



УДК: 372.853

Райгул ХОЖАНАЗАРОВА,

доктор философско-педагогических наук (PhD) Каракалпакский государственный университет имени Бердах

E-mail: rai.khozha@mail.ru

Бахтияр АБДИКАМалОВ,

кандидат физико-математических наук, профессор Каракалпакский государственный университет имени Бердах

E-mail: bakh.abdik@gmail.com

Д.п.н., проф. Х.Жураев на основе отзыва

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ПРИНЦИПА СУПЕРПОЗИЦИИ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СЛЕДСТВИЙ ДВУХЩЕЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В КУРСЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ

Аннотация

В качестве основной целью исследования был выбран поиск методов обучения, которые должны продемонстрировать того, что фотон, электрон или другая микрочастица интерферирует сама с собой в результате суперпозиции состояний. При достижении намеченной цели студент может наглядно и грамотно представлять все процессы, связанные с интерференцией любого волнового процесса. Результаты исследований показали значительное повышение успеваемости студентов по квантовой механике при предлагаемой последовательности изучения различных разделов квантовой механики и при детальном разборе принципа суперпозиции и двухщелевого эксперимента в начальном этапе изучения предмета.

Ключевые слова: принцип суперпозиции, двухщелевой эксперимент, преподавание квантовой механики, функция Лауэ, принцип последовательности, принцип преемственности, оценка успеваемости студентов.

THE METHODOLOGY OF STUDYING THE PRINCIPLE OF SUPERPOSITION AND THE FUNDAMENTAL PHYSICAL CONSEQUENCES OF THE DOUBLE-SLIT EXPERIMENT IN THE COURSE OF QUANTUM MECHANICS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Annotation

As the main objective of the study was chosen to find teaching methods that should demonstrate that a photon, electron or other microparticle interferes with itself as a result of superposition of states. When the intended goal is achieved, the student can visually and competently represent all the processes associated with the interference of any wave process. The results of research have shown a significant increase in the academic performance of undergraduate and graduate students in quantum mechanics at the proposed sequence of studying different sections of quantum mechanics and at the detailed analysis of the superposition principle and the two-slit experiment in the initial stage of studying the subject.

Keywords: superposition principle, two-slit experiment, teaching quantum mechanics, Laue function, consistency principle, continuity principle, student evaluation.

OLIV O‘QUV YURTLARIDA KVANT MEXANIKASI KURSIDA IKKI TIRQISHLI EKSPERIMENTNING FUNDAMENTAL FIZIK NATIJALARINI VA SUPERPOZITSIYA PRINSIPINI O‘RGANISH METODIKASI

Annotatsiya

Tadqiqotning asosiy maqsadi foton, elektron yoki boshqa mikrozarrahalarining interferensiyalanish holatlarini superpozitsiya natijasida ko‘rsatish kerak bo‘lgan o‘qitish usullarini izlashdan iborat edi. Ko‘zlangan maqsadga erishishda talaba har qanday to‘lqin jarayonining interferensiyalanishi bilan bog‘liq barcha jarayonlarni visual va samarali aks ettirishi mumkin. Tadqiqot natijalari kvant mexanikasining turli bo‘limlarini o‘rganish izchilligi va mavzuni o‘rganishning dastlabki bosqichida superpozitsiya prinsipi va ikki tirqishli tajribani batafsil tahlil qilish bilan talabalarining bilimlari yo‘qori ko‘rsatkichlarga sezilarli darajada oshganligini ko‘rsatdi.

Kalit so‘zlar: superpozitsiya prinsipi, ikki tirqishli eksperiment, kvant mexanikasini o‘qitish, Lawe funksiyasi, uzluksizlik tamoyili, izchillik tamoyili, talabalar faoliyatini baholash.

Введение. Известно, что квантовая механика построена на строгой математической основе, определенной системой постулатов и принципов. Преподавание квантовой механики обычно носит индивидуальный характер, отражая потребности, интересы и уровень подготовки как преподавателей, так и студентов. В формировании основ квантовой механики ключевую роль играет принцип суперпозиции, являющийся одним из фундаментальных и занимающий центральное место в её математической и концептуальной структуре. Естественно, в свете индивидуального подхода к преподаванию квантовой механики, выявляется важность разработки эффективных методик изучения принципа суперпозиции и тесно связанного с ним двухщелевого эксперимента, которые представляют собой вызов классической физике и демонстрируют, что поведение материи и излучения на квантовом уровне может быть очень необычным и непредсказуемым. Эта задача представляется актуальной и важной для обеспечения глубокого понимания основ квантовой механики. Принцип суперпозиции утверждает, что

квантовая система может находиться в состояниях, которые являются линейной комбинацией двух или более других состояний. В математической форме, если ψ_1 и ψ_2 – два различных квантовых состояния системы, то новое квантовое состояние системы, полученное путем линейной комбинации двух исходных состояний, описанное принципом суперпозиции, может быть представлено следующим образом: $\psi = a_1\psi_1 + a_2\psi_2$, где a_1 и a_2 произвольные комплексные числа. В терминах кет-векторов он формулируется как $|\psi\rangle = a|\psi_1\rangle + b|\psi_2\rangle$, где a и b являются произвольными комплексными числами. Известно также, что существует принцип Фейнмана или интеграл по траекториям, который представляет собой альтернативный подход к квантовой механике и использует интегральные суммы по всем возможным классическим траекториям системы для вычисления амплитуд вероятности. Принцип Фейнмана, как правило, формулируется в терминах интегралов по всем возможным траекториям и включает в себя волновые функции, действия и вероятности для различных траекторий системы. Хотя эти два аспекта квантовой механики

представляют разные концепции, существует некоторое перекрытие в том смысле, что оба они описывают возможность существования различных состояний или траекторий, объединенных в более общую картину. Однако их применение и формализм различны, и, поэтому, как правило, они используются в разных контекстах и для решения разных задач.

Широко известен также двухщелевой эксперимент, являющийся демонстрацией того, что электромагнитные волны и материя в целом могут проявлять характеристики как классических волн, так и частиц. Этот опыт отображает фундаментально вероятностный характер квантово-механических явлений [1-4]. В этой связи Фейнман любил говорить, что всю квантовую механику можно получить из тщательного обдумывания последствий двухщелевого эксперимента или опыта с интерферометром Маха-Цандера [5-6]. Он в своих знаменитых лекциях отметил, что явление, которое наблюдается в двухщелевом эксперименте, "невозможно, совершенно, абсолютно невозможно объяснить классическим образом. В этом явлении таится самая суть квантовой механики". Поэтому, методические аспекты вопроса изучения принципа суперпозиции и физических следствий двухщелевого опыта при преподавании квантовой механики является актуальной задачей, требующий глубокий анализ взаимодействия преподавателей и студентов, разработку новой методики преподавания в процессе изучения закономерностей микромира на базе новейших педагогических, информационных технологий и других средств обучения.

Цели исследования. Выше была отмечена важность разработки эффективных методик изучения принципа суперпозиции и двухщелевого эксперимента при изучении курса квантовой механики. В качестве основной цели проведенного исследования был выбран поиск методов обучения, которые должны продемонстрировать того, что фотон, электрон или другая микрочастица интерферирует сама с собой в результате суперпозиции состояний. При достижении намеченной цели студент может наглядно и грамотно представлять все процессы, связанные с интерференцией любого волнового процесса. В этой связи в качестве основы предполагаемых исследований было предусмотрено использование принципов последовательности и преемственности в образовании [7-8]. Принцип последовательности обозначает логическое и систематическое распределение учебного материала в учебном курсе. Все виды и аспекты этого принципа предполагают, что содержание учебного курса должно быть организовано таким образом, чтобы новые концепции, темы или навыки строились на уже изученных. Важен плавный и естественный переход от более простых к сложным понятиям. В то же время принцип преемственности подразумевает установление связей и переходов между различными этапами образования. Этот принцип акцентирует важность тесной связи между уровнями образования и последующее углубление знаний и навыков. Преемственность также подразумевает, что обучение на разных этапах должно логически дополнять и продолжать предыдущее обучение. Принцип преемственности также акцентирует важность связи между содержанием и методикой обучения на разных ступенях образования. Принцип преемственности подчеркивает важность того, чтобы новые знания и умения основывались на уже имеющихся знаниях и умениях. Принцип непрерывности подчеркивает важность того, чтобы обучение было организовано в определенной последовательности, которая соответствует логике развития предмета или дисциплины.

Естественно, изучение основ квантовой механики является постепенным и поэтапным процессом. Его разумная последовательность помогает создать педагогическую согласованность и помогает студентам сосредоточиться на поставленной задаче. Как показывает тщательно проведенный анализ и опыт, при изучении основ квантовой механики использование принципов последовательности и преемственности иногда может привести к даже

отрицательным результатам. Так, например, некоторые авторы предлагают избегать от прямой связи с классической механикой при изучении отдельных тем, отказ от изучения постулатов Бора [9-10]. Они считают, что классическая механика не всегда является наилучшим вводным путём для понимания квантовой физики. Вместо этого они предлагают начать с квантовых постулатов и математических формализмов, таких как волновая функция Шрёдингера, а также прямо с изучения спина микрочастиц [11-13]. Действительно, при проведении экспериментов отказались от связи с классической механикой, на корпускулярно-волновой дуализм, принцип суперпозиции и принцип неопределенности Гейзенберга было обращено значительное внимание с начала изучения курса, что было предусмотрено составленным планом курса. При такой последовательности изучения квантовой механики двухщелевой эксперимент и его физические следствия изучались в начальном этапе изучения курса.

В основном были использованы следующие методы обучения:

Визуализация. Для помощи студентам лучше представить происходящие процессы были использованы проприетарная система компьютерной алгебры Mathematica для демонстрации визуализации результатов двухщелевого эксперимента и отдельные разработки специалистов в этой области [14]. При этом для создания профиля интерференционной картины использовалась функция Лауэ, известная из рентгенографии кристаллов [15].

Были представлены интерактивные задачи, связанные с дифракцией различных излучений на двух щелях для наглядного представления изучаемого процесса. Это значительно помогало закрепить полученные знания.

Обращено особое внимание на исторический контекст, в котором развивалась квантовая механика, и на вклады великих ученых, оказавших определяющее влияние на возникновение и развитие квантовой механики.

Следующим важным аспектом преподавания являлась выбор учебной литературы для самостоятельного изучения рассматриваемого вопроса.

Глубокое изучение принципа суперпозиции и результатов двухщелевого эксперимента оказало значительное влияние на быстрое понимание студентами и магистрантами одномерных и трехмерных задач, теории атома водорода и других разделов квантовой механики.

Отметим, что при проведении экспериментов широко использовалась область исследований, направленные на изучение эффективности методов преподавания физики и понимание студентами физических концепций Physics Education Research (PER) [16]. Были использованы также результаты работ, посвященных оценке понимания квантовой механики в конкретных студенческих группах [17]. При проведении экспериментов были выбраны отдельные группы студентов и магистрантов университета и педагогического института. Сравнивались результаты текущей, промежуточной и итоговой проверки знаний.

Результаты проведенных исследований показали значительное повышение успеваемости студентов и магистрантов по квантовой механике при предлагаемой последовательности изучения различных разделов квантовой механики и при детальном разборе принципа суперпозиции и двухщелевого эксперимента в начальном этапе изучения предмета.

Таким образом, предварительное глубокое изучение принципа суперпозиции и двухщелевого эксперимента является прочным фундаментом для дальнейшего изучения квантовой механики и, поэтому, только после глубокого понимания их физической сути можно приступить к изучению более сложных концепций квантовой механики. Оно позволяет студентам получить общее представление о квантовой механике и ее основных понятиях, помогает им понять, как поведение материи и излучения на квантовом уровне отличается от поведения на макроскопическом уровне, а также подготавливает их к изучению более сложных концепций квантовой механики, таких как

квантовая запутанность и квантовая телепортация. Считаем, что этот уровень знаний открывает перед будущими специалистами не только таинственные закоулки микромира, но и двери к бескрайнему миру квантовых возможностей. В свете этих знаний открываются новые перспективы, позволяя

раскрывать сложнейшие явления природы, вносить инновации в современные технологии и продолжать удивляться богатству и глубине вселенной, где правит квантовый порядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anil Ananthaswamy (2018). *Through Two Doors at Once: The Elegant Experiment That Captures the Enigma of Our Quantum Reality*. Dutton/Penguin. ISBN 978-1-101-98609-7.
2. Anil Ananthaswamy (2018). *Through Two Doors at Once: The Elegant Experiment That Captures the Enigma of Our Quantum Reality*. Penguin. p. 63.
3. Ryan Sayer, Alexandru Maries and Chandralekha Singh. Quantum interactive learning tutorial on the double-slit experiment to improve student understanding of quantum mechanics. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 13, 010123 – Published 11 May 2017.
4. Christian Brand, Stephan Troyer, Christian Knobloch, Ori Cheshnovsky, Markus Arndt. Single-, double-, and triple-slit diffraction of molecular matter waves. *Am. J. Phys.* 89, 1132–1138 (2021). <https://doi.org/10.1119/5.0058805>.
5. Feynman, R. P. (1985). *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (p. 32). Princeton University Press.
6. Alexandru Maries; Ryan Sayer; Chandralekha Singh. Can students apply the concept of “which-path” information learned in the context of Mach–Zehnder interferometer to the double-slit experiment? *American Journal of Physics* 88, 542–550 (2020).
7. *Diversity and Inclusion in Global Higher Education. Lessons from Across Asia*. Edited by Catherine Shea Sanger, Nancy W. Gleason (глава 3). <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-1628-3#about-this-book>.
8. Л.В.Быкасова. Преемственность в современном педагогическом образовании. Педагогика вчера, сегодня, завтра. Том 1, № 1. 2018. 12-23.
9. Chandralekha Singh. Student understanding of quantum mechanics. *Am. J. Phys.* 69, 885–895 (2001). <https://doi.org/10.1119/1.1365404>.
10. Steven Pollock, Gina Passante, Homeyra Sadaghiani. Adaptable research-based materials for teaching quantum mechanics. *Am. J. Phys.* 91, 40–47 (2023). <https://doi.org/10.1119/5.0109124>.
11. M. G. Littman; E. Gordis; P. Zhelnin; J. Arnold. Introducing quantum mechanics through its historical roots: The hydrogen Rydberg atom viewed through the lens of the old quantum theory. *Am. J. Phys.* 91, 371 (2023). <https://doi.org/10.1119/5.0094860>.
12. Homeyra Sadaghiani. Spin First instructional approach to teaching quantum mechanics in sophomore level modern physics courses. 2015, 2015 Physics Education Research Conference Proceedings. https://www.academia.edu/73548744/Spin_First_instructional_approach_to_teaching_quantum_mechanics_in_sophomore_level_modern_physics_courses.
13. John S. Townsend. *A modern approach to quantum mechanics*. 2nd ed. Independently Published, 31 aug. 2020. 486 p.
14. <https://demonstrations.wolfram.com/WaveParticleDualityInTheDoubleSlitExperiment/>.
15. Э.В.Суворов. Физические основы экспериментальных методов исследования реальной структуры кристаллов. Черноголовка: ИФТТ РАН. 2021. 209 с.
16. <https://www.per-central.org/pertg/>.
17. E. Cataloglu; R. W. Robinett. Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. *Am. J. Phys.* 70, 238–251 (2002). <https://doi.org/10.1119/1.1405509>.
18. M. Qurbonov, H.O. Jo'rayev. Fizika darslarida robototexnika elementlaridan o'quv vositasida o'quvchilarning texnik ijodkorligini rivojlantirish metodikasi. *Pedagogik akmeologiya*. - Buxoro, 2023. № 1. - B. 131-136.