен байланысқан, бірі екіншісіне тәуелді процестер мен құбылыстарды бір-бірінен ажыратып, өзгеше жаратуы ешбір мүмкін емес секілді. Мысалы, атомдық бөлшектерге тән, макроәлемде аналогы болуы мүмкін емес көрсеткіш – *спин* тек кванттық

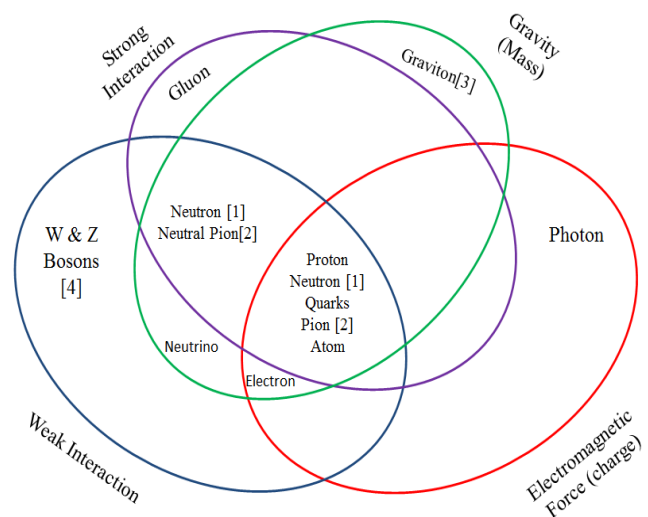
құбылыс саналады. Солай десек те, Жердің және басқа планеталардың меншікті остерінде айналуы нәтижесінде меншікті моментінің пайда болуын, соған байланысты тәуліктік уақыт аралығының туындауын қайда қоюға болады?

Табиғат заңдары энергияның, немесе нысандардың геометриялық кесінділеріне байланысты өзгеріске ұшырай бермейді. Айырмашылығы - көзге көрінген нысандардың кейбір қасиеттері немесе жеке параметрлері сол кесінділер мен үзілістер аралығында басқа аралықтар арасындағы аталмыш көрсеткіштерге қарағанда айқынырақ байқалуы мүмкін. Әзірге физика ғылымында микроәлемнің барлық тұстарын бірдей анық сипаттаушы модел жоқ десе болады. Мысалы, *масса, гравитация, микробөлшектің заряды, электр және магнит өрістері, микробөлшектің ішкі құрылымы мен олардың өзара әсерлесуі* секілді қарапайым физикалық ұғымдар туралы сұрақтарға жауап беру ерекше қиындық туғызары сөзсіз. Сондықтан табиғат – бірегей, табиғаттың сақталу заңдары микроәлем мен макроәлем үшін ортақ деп саналады. Мысалы, энергияның сақталу заңы - материяның мәңгі сақталуын, импульстың сақталу заңы - материяның мәңгі қозғалысын, ал импульс моментінің сақталу заңы материяның ішкі құрылымының мәңгі өзгеріссіз сақталуын дәлелдейді. Осы жұмысты жазу барысында авторлар жоғарыда аталған мәселелердің кейбіреуіне өзіндік моделді құру арқылы жауап беруге тырысты. Соның бірі - ядролық микро бөлшек - электрон мен антибөлшек - позитрон арасындағы әсерлесу процесін олардың ішкі құрылымдары туралы жаңа көзқарасты қалыптастыру арқылы бейнелеу.

Материалдық денелердің маңызы ерекше субстанцияларының қатарынан табылатын электрон мен позитронның өзара әсерлесуі туралы алғашқы мағлұматты алу үшін ядролық физика курсынан белгілі қағидаларға жүгінуге болады. Яғни, лептондар тобына жататын электрон мен позитрон өзара әлсіз әсерлесу арқылы қатынас жасай алады. Мұндай жағдайда зарядталған екі микро бөлшек арасындағы байланыс Кулон заңын негізге алу нәтижесінде сипатталады. Соған сәйкес, электрон мен позитрон арасындағы тартылыс күші олардың ара қашықтығының квадратына кері пропорционал, яғни зарядталған бөлшектер неғұрлым жақын орналасса, сол ғұрлым олар өзара үлкен күшпен әсерлесуге мәжбүр болады. Басқаша айтқанда, әлсіз әсерлесу процесінің заңдылықтары жақын аралықта орын алатын әсерлесу құбылысын сипаттаушылардың категориясына жатады. Сонымен қатар, зарядталған микро бөлшектер

арасында қашықтан әрекеттесу категориясына жататын электр магниттік әсерлесу заңдылықтарының орын алуын ешкім теріске жатқыза алмайды. Ендеше, табиғатта байқалатын әсерлесу процестерін сипаттаушы төрт іргелі заңдылықтардың екеуі аталмыш бөлшек пен антибөлшек арасында орын алатын барлық күйлерді сипаттауға толығымен жеткілікті (1-сурет).

Бірақ зарядталған бөлшектер арасында электр магниттік әсерлесудің бір ғана жолы бар – зарядталған бөлшек өзі айнаымалы электр магниттік толқын туғызуға тиісті. Тек осы толқын электрмагниттік әсерлесудің көзі бола алады. Әрине, қозғалыссыз, статикалық күйдегі зарядталған бөлшек толқын туғыза алмақ емес, электр өрісі орын алуы ықтимал, бірақ ол толқын бола алмайды. Мұндай жағдайда бөлшектер арасында ешқандай электрмагниттік әсерлесу де орын алмайды. Ендеше зарядталған бөлшектер арасында төрт әсерлесудің бір түрі – тек жақын аралықта байқалатын әлсіз әсерлесу ғана орын алатын болады. Бұлайша тұжырымдау сырт көзге Н. Бордың 1 - Постулатына қайшы келетіні сөзсіз: атомның тұйық кеңістігіндегі электрондық қабықшадағы үздіксіз қозғалыстағы электрон ешбір сәуле шығармайды, сондықтан ол ядроға құламайды.



1 - сурет. Төрт түрлі әсерлесуге мысал

Ал зарядталған бөлшектер арасындағы әсерлесуге байланысты физика мен метафизика қатты дене кристалдық торы кеңістігіндегі еркін электрондар мен позитрондарға байланысты туындап отыр. Олардың арасындағы әлсіз байланыс кристал ішінде жақын қашықтықта орындалуы мүмкін болғанымен, әсерлесудің

екінші түрі - электр магниттік байланыстың механизмі беймәлім болып қала беруде. Осындай себептерге байланысты, зарядтары қарама-қарсы ядролық бөлшектер бейтарап ортада, әртүрлі қашықтықта, кез-келген уақытта бірін-бірі «*қалай танып, әсерлесуге қатысады?*» - деген сұрақтың туындауы заңды процес. Бір ойланатын жағдай, Кулон осы құбылыс туралы «қандай пікірде болды екен?» деген мәселе априори ешқашан туындамаған секілді.

Нүктелік заряд өзінің айналасында электр статикалық өріс туғызатыны бұрыннан белгілі. Бірақ осы өрістің пайда болу механизмі, табиғаты туралы ешбір малұмат арнайы басылымдарда берілмейді. Мүмкін бұл өріс нүктелік зарядтан шығатын сәуле тектес толқынба? Егер толқын екені анық болса, оның табиғаты неде және неге бұл процес таусылмайды? Өйткені тоқын бар жерде энергияның шығыны бар екені ақиқат $\varepsilon = h\nu$? Мүмкін бұл процес зарядтардың өзіне ғана тән, күмәнсыз қабылдауды талап ететін құбылыс шығар? Мүмкін нүктелік зарядтың айналасындағы өріс оың физикалық қасиетінің немесе физикалық күйінің өзгеруінің салдары емеспе екен? Қандай жағдай орын алмасын, зарядталған бөлшек энергия шығынын үздіксіз толықтырып отыруға тиіс, бірақ ненің есебінен? Мүмкін қоршаған ортадан туындайтын энергия ағысын түрлендіру арқылы қабылдап қозуы мүмкінбе? Мүмкін болған жағдайда позитрон электронды (немесе электрон - позитронды) өзіне тарту арқылы байланысқан күйге көшу үшін олар әртүрлі физикалық күйде болуы қажетпе және ол қандай күйлер? Атомдық элементар бөлшектерге тек екі режим ғана тән процес: қозу режимі және орнықты күй. Егер позитрон қозу режимінде болса, электрон орнықты күйде қалуға тиіс және керісінше, электрон қозу режиміне көшсе, позитрон орнықты күйде қала тұруы міндет.

Қозу режиміндегі атомдық бөлшек орнықты күйге көшу үшін артық энергияны электр магнит толқын түрінде сыртқа шығаруға тиісті. Осы айнымалы өріс жарық жылдамдығымен тарау арқылы орнықты күйдегі атомдық бөлшекті қозу режиміне көшіреді. Бұл процес $dt = dr/c$, уақыт ішінде өтіп үлгереді. Мұндағы c – *жарық жылдамдығы*; dr – *екі атомдық бөлшектің ара қашықтығы*. Санаулы уақыт өтісімен атомдық бөлшектер бірін-бірі «*танып*», арадағы әрекеттесу амалы басталады. Егер бұған дейін бірі екіншісі туралы ешқандай «хабардар» болмаса, физикалық күйлері өзгеріске ұшырағаннан кейін позитрон да қоршаған ортасына бойындағы артық энергияны сыртқа шығаруға мәжбүр болады. Бұл процес позитрон тарапынан электронға көрсетілген реакция

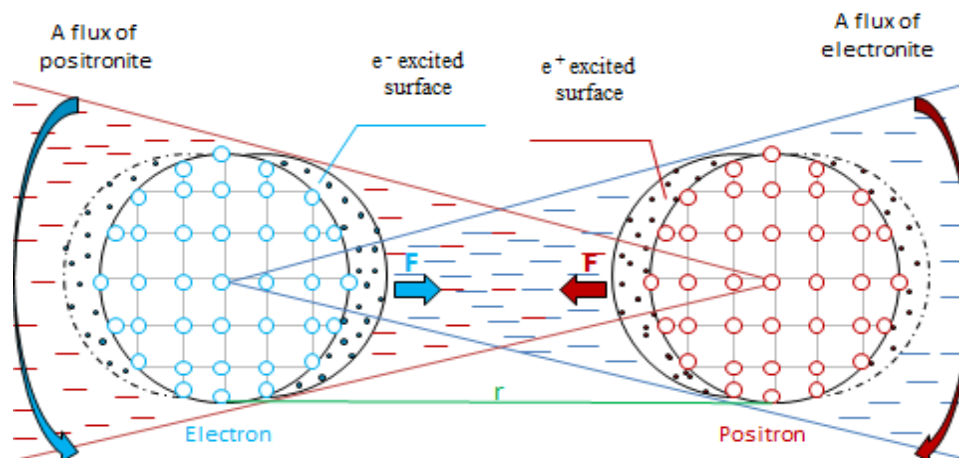
саналады. Бірақ позитрон электрон таратқан ағынды, электрон позитрон таратқан ағынды қабылдау үшін, олардың әрқайсысы қарсыласы таратқан энергетикалық ағынды ішкі құрылымы арқылы бойына сіңіріп, қарапайым тілмен айтқанда, бір шешімге келулері керек.

Сол үшін әрбір атомдық бөлшектің әсер етуші энергия ағынын қабылдайтындай элементтерінің болуы қажет, мысалы, ұялы құрылымдардың нысандары тектес. Энергия ағыны атомдық бөлшектің қай тұсына әсер етсе, сол тұсының кеңістігі қозу амалына қатысып, қарсы жағы бұрынғы күйін сақтауы тиіс (2-сурет). Егер осы шартты ұғымды уақытша болса да қабылдайтын болсақ, зарядталған элементар бөлшек туралы бұрыннан қалыптасқан түсінік бойынша оны центрінде заряды бар шар тәрізді құрылым деп қабылдау теріске шығары анық. Іс жүзінде шексіз шағын көлемде бір нәрсенің шексіз жоғары концентрациясының орналасуы ешбір мүмкін емес. Заряд атомдық бөлшектің кеңістігінде тұрақты тығыздықпен таралуы тиіс. Мұндай жағдайда сол зарядты атомдық бөлшектің ішкі құрылымында қандай элемент тұрақты концентрациямен таратуға қабылетті, зарядталған атомдық бөлшектің өзіндік ішкі құрылымының болуы және заряд атомдық бөлшектен тыс жерде орналасуы мүмкінбе? – деген сұрақтардың туындауы заңды нәрсе.

Мұндай сұрақтардың жауабын табу үшін атомдық бөлшектер ұялы құрылымдарға жіктеледі және оларды түзу үшін акто немесе фемто өлшемді, бөлшектеуге келмейтін электрондарда *электрониттер*, позитрондарда – *позитрониттер* деп атауға тұрарлық квазібөлшектердің болуы ықтимал деген болжам кіргізуге болады. Егер осы болжамды мақұл деп қабылдасақ, атомдық бөлшектердің физикалқ күйінің өзгерісіне, яғни электрон мен позитронның қозуына жауапты элементтер ретінде қарсы жақтың әсер етуші ағынын қабылдаушы аталмыш квазібөлшектер деген тұжырымға тоқтау қажет. Бұл процестің салдары оң зарядты позитронның теріс зарядты электронмен әсерлесуі нәтижесінде өмір сүру мерзімі шектеулі, байланысқан *электрон-позитрон жұбы* деп аталатын үшінші квазібөлшек пайда болады. Бірінің сыртында екінші атомдық бөлшек үздіксіз айналуға болатын және орындаары кезекпен ауысып отыратын осы құрылым сутек атомы құрылымымен толық үйлесімдік танытады. Бірақ өмір сүру мерзімі аяқталысымен, атомдық бөлшектер электр магниттік толқындарға түрленіп, аннигиляциялық гамма-кванттарға айналады [5]. Электрон-позитрон жұбының өмір

сүру мерзімінің, аннигиляциялық фотондардың бұрыштық корреляциясының материалдың қасиеттеріне байланысты өзгерісін зерттеу

арқылы маңызы ерекше көптеген жаңа физикалық мағлұматтарды өндіруге мүмкіндік жетерлік.



2 - сурет. Электрон мен позитронның әсерлесу моделі

Реалды кристалдық құрылымдағы позитрондар

Конденсірлі күйдегі материалдарды электрон-позитрон аннигиляция әдісімен зерттеу кезінде позитрон ерекше талғамдық танытады. Кристалдық тордың кеңістігі түрлі ақаулардан және ақаулар түспеген аймақтарға бөлінеді. Осы екі түрлі кеңістіктердің маңайына шоғырланған электрондардың күйлері екі түрлі болуы заңды процес. Ақаулардың басым көпшілігі сыртқы факторлардың әсерімен иондарынан айырылған, есесіне босаған иондардың орынына электрондар шоғырланған кеңістік саналады. Сондықтан ақауларға жинақталған электрондардың импульстық - энергетикалық көрсеткіштері ақаусыз, иондары кристалдық тордағы меншікті орындарынан айырылмаған еркін электрондардың сәйкес көрсеткіштерінен көп төмен және тығыздығы жоғары болып қалыптасады. Сондықтан кристалдық тордың ақаулары позитрондар үшін қармау қабылеті жоғары, «терең» потенциалдық шұңқыр саналады. Материалға кірген позитрондар бастапқы энергетикалық көрсеткіштерінен айырылып, ортаның, яғни материалдың температурасына сәйкес келеетін көрсеткішті қабылдайды: $\varepsilon = kT$. Мұндай жағдайда аталмыш күйдегі позитрондар, әрине, ақауларға шоғырланған электрондармен еркін ұстасып, өзара байланысқан электрон-позитрон жұбын түзеді. Осы құбылыстарды ескере отырып, позитрондардың кристалдық денелердің ақауларымен әрекеттесуінің математикалық моделін құруға болады.

Өткен ғасырдың 60-жылдарынан бері көптеген авторлар позитронның кристалдық тордың ақауларымен әсерлесуін феноменологиялық түрде әртүрлі шашамадағы дәлдікпен сипаттаудың түрлі шешімдерін іздеумен айналысып келді [5,6]. Кейін Трифтехойзер осы бағыттағы зерттеу жұмыстарының нәтижелерін жан-жақты жүйелі түрде саралап, бір тоқтамға келді: алдағы уақытта позитрондардың материалдардың ақауларымен әсерлесу процесі «қармау моделі» деп аталды [7]. Әрине, модельдің аты модель. Модель позитрондардың кристалдық тордың ақауларымен әрекеттесіп, спектроскопияның міндетін атқаратындай дәрежеге жетуі үшін көптеген дайындықтар жүргізіледі. Зерттеуден өткізілетін материалдың үлгісі термиялық өңдеу арқылы құрылымдық ақауларының үлесі минимум дәрежеге жеткізіліп, позитрондық спектроскопияның аннигиляциялық гамма-кванттарының бұрыштық, немесе мерзімдік таралу спектрі негізінде зерттеуден өткізіліп, материалдың негізгі құрылымдық параметрлері табылады. Бұдан кейін материалдың ақаулармен қаныққан сол үлгісі тағы да зерттеуден өткізіліп, тиісті құрылымдық көрсеткіштері анықталып, олар калибровкалық көрсеткітер түрінде қабылданады. Зерттеу жұмыстарының негізгі үшінші кезеңінде әртүрлі физикалық факторлармен өңдеуден өткізілген материалдардың құрылымдық өзгерістері зерделенеді [8, 9].

Мысалы, позитрондық спектроскопияны пайдаланып, реактордың белсенді аймағындағы материалдардың кристалдық торының өзгерісін, радиациялық ақаулардың концентрациялық және конфигурациялық сипаттарын анықтау ешбір қиындық туғызбайды. Сол үшін зерттелетін нысанды жоғары энергиялы үдеткіштермен өндірілген зарядталған бөлшектермен атқылау нәтижесінде туындайтын процестерді имитациялаушы зерттеу жұмыстарын орындауға болады. Зарядталған бөлшектің материал ішіндегі

жүру жолы радиациялық ақаулармен өрнектеледі. Материалды атқылаушы бөлшектердің энергиясы тормен әрекеттесу нәтижесінде бірте-бірте төмендейді. Онымен бірге радиациялық ақаулардың концентрациясы мен конфигурациясы қоса өзгеріске ұшырап отырады. Нәтижесінде имитациялау процесі радиациялық ақаулардың материалда таралу профилінің атқылаушы бөлшектің энергиясына тәуелділігін зерттеумен ұштасады [10-12].

Эксперименттің әдістемелік тәсілдері

Бұл проблеманы әртүрлі түрлі жолмен шешуге болады: а) материалдың қалыңдығын атқылаушы зарядталған бөлшектердің энергиясын толық шектейтіндей шамада тағайындау; ә) сәулелендірілген зерттеу нысанының қалыңдығын химиялық жолмен бірте-бірте Δx — қа жұқарту; б) нысанды материалдың есептелген қалыңдығына артығымен сәйкес келетін фольгалардан жинақтау. Электрон мен позитронның әрекеттесу моделін эксперимент жүзінде тексеру үшін бастапқы энергиясы 30 МэВ дейін үдетілген протондармен сәулелендірілген екі материал — тантал мен молибден қолданылды. Материалдардың бастапқы күйі 10^{-5} Па вакуумда, $T=1200^\circ\text{C}$ температурада, 1,5 сағ. аралығында жасыту нәтижесінде тағайындалады. Әрбір фольганың қалыңдығы Δdi сәулелендіруші протонның материал арқылы өту жолының

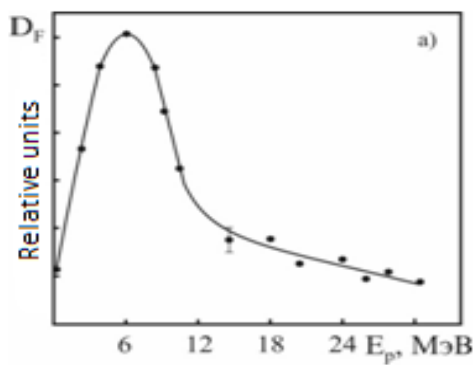
өзгерісін анықтайды: $\Delta x_i = \Delta di \cdot \rho$. Осы қалыңдықта протондардың энергиясы $\Delta E_i = s_i \Delta x_i$ шамасына төмендейді. Нәтижесінде, әрбір фольганың қарсы беті арқылы өткен протон энергиясының орта мәні $E_{xi} = E_i - \Delta E_i$ құрайды. Соған байланысты әрбір фольганың радиациялық ақаулану дәрежесі сәулелендіруші протондардың энергиясына тәуелді болып қалыптасады. Нысандар $75-80^\circ\text{C}$ температурада, қарқындылығы $1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, бастапқы энергиясы 30 МэВ протондармен $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ флюенске дейін сәулелендірілді. Соған байланысты, позитрондардың метафазалық күйден физикалық күйге ауысуына сәйкес келетін, қармау моделіне жүгіну нәтижесінде, бұрыштық корреляция спектрін өңдеу барысында анықталатын, материалдардың құрылымдық өзгеру дәрежесін бағалау үшін оған сезімтал аннигиляциялық көрсеткіштер қолданылады.

Зерттеу нәтижелерін зерделеу

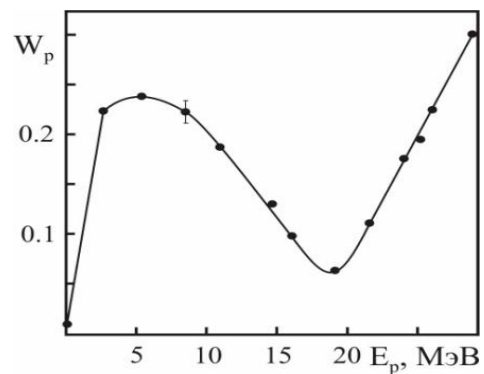
Жоғары энергетикалық протондармен материалдарды сәулелендірудің алғашқы нәтижесі бұрыштық корреляция спектрінің өзгерістерінен анық байқалады: спектрдің максималды интенсивтілігі өсіп, жартылай биіктіктегі ендігі тарылып, позитрондардың радиациялық ақаулардың төңірегіне шоғырланып, еркін электрондармен байланысуымен позитрон-электрон жұбының құрылуының арқасында аннигиляциялық кванттардың туындауына байланысты метафизикалық күйдің өзгеруінің дәлелі болады (3-сурет).

Спектрдің жартылай ендігінің максималды тарылуы, соның нәтижесінде аннигиляциялық параметрдің максималды өсіуі тантал үшін төменгі энергетикалық аралықта $\sim (5 - 8)$ МэВ орын алады (3,а - сурет). Протондардың энергиясының артуы аннигиляциялық параметрдің монотонды түрде төмендеуімен жалғасады. Бұрыштық корреляция спектрінің пішінін сипаттаушы параметрдің осылай өзгерісі

метафизикалық түрленудің, соған сәйкес радиациялық ақаулардың позитрондарды қармау мүмкіндігінің бағытты өзгерісінің толық дәлелі болады және процестің төменгі энергетикалық аймақта орын алуы танталдың кристалдық торының құрылымында туындайтын ақаулар протондардың тантал атомдарымен *серпінді* әрекеттесуінің нәтижесі саналады. Соған байланысты кристалдық тордың позитрондарды қармау центрлері негізінен кең ауқымды, атомдардың реттік тәртібі мейлінше үлкен өзгеріске ұшыраған кеңістік екендігі белгілі болады. Кристалдық тордың құрылымдық түрленуін сипаттаушы аннигиляциялық параметрдің жоғары энергетикалық протондардың металға әсерінің шамалы дәрежеде орын алуын дәлелдеуі, бұл тұста *серпінсіз* әсерлесуге байланысты туындайтын ядролық реакциялардың радиациялық ақауларды өндірудегі үлесі *серпінді* процестерге қарағанда, айтарлықтай төмен екендігі анық байқалады.



а)



ә)

3-сурет. Протонмен сәулелендірілген танталмен (а) молибденнің (ә) аннигиляциялық құрылымдық параметрлерінің энергетикалық тәуелділігі

Поликристал молибденмен орындалған дәл осындай эксперимент энергетикалық протондармен сәулелендіру салдарынан материалда пайда болатын радиациялық ақаулардың профилі екі түрлі фактордың әсерімен туындайтынын айқын көрсетті. Соған байланысты Мо үшін аннигиляциялық параметрдің энергетикалық тәуелділігі күрделі болып қалыптасады (3,б-сурет). Бастапқы энергетикалық 5-7 МэВ аралықта энергетикалық тәуелділік тұрақтылық танытады. Кейін, 18-20 МэВ аралығына дейін параметр күрт төмендеу нәтижесінде минимум арқылы өтіп, 30 МэВ жеткенше жоғары өсімталдық танытады. Кристалдағы құрылымдық өзгерістерге сезімтал аннигиляциялық параметрдің төтенше өзгерісі зарядталған бөлшектердің кристал ішінде өту траекториясының бойындағы құрылымдық туындылардың үлестірілу сипатының басты көрінісі саналады. Бұл процестің негізгі себебін бір жағынан энергиясы материалды атқылаушы $E_p < 18$ МэВ төмен, екінші жағынан энергиясы $E_p > 20$ МэВ жоғары протондардың кристалмен әрекеттесу механизмінде айтарлықтай айырмашылықтың бар екендігінен іздеу қажет. Әдетте, энергиясы төмен зарядталған

бөлшектердің материалмен әрекеттесуі серпімді процестермен ғана шектеледі. Протондардың энергиясы өскен сайын, кристал торының түйіндерінде орналасқан матрица атомдары алдымен орындарынан тайдырылады. Бұл атомдар бірінші кезекте *тайдырылған атомдар* деп аталады. Егер олардың энергиясы жеткілікті болса, екінші кезектегі атомдарды қозғалысқа келтіреді. Процес осылай, қозғалыстағы атомдардың энергиясы кезекті атомды тайдыруға жеткіліксіз болғанша жалғаса береді. Протондардың энергиясы $E_p > 20$ МэВ жоғары көтерілгенде, ядролық реакциялардың нәтижесінде туындайтын процестердің қатысуымен орын алатын радиациялық ақаулардың жаңа тобы пайда болады. Протонның металдың меншікті атомдарымен екі түрлі жолмен әрекеттесуі нәтижесінде кристалдық торда туындайтын ақаулардың концентрациясы мейлінше жоғары деңгейге көтеріледі. Осындай ақаулар кеңістігінде диффузиялық қозғалыстағы позитрондар өзінің соңғы әрекетін метафизикалық көзқарастан техникалық физикаға ауысу арқылы аяқтап, материалтану саласын зерттеу техникасының арасында жетекші орынды иемденеді.

Қорытынды

Позитрондармен орындалған эксперименттер нәтижесін тұжырымдау үшін метафизикалық күйдегі позитронды физикалық күйге тасымалдау нәтижесінде техникалық физикаға дейін дамытуға мүмкіндік бар екеніне көз жеткізіп, соған лайықты, материалдардың құрылымдық өзгерістеріне сезімтал және зерттеуге мүмкіндік беретін модел құрудың механизмі ұсынылды. Бірақ моделдің қай түрін

қолдансақта, моделдің аты модел екенін ұмытпау қажет және «қармау» деген ұғымды кез-келген жерде қолдана беру өрескел қателікке ұрындыруы әбден мүмкін. Бұлай тұжырымдаудың негізгі себебі модел кристалдық тор ақауларының позитрондарды тікелей қармауын анықтаумен шұғылданбайды және позитронның потенциалдық шұңқырға тап болып, аннигиляциялану нәтижесінде электр магниттік

гамма-квантқа түрленуіне дейінгі аралықта қандай күйде болғанын бағалай алмайды. Солай бола тұра, кейбір жағдайда моделге сүйену арқылы өндірілген нәтижелердің эксперимент нәтижелерімен толық сәйкес келмеуін негізге алып, моделді мүлдем жарамсыз деп жоққа шығаруға да болмайды.

Мысал ретінде материалтану саласының мамандарын осындай теріс пікірлерден сақтандыру мақсатымен мақала авторларының өзіндік көзқарасы тарапынан дайындалған, ядролық бөлшек пен антибөлшектің физикасы мен метафизикасына талдау жүргізу арқылы күрделі эксперимент нәтижелерін сын көзбен

саралаудың бір әдістемесі баяндалады. Соған байланысты зерттеушінің әрқашан есінде болатын маңызды мағлұмат: позитрондық зерттеу әдістемесінің құрылымдық ақауларға сезімталдығы 10^{-7} - 10^{-6} вакансия/атом шамасынан басталып, 10^{-4} - 10^{-3} вакансия/атом шамасында қанығу режиміне ауысады. Позитрондық спектроскопия тәсілдерінің көмегімен қармау моделіне сүйеніп вакансиялық ақаулар мен кластерлердің салыстырмалы концентрациясын анықтау дәлдігі оншақты пайыздан аспайды. Ал әзірге метал материалдардағы ақаулар концентрациясының абсолют мәнін 50 % дәлдікпен анықтау фактысы нақты дәлелденген.

Әдебиеттер References

- 1 Elementary charge (англ.). The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty. US National Institute of Standards and Technology. Accessed May 20, 2020. Archived April 24, 2025.
- 2 В.Н. Пакулин, Структура материалов. Вихревая модель микромира, (Санкт-Петербург: НПО «Стратегия будущего», 2011), 120 с. [*V.N. Pakulin, Structure of Materials. Vortex Model of the Microworld, (St. Petersburg: NPO "Strategy of the Future", 2011), 120 p. (in Russ.)*]
- 3 К.А. Томилин, Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах, (Москва, Физматлит. 2006.), 96-105. ISBN 5-9221-0728-3 [*K.A. Tomilin, Fundamental physical constants in historical and methodological aspects, (Moscow, Fizmatlit. 2006.), 96-105. (in Russ.)*]
- 4 Галилей (Galilei) Галилео, Философский энциклопедический словарь, Дата обращения: 5 сентября 2025. [*Galileo (Galilei) Galileo, Philosophical Encyclopedic Dictionary, Accessed on September 5, 2025. (in Russ)*]
- 5 R.M. Nieminen, M.J. Manninen, Positrons in Imperfect Solids: Theory. In: Hautojärvi, P. (eds) Positrons in Solids. Topics in Current Physics, vol 12. Springer, Berlin, Heidelberg. (1979). https://doi.org/10.1007/978-3-642-81316-0_4
- 6 W. Brandt, Positron dynamics in solids, Appl. Phys. A. **5**(1) 1-28 (1974). <https://doi.org/10.1007/BF01193389>
- 7 W.Triftshauser, Positron trapping in solid and liquid metals, Phys. Rev. B **12**(11), 4634 (1975). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.12.4634>
- 8 К.М. Mukashev, F.F. Umarov, A.K. Shokanov Radiation – stimulated Bulk and Surface Effects in materials (USA. Middletown, DE, 2018), 233 p.
- 9 К.М. Mukashev, F.F. Umarov, The chapter 6 in the Book: «Titanium Alloys – Advances in Properties Control». (INTECH Open Access Publisher. University Campus, 51000 Rijeka, Croatia, 2013), pp. 115-147. (Edited by: Jan Sieniawski and Waldemar Ziaja).
- 10 Н.Н. Пучеров, С.В. Романовский, Т.Д. Чеснокова, Таблицы массовой тормозной способности и пробега заряженных частиц с энергией 1-100 МэВ, (Киев: Наукова Думка, 1975), 294 с. [*N.N. Pucherov, S.V. Romanovsky, T.D. Chesnokova, Tables of mass stopping power and ranges of charged particles with energy of 1-100 MeV, (Kyiv: Naukova Dumka, 1975), 294 p. (in Russ)*]
- 11 М. Жусупов, А. Жусупов, Р. Кабатаева, & К. Жаксыбекова, Использование математических методик в теоретической физике, Вестник КазНУ, серия физическая **2**, 90–98 (2018). [*Zhusupov M., Zhusupov A., Kabatayeva, R., & Zhaksybekova K. Use of mathematical methodologies in theoretical physics, Recent Contributions to Physics* **2**, 90–98 (2018). (in Russ)] <https://bph.kaznu.kz/index.php/zhuzhu/article/view/652>
- 12 К.М. Мукашев, Физика медленных позитронов и позитронная спектроскопия, (Алматы, Казак университеті, 2007), 507 с. [*K.M. Mukashev, Physics of slow positrons and positron spectroscopy, (Almaty, Kazakh university, 2007), 507 p. (in Russ)*]

Мақала тарихы:

Түсті – 16.09.2025

Түзетілген түрде түсті – 10.12.2025

Қабылданды – 15.12.2025

Article history:

Received 16 September 2025

Received in revised form 10 December 2025

Accepted 15 December 2025

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Гүлмира Яр-Мұхамедова** – физ. мат. ғыл. докт., профессор, физика-техникалық факультет, әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан. e-mail: gulmira-alma-ata@mail.ru

2. **Қанат Мұқашев** (автор-корреспондент) – физ.мат.ғыл.докт., профессор, физика-техникалық факультет, әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан. e-mail: mukashev.kms@gmail.com

3. **Лилия Габдрахманова** - физ.мат.ғыл.докт., профессор, Башкортостан мемлекеттік ғылым-технология университеті, Уфа, Ресей. e-mail: a-gabdrahmanova@mail.ru

4. **Фарид Умаров** - физ.мат.ғыл.докт., профессор, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан. e-mail: farid1945@yahoo.com

Information about authors:

1. **Gulmira Yar-Mukhamedova** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. e-mail: gulmira-alma-ata@mail.ru

2. **Kanat Mukashev** (corresponding author) Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. e-mail: mukashev.kms@gmail.com

3. **Liliya Gabdrakhmanova** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Bashkortostan State University of Science and Technology, Ufa, Russia. e-mail: a-gabdrahmanova@mail.ru

4. **Farid Umarov** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan. e-mail: farid1945@yahoo.com

Р.Н. Сыздыкова 

Алматынсакий университет энергетика и связи, Алматы, Казахстан

e-mail: r.syzddykova@aes.kz

КРАТКИЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ В STEM ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ БАКАЛАВРИАТА

Проектное обучение стало ключевым педагогическим подходом в STEM-образовании, особенно в подготовке студентов инженерных специальностей к решению сложных реальных задач. В данном обзоре представлен краткий анализ последних международных исследований, опубликованных в период с 2019 по 2026 год, посвященных внедрению проектного обучения в сфере высшего образования в STEM-областях. Выбранная литература рассматривается с точки зрения методологии исследования, проектирования обучения и полученных образовательных результатов. Анализ показывает, что большинство эмпирических исследований используют смешанные методы или квазиэкспериментальные схемы и последовательно демонстрируют положительное влияние такого обучения на инженерные компетенции студентов, навыки решения проблем, мотивацию и междисциплинарное мышление. Особые проблемы включают оценку результатов обучения, интеграцию междисциплинарного контента и использование цифровых и лабораторных учебных сред. Систематизируя ключевые выводы и выявляя преобладающие исследовательские тенденции, данный обзор подчеркивает необходимость большей терминологической согласованности и методологического соответствия в будущих исследованиях. Результаты могут послужить основой для разработки учебных программ и способствовать эффективной интеграции проектно-ориентированных стратегий обучения в инженерном и STEM - образовании.

Ключевые слова: проектное обучение, STEM-образование, литературный анализ, инженерные компетенции студентов, педагогические стратегии и модели, критическое мышление.

Р.Н. Сыздыкова

Алматы энергетика және телекоммуникация университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: r.syzddykova@aes.kz

Бакалавр студенттерінің инженерлік құзыреттіліктерін дамыту үшін STEM-дегі жобаға негізделген оқытудың қысқаша талдауы

Жобаға негізделген оқыту STEM білім берудегі, әсіресе инженерлік студенттерді күрделі, нақты әлемдегі мәселелерді шешуге дайындаудағы негізгі педагогикалық тәсілге айналды. Бұл шолуда STEM жоғары білім беруде жобаға негізделген оқытуды енгізу бойынша 2019 және 2026 жылдар аралығында жарияланған соңғы халықаралық зерттеулердің қысқаша талдауы ұсынылған. Таңдалған әдебиеттер зерттеу әдіснамасы, оқу дизайны және білім беру нәтижелері тұрғысынан қарастырылады. Талдау көптеген эмпирикалық зерттеулер аралас әдістерді немесе квазиэксперименттік зерттеулерді қолданатынын және жобаға негізделген оқытудың студенттердің инженерлік құзыреттілігіне, мәселелерді шешу дағдыларына, мотивациясына және пәнаралық ойлауына оң әсерін үнемі көрсететінін көрсетеді. Ерекше қиындықтарға оқу нәтижелерін бағалау, пәнаралық мазмұнды біріктіру және цифрлық және зертханалық оқыту орталарын пайдалану жатады. Негізгі нәтижелерді жүйелеу және басым зерттеу үрдістерін анықтау арқылы бұл шолу болашақ зерттеулерде терминологиялық бірізділік пен әдіснамалық үйлесімділікті арттыру қажеттілігін көрсетеді. Нәтижелер оқу бағдарламасын әзірлеу үшін

негіз бола алады және инженерлік және STEM білім берудегі жобаға негізделген оқыту стратегияларын тиімді интеграциялауға ықпал ете алады.

Түйін сөздер: жобаға негізделген оқыту, STEM білімі, әдеби талдау, студенттің инженерлік құзыреттіліктері, педагогикалық стратегиялар мен модельдер, сыни ойлау.

R.N. Syzdykova
Energo University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: r.syzddykova@aues.kz

A brief analysis of project-based learning in STEM for developing engineering competencies of undergraduate students

Project-based learning has become a key pedagogical approach in STEM education, particularly in preparing engineering students to tackle complex, real-world problems. This review presents a brief analysis of recent international studies published between 2019 and 2026 on the implementation of project-based learning in STEM higher education. The selected literature is examined in terms of research methodology, instructional design, and educational outcomes. The analysis reveals that most empirical studies employ mixed methods or quasi-experimental designs and consistently demonstrate positive impacts of project-based learning on students' engineering competencies, problem-solving skills, motivation, and interdisciplinary thinking. Particular challenges include assessing learning outcomes, integrating interdisciplinary content, and using digital and laboratory-based learning environments. By systematizing key findings and identifying prevailing research trends, this review highlights the need for greater terminological consistency and methodological alignment in future research. The results can serve as a basis for curriculum development and promote the effective integration of project-based learning strategies in engineering and STEM education.

Keywords: project-based learning, STEM education, literary analysis, student engineering competencies, pedagogical strategies and models, critical thinking.

Введение

STEM-образование (Science, Technology, Education & Mathematics) в широком смысле определяется как междисциплинарный подход, интегрирующий науку, технологии, инженерию и математику для развития критического мышления, креативности, навыков решения проблем и сотрудничества среди учащихся. Согласно ЮНЕСКО [1] STEM охватывает эти дисциплины как единую образовательную парадигму, призванную обеспечить людей компетенциями, необходимыми для решения сложных глобальных проблем и внесения вклада в устойчивое развитие [2]. Анализ современной литературы показывает, что STEM-образование это не просто сумма его дисциплинарных частей, а скоординированная педагогическая стратегия, охватывающая научные и технические знания с применением в реальном мире [3-7]. Всё больше исследований подчёркивают важность таких терминов, как «проектное обучение», «инженерные тематические исследования» и «цифровые/виртуальные лаборатории», как ключевых компонентов эффективного обучения в

области STEM [8-14]. Исследователи отмечают, что определения STEM часто различаются в зависимости от заинтересованных сторон и контекста внедрения, однако существует согласие относительно его направленности на исследование, интеграцию и инновации.

Исследования со студентами инженерных специальностей показывают, что проектно-ориентированное обучение в области STEM может значительно улучшить практические навыки решения проблем у студентов и их способность переносить теоретические знания на инженерные задачи проектирования [15-19].

Современные концепции также изучают когнитивные аспекты STEM, такие как междисциплинарное мышление и инженерное проектирование на основе рассуждений в контексте физики и математики. Хотя проектное обучение все чаще применяется в STEM-образовании во всем мире, в том числе в инженерных программах, ученые подчеркивают необходимость передовых методов и согласованной терминологии для обеспечения его педагоги-

ческой эффективности. Следовательно, изучение проектно-ориентированного обучения (ПОО) в STEM-областях имеет важное значение для

развития инженерных компетенций и совершенствования педагогической практики в высшем образовании.

Метод исследования

Для поиска специальной литературы в виде научных публикаций использовался специальный протокол анализа. Основы протокола изложены в литературе [20], и он состоит из нескольких шагов.

Первый этап - поиск научных статей. Для этого просмотрены доступные статьи в четырех самых распространенных базах данных литературы. Основные базы данных литературы – Web of Science, Scopus, Google Scholar и arXiv.org. В результате были получены 108 научных статей.

Второй этап - организация литературы, то есть изучение только тех статей, в которых описаны методы и реальные результаты по проектно-ориентированному обучению в STEM. В результате было отобрано 22 научных статей за 2019-2025 годы.

Третий этап – это распределение публикаций по трем ключевым вопросам:

1. Как ПОО влияет на формирование инженерных компетенций у студентов технических специальностей?

2. Какие педагогические стратегии и модели ПОО наиболее эффективны для интеграции STEM-дисциплин?

3. Как можно оценить эффективность ПОО в STEM-образовании и какие диагностические

инструменты можно использовать для оценки компетенций?

В первую группу включены статьи, с исследованиями таких компетенций у учащихся, как как решение проблем, критическое мышление, междисциплинарное мышление, командная работа, т.е. способность студентов применять теоретические знания из физики или математики к реальным инженерным проектам.

Вторая группа публикаций - какие форматы проектов, тематические исследования и лабораторные работы оказывают наибольшее образовательное воздействие на студентов. Здесь в основном такие работы, где используются виртуальных исследовательские лабораторные работы.

И, наконец, в третью группу статей вошли публикации с оценкой и мониторингом результатов, позволяющих объективно измерить рост компетенций: критерии и показатели инженерных компетенций, рубрики проектов, самооценка и опросы преподавателей, а также сравнение исходных результатов и результатов после эксперимента.

Алгоритм методики приведен на рисунке 1. Алгоритм определяет критерии, которые будут направлять исследование.

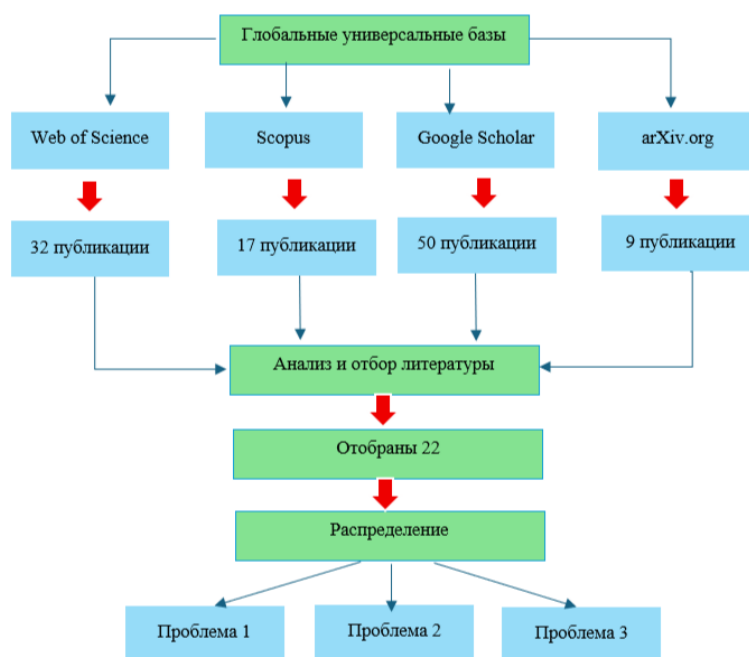


Рисунок 1 – Алгоритм, проведенного исследования

Результаты и обсуждение

Для выявления ключевых тенденций, методологических подходов и наблюдаемых результатов был проведен краткий анализ последних исследований по ПОО в STEM-дисциплинах. Отобранные исследования, опубликованные в период с 2019 по 2026 год, были рассмотрены с акцентом на три основных исследовательских вопроса, описанных в разделе Метод исследования настоящей работы: (1) влияние ПО на развитие инженерных

компетенций и навыков XXI века; (2) эффективность педагогических стратегий и моделей интеграции STEM-дисциплин посредством ПО; и (3) оценка результатов ПО и инструменты, используемые для измерения компетенций студентов. Результаты этого обзора литературы суммированы в Таблице 1, которая содержит соответствующие ссылки, методологии и ключевые выводы, соответствующие каждому исследовательскому вопросу.

Таблица 1. Анализ исследований по ПОО в STEM-областях

Год	Авторы	Методология	Ключевые выводы
2020	I. Rahmina [6]	Концептуальное и эмпирическое исследование	Проектное обучение на основе STEM-дисциплин способствовало вовлечению учащихся и развитию навыков решения проблем в естественных науках; рекомендуется для интеграции в учебную программу.
2021	M. Baran, et al [13]	Исследование с использованием смешанных методов; ПОО в естественнонаучных и технических дисциплинах.	Улучшение навыков, таких как критическое мышление, сотрудничество, коммуникация у студентов инженерных специальностей.
2023	L. Uden [11]	Экспериментальное исследование; ПОО в физике с учетом нейробиологических принципов.	ПОО способствовало улучшению концептуального понимания в физике; подчеркнуло важность когнитивной поддержки и междисциплинарных задач.
2024	R. Megawati [7]	Обзорная статья	Интеграция ПОО в STEM-дисциплины повышает практические навыки и применение теоретических знаний в биологическом образовании.
2024	A.Lestari, et al [8]	Пример из практики: внедрение ПОО в STEM-курсы.	ПОО повысило вовлеченность и мотивацию студентов; студенты сообщили об улучшении навыков решения проблем и сотрудничества.
2024	A. Simanora [12]	Систематический обзор литературы (10 лет исследований в области проблемно-ориентированного обучения в STEM-областях)	Выявлены тенденции, пробелы и лучшие практики внедрения проблемно-ориентированного обучения в различных STEM-дисциплинах; подчеркнута междисциплинарность.
2025	Fuster-Barcelo C. и др.[17]	Интегрированное в инструментарий совместное ПОО.	Цифровые инструменты и структурированное сотрудничество улучшили командную работу, качество проектов и междисциплинарное мышление.
2025	Y. Jia и др. [18]	Оценка ПОО с помощью ИИ	Использование инструментов ИИ для мониторинга проектов ПОО повысило надежность оценки и способствовало развитию компетенций в области STEM.

Таким образом, получены краткие результаты недавних исследований проектного обучения в STEM-образовании. Данные подчеркивают разнообразие методологических подходов и образовательных контекстов. Анализ показал, что большинство исследований используют смешанные или квазиэкспериментальные схемы и последовательно сообщают о положительном влиянии проектного обучения на навыки решения проблем, вовлеченность студентов и инженерные компетенции. В то же время, различия в моделях внедрения указывают на отсутствие единой методологической основы для проектного обучения в STEM-ориентированном инженерном образовании.

Для более детальной оценки проведен дополнительный анализ отдельных исследований с целью сравнения методов исследования и конкретных результатов, касающихся трех исследовательских вопросов. Эти результаты представлены в Таблице 2, которая дополняет Таблицу 1.

Таблица 2. Литература, соответствующая трем ключевым исследовательским вопросам по проектному обучению в STEM-областях.

№ ключевого вопроса	Ссылка на литературу	Используемая методология	Основной вывод
1	[10], [13]	Экспериментальная группа студентов с предварительным и последующим тестированием, включающий студентов инженерных специальностей.	Проектное обучение по методике STEAM значительно улучшило навыки студентов среди студентов инженерных специальностей.
	[17]	Квазиэкспериментальное исследование с контрольной группой.	Проектирование STEM ПОО с использованием цифровых инструментов значительно повысило способность студентов инженерных специальностей к решению проблем.
2	[17]	Двухлетняя оценка с использованием цифровых инструментов.	Интеграция инструментов для совместной работы и структурированной оценки повысила вовлеченность и обеспечила дифференцированные результаты.
	[22]	Мета-анализ множества реализаций проблемно-ориентированного обучения в области STEM.	Проектное обучение в сфере STEM положительно влияет на творческие способности учащихся и способствует достижению междисциплинарных результатов обучения.
	[8], [21]	Научно-исследовательское исследование по разработке и внедрению проблемно-ориентированного обучения с интеграцией STEM-дисциплин.	Модель STEM-проектного обучения способствует развитию мыслительных навыков и поддерживает междисциплинарную педагогическую стратегию.
3	[19]	Последовательное использование смешанных методов: тестирование до и после эксперимента и интервью.	Значительное улучшение навыков решения проблем; позитивное восприятие учащихся, подтверждающее достоверность оценки.
	[18]	Сравнительное исследование, предлагающее автоматизированные инструменты оценки.	В статье представлена платформа PBLBench для структурированной оценки, раскрываются проблемы и достижения в методологиях оценки.

Заключение

Таким образом, в данной работе представлен краткий обзор проекта исследований и наблюдаемых эффектов. Такой обзор поможет выделить закономерности и пробелы в области проблемно-ориентированного обучения в STEM-образовании. В совокупности эти таблицы

представляют собой структурированную основу для понимания текущего состояния внедрения проблемно-ориентированного обучения в STEM-образовании и для определения будущих направлений исследований.

Литература References

- 1 Science, Technology, Education & Mathematics (STEM) – UNESCO <https://www.unesco.org/en/stem>
- 2 17 Goals to Transform Our World – <https://www.un.org/sustainabledevelopment>
- 3 International Encyclopedia of Education, 4th Edition. Eds: Robert J Tierney, Fazal Rizvi, Kadriye Ercikan, (Elsevier Science, 2023). [STEM Education - an overview | ScienceDirect Topics](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/stem-education)
- 4 Kamini Jaipal-Jamani, Makerspace and robotics as/for STEM education, International Encyclopedia of Education, 101-103 (2023). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818630-5.13034-9>
- 5 M. Poláková, J.H. Suleimanová, P. Madzík, L. Copuș, I. Molnárová, J. Polednová, Soft skills and their importance in the labour market under the conditions of Industry 5.0, Heliyon **9**(8), e18670 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18670>
- 6 I. Rahmania, Project Based Learning (PjBL) Learning Model with STEM Approach in Natural Science Learning for the 21st Century, Budapest International Research and Critics Institute-Journal (BIRCI-Journal) **4**(1) (2021). <https://doi.org/10.33258/birci.v4i1.1727>
- 7 R. Megawati, Integration of Project-Based Learning in Science, Technology, Engineering, and Mathematics to Improve Students' Biology Practical Skills in Higher Education: A Systematic Review, Open Education Studies **6**, 20240049 (2024). <https://doi.org/10.1515/edu-2024-0049>
- 8 A. Lestari, F. W. Tersta, F. Firman, & S. Sofyan, Implementation of Project-Based Learning Through the STEM (Science, Technology, Engineering and Math), International Journal of Education, Culture, and Society **2**(3), 175–186 (2024). <https://doi.org/10.58578/ijecs.v2i3.3410>
- 9 F. Naseer, R. Tariq, H.M. Alshahrani, et al., Project based learning framework integrating industry collaboration to enhance student future readiness in higher education. Scientific Report **15**, 24985 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10385-4>
- 10 L Kh Mazhitova, R N Syzdykova and A K Imanbayeva, Practice-oriented model of training students in physics at a technical university, J. Phys.: Conf. Ser. **1929**, 012030 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012030>
- 11 L. Uden, F. Sulaiman, G.S. Ching, et al., Integrated science, technology, engineering, and mathematics project-based learning for physics learning from neuroscience perspectives, Frontiers in Psychology **14**, 1136246 (2023). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1136246>
- 12 A.M. Simamora, A Decade of Science Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Project-Based Learning (PjBL): A Systematic Literature Review, Journal of Computers for Science and Mathematics Learning **1**(1) (2024). <https://doi.org/10.70232/pn3nek61>
- 13 M. Baran, M. Baran, F. Karakoyun, & A. Maskan, The influence of project-based STEM (PjBL-STEM) applications on the development of 21st century skills, Journal of Turkish Science Education **18**(4), 798–815 (2021). <https://doi.org/10.36681/tused.2021.104>
- 14 M. M. Li, & C. C. Tu, Developing a Project-Based learning course model combined with the Think–Pair–Share strategy to enhance creative thinking skills in education students, Educ. Sci. **14**(3), 233 (2024). <https://doi.org/10.3390/educsci14030233>
- 15 N. Yusoff, N. R., Mahfar, M., Saud, M. S. & Senin, A. A. Effects of career readiness module on career self-efficacy among university students, Int. J. Evaluation Res. Educ. (IJERE) **13** (1), 311 (2024). <https://doi.org/10.11591/ijere.v13i1.252573>
- 16 Ю.В. Калегина, Готовность выпускника вуза к социальному и профессиональному служению, Казанский педагогический журнал **1** (158) (2023). [Kalegina Yu., Readiness of a university-graduate to social and professional service, Kazan Pedagogical Journal **1** (158) (2023). (in Russ)] <https://doi.org/10.51379/kpj.2023.158.1.045>
- 17 C. Fuster-Barcelo, G.R. Rios-Munoz, & A. Munoz-Barrutia, Scaffolding Collaborative Learning in STEM: A Two-Year Evaluation of a Tool-Integrated Project-Based Methodology. (preprint) arXiv:2509.02355. (2025).
- 18 Y. Jia, X. Wu, Q. Zhang, Y. Qin, L. Xiao, & S. Zhao, Towards Robust Evaluation of STEM Education: Leveraging MLLMs in Project-Based Learning. (preprint) arXiv:2505.17050. (2025).

- 19 M. Husin, U. Usmeldi, H. Masdi, et al. Project-Based Problem Learning: Improving Problem-Solving Skills in Higher Education Engineering Students, *International Journal of Sociology of Education*, **14**(1), 62–84 (2025). <https://doi.org/10.17583/riase.15125>
- 20 K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba and M. Mattsson, Systematic Mapping Studies in Software Engineering, *EASE* 8, 68-77 (2008).
- 21 K. Turekhanova, Z. Akimkhanova, & J. Gani, The effectiveness of ICT in teaching physics. *Recent Contributions to Physics* **2**, 146–151 (2019). <https://doi.org/10.26577/rcph-2019-i2-18>
- 22 Hyunkyung Kwon, Yujin Lee, A meta-analysis of STEM project-based learning on creativity, *STEM Education* **5**(2) (2025). <https://doi.org/10.3934/steme.2025014>

Мақала тарихы:

Түсті – 18.10.2025

Түзетілген түрде түсті – 29.11.2025

Қабылданды – 15.12.2025

Article history:

Received 18 October 2025

Received in revised form 29 November 2025

Accepted 15 December 2025

Автор туралы мәлімет:

Рабиға Сыздықова – Аға оқытушы, Алматы энергетика және телекоммуникация университеті, Алматы, Қазақстан, email: r.syzddykova@aes.kz

Information about authors:

Rabiga Syzdykova - Senior Lecturer, Energo University, Almaty, Kazakhstan, email: r.syzddykova@aes.kz.

МАЗМУНЫ – CONTENTS – СОДЕРЖАНИЕ

Теориялық физика. Ядро және элементар бөлшектер физикасы. Астрофизика	Theoretical Physics. Nuclear and Elementary Particle Physics. Astrophysics	Теоретическая физика. Физика ядра и элементарных частиц. Астрофизика
<i>A.M. Сыздыкова, У. А. Уалиханова, А.Б. Алтайбаева</i>		
Екі өлшемді Калоджеро-Богоявленский-Шифф теңдеуінің жүгірмелі толқындық шешімі..... 4		
<i>M.S. Tayfor</i>		
Analytical solution of the time-fractional Schrödinger equation via decomposition methods and series expansions 11		
Конденсирленген күй физикасы және материалтану проблемалары. Наноғылым	Condensed Matter Physics and Materials Science Problems. Nanoscience	Физика конденсированного состояния и проблемы материаловедения. Нанонаука
<i>Қ. Диханбаев, С. Төрахмет, А. Рақымбекова, М. Әмзе, А. Еркін, С. Батай, Е. Шабдан</i>		
Интерфейсінде лантанойд жоғары-түрлендіру нанобөлшектері интеграцияланған металл-тотық/кремний фотокатодты кешенді дайындау жолы 27		
<i>A. Akkuş</i>		
An analytical evaluation of semiconductor resistance changes in weak magnetic fields 35		
<i>M. Yerdauletov, F. Napolskiy, Ch. Daulbayev, K. Nazarov, M. Kenessarin, A. Zhomartova, Zh. Dakhiyev, A. Bekbayev</i>		
Imaging internal structures in lithium-ion and sodium-ion batteries by neutron and X-ray tomography 40		
Жоғары мектепте физика пәнін оқыту әдістемесі	Methods of teaching high school physics	Методика преподавания физики в высшей школе
<i>Ә.Г. Мырзағалиева, Г. Ревалде, І.Е. Әубәкір</i>		
Физика пәнінде жобалық оқыту тәсілдерін қолдану 47		
<i>Г.Ш. Яр-Мұхамедова, Қ.М. Мұқашев, Л.А. Габдрахманова, Ф.Ф. Умаров</i>		
Ядролық бөлшек пен антибөлшектің физикасы мен метафизикасы..... 55		
<i>Р.Н. Сыздыкова</i>		
Краткий анализ проектно-ориентированного обучения в STEM для развития инженерных компетенций студентов бакалавриата 66		