

УДК 378.016:539:004.4

А. В. Баранов

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В  
СТУДЕНЧЕСКИХ ПРОГРАММНЫХ РАЗРАБОТКАХ**

*Баранов Александр Викторович*  
*baranovav@ngs.ru*

*ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»,  
Россия, г. Новосибирск*

**DYNAMIC VISUALIZATION OF QUANTUM INTERFERENCE IN THE STUDENTS'  
SOFTWARE DEVELOPMENTS**

*Baranov Alexander Viktorovich*  
*Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk*

*Аннотация.* В статье рассматриваются примеры программных разработок, выполненных студентами Новосибирского государственного технического университета в процессе организованной проектной деятельности. Разработки реализованы в форме виртуальных лабораторий, позволяющих проводить эксперименты с визуализацией во времени дифракции частиц на параллельных щелях и на круглом отверстии.

*Abstract.* The article discusses examples of software developments carried out by students of the Novosibirsk State Technical University in the organized project activities. The developments are implemented in the form of virtual laboratories allowing to experiment with time visualization of particle diffraction on parallel slits and on a circular aperture.

*Ключевые слова:* проектная деятельность; компьютерное моделирование квантовой интерференции; виртуальные лабораторные работы.

*Keywords:* project activity, computer modeling of quantum interference, virtual labs.

Применение в учебном процессе физических виртуальных лабораторий получает все большую популярность в университетском образовании [5]. Сочетание виртуальных и реальных экспериментов позволяет существенно расширить возможности физического лабораторного практикума. С дидактической точки зрения особый интерес представляют собой программные разработки, в которых моделируются и визуализируются физические процессы, характерные для малых временных и пространственных масштабов реальных объектов (элементарные частицы, атомы, молекулы...), когда проявляются квантово-механические закономерности.

Показательным примером является появление в электронной образовательной среде Интернета виртуальной лаборатории «интерферометр *KDTLI*» (Капицы – Дирака – Тальбота – Лау интерферометр) [8]. Международный проект был реализован группой “*Quantum*” факуль-

тета нанофизики Венского Университета под руководством Маркуса Арндта. *KDTLI* представляет собой виртуальную установку, позволяющую проводить лабораторные эксперименты по исследованию квантовой интерференции в режиме свободного онлайн — доступа. В процессе реализации международного проекта по созданию виртуальной лаборатории *KDTLI* в группу разработчиков привлекались не только профессиональные программисты, но и учащиеся высших и даже средних учебных заведений.

Последний факт говорит о том, что процесс обучения в современных университетах связывается с привлечением студентов к решению задач компьютерного моделирования и разработке программного образовательного контента.

Автором организована проектная деятельность компьютерного моделирования физических процессов при обучении физике студентов IT направлений Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) [2]. Целью проектной деятельности является разработка программных продуктов, моделирующих и визуализирующих физические процессы.

Тематика студенческих программных разработок достаточно разнообразна и включает, в частности, моделирование и визуализацию квантово-механических процессов [1,3], одним из которых является фундаментальный процесс квантовой интерференции. Доказательством её существования являются известные эксперименты по наблюдению дифракции частиц, начиная с электронов и заканчивая тяжелыми органическими молекулами [4]. Реальные эксперименты послужили прототипами для студенческих программных разработок [6,7].

В процессе работы над проектами по моделированию дифракции частиц бригады студентов решали следующие задачи:

1. Определение характерного пространственного распределения для моделируемой дифракционной картины.
2. Определение и программная реализация алгоритма, осуществляющего во времени псевдослучайный процесс, приводящий к требуемому дифракционному распределению частиц, обусловленному эффектом квантовой интерференции.
3. Разработка 3D-модели виртуальной установки для визуализации процесса дифракции частиц на препятствии.
4. Разработка интерактивного графического интерфейса, позволяющего визуализировать 3D изображение виртуальной установки и временную последовательность формирования дифракционной картины.

Для программной реализации виртуальных лабораторных работ студенты IT направлений обычно используют языки высокого уровня C++ и C#, открытую графическую библиотеку OpenGL, платформы Visual Studio или NET Framework.

Две студенческие разработки, представленные в статье, являются компьютерными интерактивными имитационными моделями, визуализирующими во времени дифракцию частиц на простых геометрических препятствиях – параллельных щелях и круглом отверстии.

В первой разработке для моделирования процесса случайного распределения частиц использовалось приближение Фраунгофера для углового распределения интенсивности  $I(\alpha)$  при дифракции плоских волн на решетке. Во второй разработке использовалось приближение Фраунгофера для радиального распределения интенсивности  $I(r)$  при дифракции плоских волн на круглом отверстии.

Обе разработки программно реализованы в форме виртуальных лабораторий студентами второго курса Факультета прикладной математики и информатики (ФПМИ) в процессе организованной на кафедре Общей физики НГТУ проектной деятельности.

### Виртуальный эксперимент «Визуализация в реальном времени квантовой интерференции одиночных молекул»

Авторы разработки студенты ФПМИ НГТУ: Е.Н. Волохович (гр. ПМ-22), Д.В. Степин (гр. ПМ-22), К.А. Медведева (гр. ПМИ-21) [3].

В виртуальном эксперименте имитационно моделируется дифракция одиночных тяжелых органических молекул на решетке с параллельными щелями. В качестве реального прототипа виртуальной лаборатории послужил эксперимент группы Маркуса Арндта по дифракции тяжелых флуоресцентных органических молекул [6]. Компьютерное моделирование, включая 3D визуализацию установки и процесс регистрации молекул, отражает наиболее существенные особенности реального эксперимента.

На рис. 1. представлено главное окно графического интерфейса программы. В изображении виртуальной установки присутствуют лишь основные элементы для динамической визуализации случайного процесса появления дифракционной картины в пространственном распределении молекул. В качестве системы для регистрации распределения молекул в виртуальном эксперименте используется экран. Для сравнения на вставку на рис. 1. приведено изображение реальной установки из статьи [6].

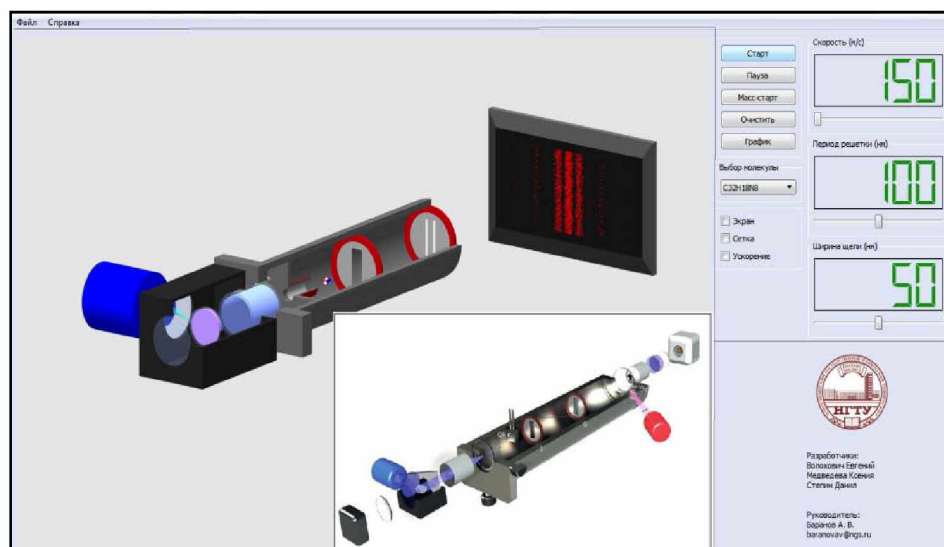


Рисунок 1 — Главное окно интерфейса виртуальной лаборатории «Визуализация в реальном времени квантовой интерференции одиночных молекул» (на вставке изображение установки из статьи [6])

На панели справа находятся элементы управления, позволяющие изменять режим визуализации дифракционной картины, сорт молекул ( $C_{32}H_{18}N_8$  или  $C_{48}H_{26}F_{24}N_8O_8$ ), значение скорости движения молекул, характеристики дифракционной решетки.

Нажатие кнопки «Старт» запускает динамическую визуализацию во времени процесса движения одиночных молекул от источника к решетке с последующим появлением изображения следов попадания молекул на регистрирующем экране.

Использование измерительной сетки (опция панели управления) позволяет для полученного в эксперименте распределения оценить расстояния от центра до максимумов и минимумов дифракционной картины. Зная условия наблюдения максимумов и минимумов, можно рассчитать значение дебройлевской длины волны анализируемых молекул.

### **Виртуальный эксперимент «Дифракция частиц на круглом отверстии»**

Авторы разработки студенты ФПМИ НГТУ: Н.А. Желтяков (гр. ПМ-84), А.А. Михайлов (гр. ПМ-84), К.В. Уварова (гр. ПМИ-81).

В виртуальном эксперименте моделируется дифракция одиночных заряженных частиц на круглом отверстии. В качестве реального прототипа виртуальной лаборатории послужил эксперимент по дифракции электронов на круглом отверстии [7].

На рис.2. представлено главное окно графического интерфейса программы. В стилизованном изображении виртуальной установки отражены наиболее существенные элементы для динамической визуализации процесса дифракции частиц.

Виртуальная установка состоит из источника ускорителя заряженных частиц, экрана для регистрации частиц и экрана-препятствия, в котором имеется круглое отверстие. Ускоренные электрическим полем частицы вылетают из источника и попадают в отверстие экрана-препятствия. В виртуальном эксперименте визуализируется движение частиц до экрана-препятствия с последующим изображением следов от их попадания на регистрирующий экран. На панели справа находятся элементы управления, позволяющие изменять режим выстрела частиц, тип частиц, ускоряющее напряжение, радиус отверстия и расстояние между экранами.

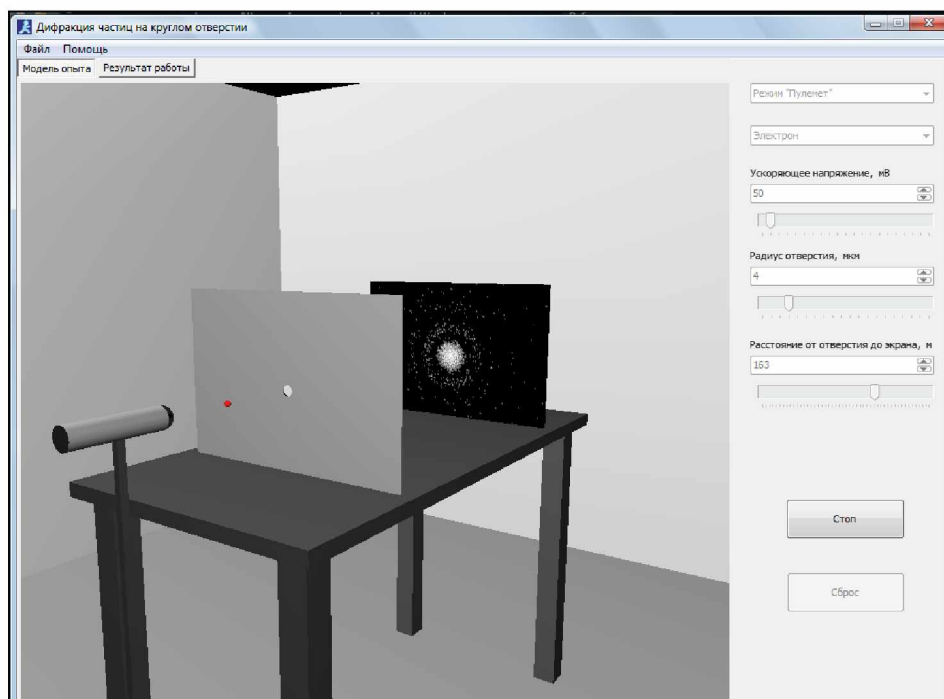


Рисунок 2 — Главное окно интерфейса виртуальной лаборатории «Дифракция частиц на круглом отверстии»

Кнопка меню «Результат работы» воспроизводит экран с полученным пространственным распределением частиц на экране. Координатные оси (опция панели управления) позволяют определять положения максимумов и минимумов дифракционной картины.

Проведение тестовых виртуальных экспериментов с разработанными программами продемонстрировало хорошее соответствие результатов компьютерного моделирования результатам, полученным в реальных экспериментах по дифракции частиц [6,7].

Разработанные студентами виртуальные лаборатории «Визуализация в реальном времени квантовой интерференции одиночных молекул» и «Дифракция частиц на круглом отверстии» используются как лекционные демонстрации и как лабораторные работы в лабораторном практикуме кафедры Общей физики НГТУ. Наблюдение динамической визуализации процесса формирования дифракционных картин позволяет обучающимся более адекватно воспринимать идеи квантовой механики, связанные с описанием движения микроробъектов.

Рассмотренные примеры демонстрируют, что процесс обучения физике в техническом университете может быть связан с привлечением студентов к решению задач компьютерного моделирования и разработке электронного образовательного контента.

### *Список литературы*

1. Баранов, А.В. Метод виртуальных проектов при изучении основ квантовой механики в техническом университете [Текст] / А. В. Баранов // Физическое образование в вузах. – 2010. – т. 16, №4. – С.26–34.

2. Баранов, А.В. Проектная разработка виртуальных лабораторных работ по физике для электронной среды обучения [Текст] / А.В. Баранов // Единая образовательная среда: направления и перспективы развития электронного и дистанционного обучения: материалы IX Международной научно-практической конференции-выставки (Новосибирск, 22-24 сентября 2010 г). – Новосибирск: Изд-во НГТУ – 2010. – С.71–73.

3. Баранов, А.В. Учебный компьютерный имитационный эксперимент «Визуализация в реальном времени квантовой интерференции одиночных молекул» [Текст] / А. В. Баранов, Е.Н. Волохович, К.А. Медведева, Д.В. Степин // Открытое образование. – 2015. – №3. – С.110–114.

4. Смирнов, Е.В. Дифракция микрочастиц на щелях: от электронов до биологических объектов [Текст] / Е.В. Смирнов // Физическое образование в вузах. – 2015. – №1. – С. 98–111.

5. De Jong, T. Physical and Virtual Laboratories in Science and Engineering Education [Text] / T. De Jong, M.C. Linn, C.Z. Zacharia // Science. – 2013. – V.340, April. – P. 305–308.

6. Juffmann, T. Real-time single-molecule imaging of quantum interference [Text] / T. Juffmann, A. Milic, M. Mullneritsch, P. Asenbaum, A. Tsukernik, J. Tuxen, M. Mayor, O. Cheshnovsky, M. Arndt // Nature Nanotechnology. – 2012. – V.7, No7. – P.297–300.

7. Matteucci G. The Heisenberg uncertainty principle demonstrated with an electron diffraction experiment [Text] / G. Matteucci, L. Ferrari, A. Migliori // Eur. J. Phys. – 2010. – V.31. – P. 1287–1293.

8. Tomand, M. Simulated Interactive Research Experiments as Educational Tools for Advanced Science [Text] / M. Tomand, T. Mieling, C.M. Losert-Valiente Kroon, M. Hopf, M. Arndt. // Scientific Reports, 2015; 5: 14108 DOI: 10.1038/srep14108 (open access).