

№4567

**53
Д 501**

ДИФРАКЦИЯ ЧАСТИЦ

Методические указания

**НОВОСИБИРСК
2016**

ДИФРАКЦИЯ ЧАСТИЦ

Методические указания к проведению компьютерных
экспериментов по физике для студентов
I и II курсов всех специальностей

УДК 535.42
Д 501

Составитель канд. физ.-мат. наук, доцент *А.В. Баранов*

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доцент *В.В. Христофоров*

Работа подготовлена на кафедре общей физики

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1923 году французский физик Луи де Бройль выдвинул оригинальную гипотезу, кардинально повлиявшую на развитие квантовой физики в XX веке. В соответствии с этой гипотезой корпускулярно-волновой дуализм (двойственность) является универсальным проявлением материи и характерен не только для фотонов, но и для других частиц.



Луи Бройль (Луи Виктор Пьер Раймон, 7-й герцог Брольи). Нобелевская премия, 1929 г.
«За открытие волновой природы электронов»

Согласно де Бройлю, с любой частицей, с одной стороны, связаны корпускулярные характеристики – энергия E и импульс p . С другой стороны, с частицей необходимо связывать и волновые характеристики – частоту ν и длину волны λ .

Связь корпускулярных и волновых характеристик должна носить универсальный характер. Поэтому количественные соотношения, известные для фотонов, постулируются де Бройлем как фундаментальные для любых частиц материи:

$$E = h\nu, \quad p = h / \lambda.$$

Последнее соотношение получило название формулы де Бройля.

Наличие у частиц *волновых свойств* не соответствовало традиционным представлениям классической физики. Поэтому гипотеза Луи де Бройля требовала экспериментального подтверждения. В экспериментах с частицами вещества должны обнаружиться проявления и закономерности, *характерные для волновых процессов*. К ним относятся явления *интерференции* и *дифракции*. *Волновые проявления должны касаться отдельно взятых частиц, а не быть коллективным эффектом!*

Первое экспериментное подтверждение гипотезы было получено в 1927 году американскими физиками К. Девиссоном и Л. Джермером. Электронный пучок, отраженный от монокристалла никеля, давал четкую дифракционную картину, подобную той, которая возникает при рассеянии на кристалле рентгеновского излучения.

Как и в случае рентгеновского излучения, кристалл сыграл для электронов роль естественной дифракционной решетки.

С использованием условия Вульфа–Брегга для конструктивной интерференции волн, отраженных от последовательных атомных кристаллических плоскостей, были рассчитаны значения длины волны для электронной дифракции. Результаты совпали со значениями λ , получаемыми с использованием формулы де Бройля.

Физический смысл условия Вульфа–Брегга достаточно прост: дифракционные максимумы появляются, если разность хода волн, отраженных от соседних атомных плоскостей монокристалла, равна целому числу длин волн де Бройля. Именно в этом случае отраженные волны усиливают друг друга, т. е. имеет место конструктивная интерференция.

В 1928 году английский физик Дж.П. Томсон и советский физик П.С. Тартаковский получили новое подтверждение справедливости гипотезы де Бройля. В экспериментах Дж.П. Томсона наблюдалась дифракционная картина после прохождения пучка быстрых электронов через тонкую поликристаллическую металлическую фольгу. В аналогичных опытах П.С. Тартаковского использовались медленные электроны.



К. Девиссон (Нобелевская премия, 1937 год)
и Л. Джермер

В 1930 году О. Штерн и И. Эстерман провели опыты по дифракции атомов гелия, неона, молекул водорода и дейтерия на кристаллах. В различных вариантах эти эксперименты проводились и в более поздних исследованиях. В этих экспериментах был установлен факт, что волновые свойства не только характерны для элементарных частиц, но проявляются у атомов и даже молекул.

Открытым оставался вопрос о коллективном или индивидуальном характере волновых проявлений частиц!

В 1949 году советские физики Л. Биберман, Н. Сушкин и В. Фабрикант провели эксперименты по дифракции электронов, проходящих сквозь кристалл разреженным потоком. Интенсивность пучка в этих опытах была столь малой, что на тонкую пленку вещества каждый раз попадал только один электрон. Эксперимент продемонстрировал, что волновые проявления не являются коллективным эффектом пучка частиц, а представляют собой *индивидуальное свойство отдельных электронов*.

Следующим важным шагом в исследовании волновых свойств частиц стало проведение экспериментов по дифракции на щелях и ре-

шечках, что было весьма непростой задачей в силу требуемой малости характерных параметров решеток.

Первый эксперимент по дифракции электронов на двух щелях выполнил в 1961 году немецкий физик К. Йенсен [1]. В опытах наблюдалась дифракция электронов с энергией 50 кэВ и дебройлевской длиной волны 5 пм на двух щелях шириной 0,3 мкм, расстояние между которыми составляло 1 мкм.

Эксперимент стал прямым аналогом известного опыта Юнга для видимого света. В эксперименте с электронами наблюдалась характерная дифракционная картина, обусловленная интерференцией волн, дифрагировавших на отдельных щелях (рис. 1).

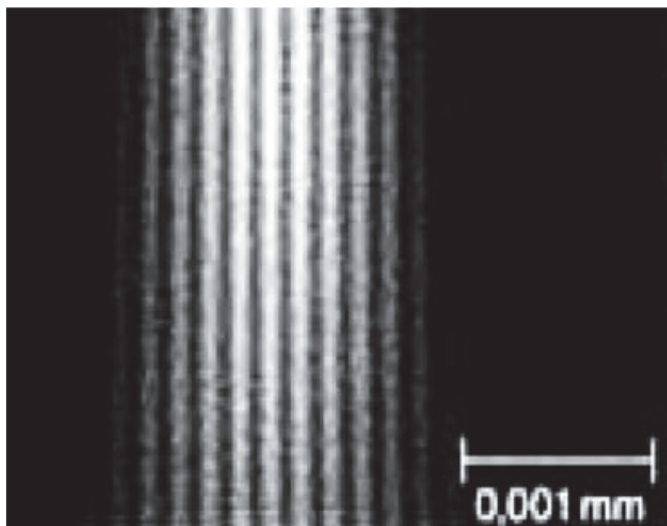


Рис. 1. Дифракционная картина в экспериментах К. Йенсена [1]

В опросе американских физиков, результаты которого были опубликованы в 2010 году, опыт К. Йенсена был назван первым в числе десяти наиболее красивых экспериментов в истории физики.

В 1989 году группа японских исследователей под руководством А. Тономуры опубликовала результаты экспериментов с дифракцией одиночных электронов на двух щелях [2]. Щели были образованы системой электрически заряженных проводников, и электроны испытывали воздействие электрического поля.

При малом времени экспозиции число электронов невелико, и частицы хаотически распределяются по экрану (рис. 2, *а*). По мере увеличения времени экспозиции на экране начинает вырисовываться дифракционная картина, обусловленная волновым проявлением электронов (рис. 2, *б*).

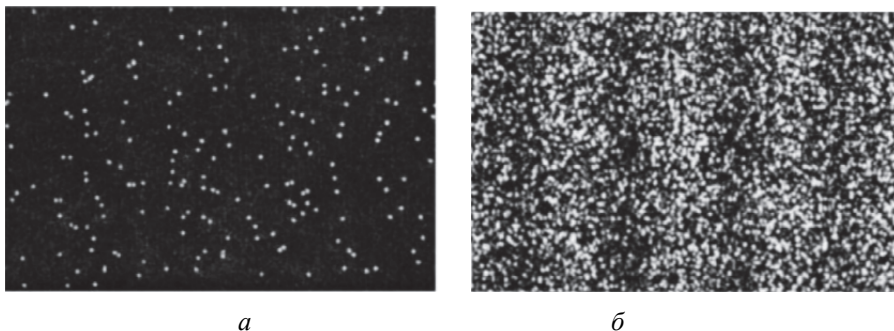


Рис. 2. Дифракционная картина в экспериментах А. Тономуры [2]:

а – на экране 200 электронов; *б* – на экране 40 000 электронов

Возможности современных нанотехнологий позволяют создавать с высокой точностью дифракционные решетки, характеризующиеся очень малыми значениями периода решетки и ширины щелей. Это позволило существенно продвинуться в экспериментах по дифракции атомов и молекул.

В 2012 году группа европейских исследователей под руководством М. Арндта продемонстрировала результаты своих экспериментов по дифракции тяжелых молекул органических флуоресцентных красителей (фталоцианин $C_{32}H_{18}N_8$ и его производная $C_{48}H_{26}F_{24}O_8$). С помощью нанотехнологий из мембраны нитрида кремния была изготовлена решетка с периодом 100 нм и шириной щели 75 нм. Толщина мембраны составляла всего 10 нм, что позволило в эксперименте минимизировать влияние сил Ван-дер-Ваальса на прохождение молекул через щели решетки.

Пучок летящих друг за другом молекул создавался при помощи испарения с поверхности стекла тончайшего слоя красителя, нагреваемого слабым лазерным лучом с длиной волны 445 нм. Оригинальная техника измерения позволяла убедиться, что с поверхности вылетали друг за другом именно отдельные молекулы. После решетки молекулы

попадали на поверхность кварцевого окна, где их возбуждал другой лазер (661 нм). Флуоресценция молекул снималась через объектив микроскопа при помощи светочувствительной матрицы с электронным умножением. Матрица была способна регистрировать единичные фотоны. Таким уникальным методом удалось получить последовательность кадров, из которых видно, как со временем все ярче проступает интерференционная картина.

В опыте было надежно продемонстрировано, что *волновые свойства присущи каждой отдельной молекуле*.

Подтвержденная экспериментально гипотеза Луи де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме частиц вещества коренным образом изменила представления физиков о свойствах микрообъектов. Всем микрообъектам одновременно присущи как корпускулярные, так и волновые свойства. Но любую из микрочастиц нельзя считать ни корпускулой (частицей), ни волной в классическом понимании.

Современная трактовка корпускулярно-волнового дуализма хорошо выражена словами академика В.А. Фока: *«Можно сказать, что для атомного объекта существует потенциальная возможность проявлять себя, в зависимости от внешних условий, либо как волна, либо как частица, либо промежуточным образом. Именно в этой потенциальной возможности различных проявлений свойств, присущих микрообъекту, и состоит дуализм волна – частица. Всякое иное, более буквальное, понимание этого дуализма в виде какой-нибудь модели неправильно»*.

2. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Три компьютерных эксперимента, представленных в настоящих указаниях, в основе своей являются *имитационными моделями*, визуализирующими во времени дифракцию и интерференцию частиц на простых геометрических препятствиях.

В первых двух компьютерных экспериментах для *имитационного моделирования процесса случайного попадания частиц* на регистрирующий экран в качестве выражения, определяющего пространственную компоненту плотности распределения вероятности (квадрат волновой функции), использовалось приближение Фраунгофера для углового

распределения интенсивности $I(\alpha)$ при дифракции плоских волн на решетке:

$$I(\alpha) = I_1(0) \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin(\alpha)}{\lambda}\right) \sin^2\left(\frac{N \pi d \sin(\alpha)}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin(\alpha)}{\lambda}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi d \sin(\alpha)}{\lambda}\right)},$$

где b – ширина щели; d – период решетки; N – количество щелей; λ – дебройлевская длина волны, определяемая значением импульса частицы; α – угол дифракции; $I_1(0)$ – интенсивность центрального дифракционного максимума для одной щели.

Как продемонстрировано в [1], такое распределение хорошо соответствует результатам реальных экспериментов по дифракции частиц *на системе параллельных щелей* (дифракционная решетка).

В третьем компьютерном эксперименте также используется приближение Фраунгофера для углового распределения интенсивности $I(\alpha)$ при дифракции плоских волн *на круглом отверстии*. Как следствие цилиндрической симметрии, распределение выражается через функцию Бесселя первого порядка J_1 :

$$I(\alpha) = I_{\max} \frac{J_1\left(\frac{\pi b \sin(\alpha)}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin(\alpha)}{\lambda}\right)^2},$$

где b – диаметр отверстия; λ – дебройлевская длина волны, определяемая значением импульса частицы; α – угол дифракции; $I_{\max}$ – интенсивность центрального дифракционного максимума.

Все три компьютерных эксперимента были программно реализованы в форме виртуальных лабораторий студентами II курса факультета прикладной математики и информатики в процессе организованной проектной деятельности при изучении физики.

2.1. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ»

В компьютерном эксперименте моделируется дифракция одиночных электронов на решетке с двумя щелями. Моделирование отражает основные особенности реального эксперимента [1, 2].

В главном окне интерфейса (рис. 3) находится стилизованное изображение виртуальной установки, включающей в себя источник электронов, пластину (экран) с двумя параллельным щелями и экран для регистрации электронов.

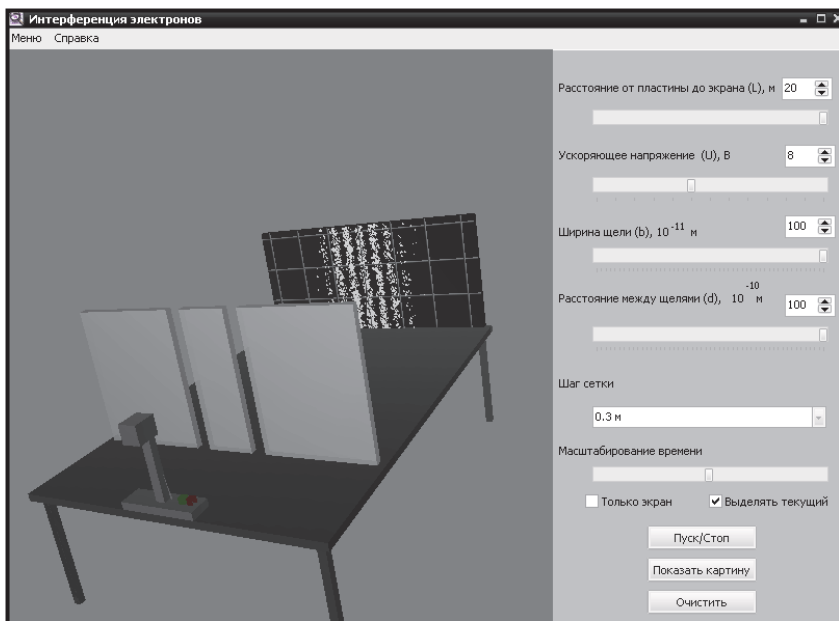


Рис. 3. Главное окно интерфейса виртуальной лаборатории

На панели справа находятся *элементы управления*, позволяющие изменять параметры виртуального эксперимента: расстояние от пластины до экрана (L), ускоряющее напряжение (U), ширину щели (b), расстояние между щелями (d), шаг измерительной сетки.

Кнопка «пуск/стоп» запускает или останавливает виртуальный эксперимент. Кнопка «очистить» производит очистку экрана установки. Кнопка «показать картину» позволяет получить результирующую кар-

тину распределения электронов по экрану, не дожидаясь окончания эксперимента.

При нажатии кнопки «пуск/стоп» начинает визуализироваться процесс попадания одиночных электронов на экран после прохождения системы двух параллельных щелей. Каждое попадание очередного электрона на экран представляет собой случайное событие, никак не связанное с предыдущим. Но с течением времени наблюдение за этим процессом позволяет обнаружить постепенное появление на экране характерного по своему виду дифракционного распределения электронов (рис. 4).

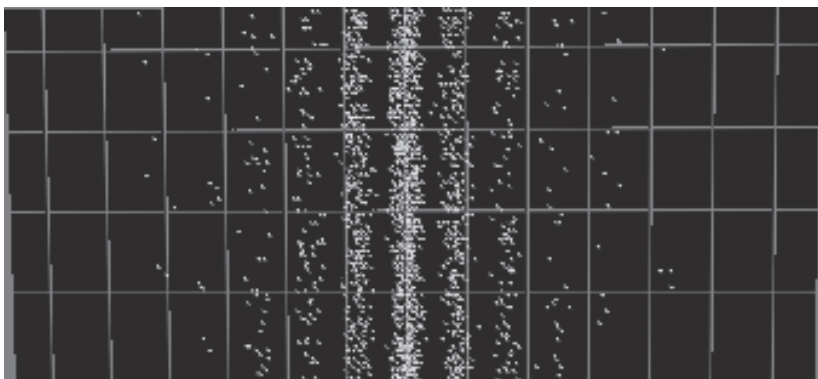


Рис. 4. Главное окно интерфейса. Распределение электронов на экране

Наличие измерительной сетки позволяет оценить расстояния до максимумов или минимумов дифракционной картины. Используя условия максимумов и минимумов, можно оценить значение дебройлевской длины волны для электронов.

Программная разработка виртуальной лаборатории осуществлена в результате организованной проектной деятельности *студентами II курса* факультета прикладной математики и информатики. Авторы разработки: К.В. Глебов (гр. ПМ-84), А.Б. Приходько (гр. ПМ-84), Д.С. Рудко (гр. ПМ-84).

ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель: проверка справедливости формулы де Бройля.

Задание для моделирования

1. Подготовьте рабочие формулы и таблицы для записи результатов эксперимента.
2. Задайте параметры эксперимента (расстояние от пластины со щелями до экрана, ширину щели, расстояние между щелями).
3. Изменяя ускоряющее напряжение, определите положения максимумов и минимумов дифракционной картины. Занесите результаты в таблицу.
4. Рассчитайте значения длины волны по формуле де Бройля и из условий дифракционных максимумов и минимумов. Занесите результаты в таблицу.
5. Сделайте выводы по результатам проведенного эксперимента.

2.2. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ КВАНТОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ»

В компьютерном эксперименте моделируется дифракция одиночных тяжелых органических молекул на решетке с двумя щелями. Моделирование, включая визуализацию, отражает основные особенности реального эксперимента [3].

На рис. 5 представлено окно графического интерфейса. В изображении виртуальной установки присутствуют лишь наиболее существенные элементы для динамической визуализации процесса дифракции молекул. В качестве системы регистрации распределения молекул в виртуальном эксперименте *используется экран*. Для сравнения приведено изображение реальной установки из статьи [3].

На панели справа находятся элементы управления.

Кнопки

«Старт» – последовательный пуск одиночных молекул.

«Пауза» – прерывание процесса.

«Масс-старт» – отображение всех дифрагировавших молекул на экране.

«Очистить» – очистка экрана.

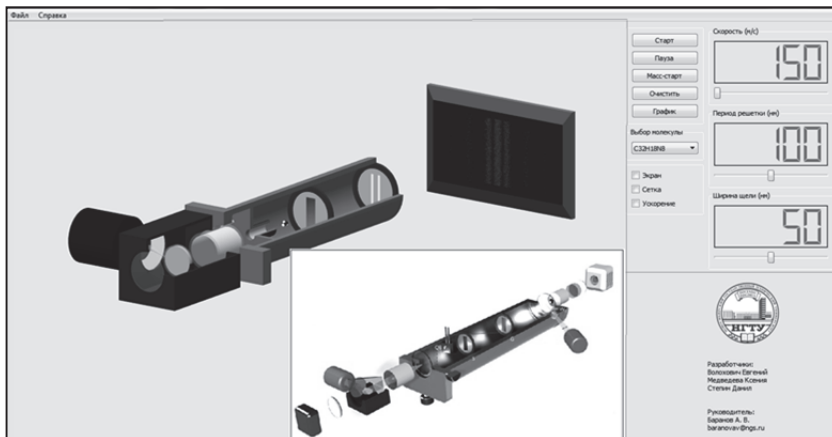


Рис. 5. Главное окно интерфейса виртуальной лаборатории

«График» – дополнительное окно для построения графика распределения.

«Выход» – завершение работы программы.

Флажки

«Экран» – увеличение изображения экрана.

«Сетка» – наложение сетки на экран.

«Ускорение» – увеличение визуальной скорости воспроизведения движения молекул.

Список молекул для выбора

$C_{32}H_{18}N_8$ или $C_{48}H_{26}F_{24}N_8O_8$

Изменение значений параметров

Изменяя положение ползунков, можно задавать различные значения скорости молекул, периода дифракционной решетки и ширины щели.

Скорость молекул v : от 150 до 250 м/с.

Период решетки d : от 50 до 150 нм.

Ширина щели b : от 25 до 75 нм.

После выбора параметров моделирования нажатие кнопки «Старт» запускает процесс динамической визуализации движения молекул от источника к решетке с последующим появлением изображения молекул на регистрирующем экране (рис. 6).

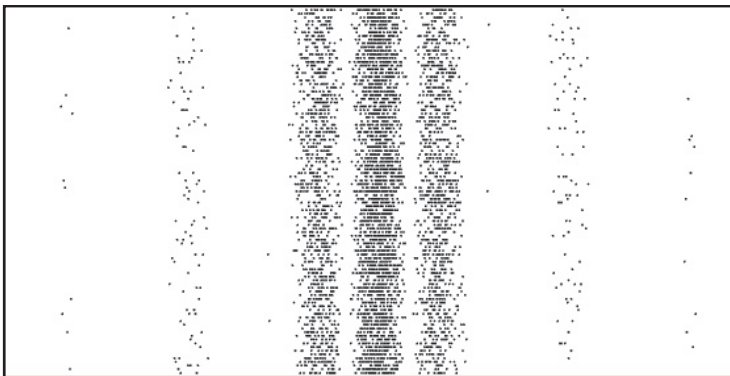


Рис. 6. Главное окно интерфейса. Распределение молекул на экране

Использование измерительной сетки позволяет оценить расстояния до максимумов или минимумов дифракционной картины. Зная условия максимумов и минимумов, можно оценить значение дебройлевской длины волны для молекул.

Программная разработка виртуальной лаборатории выполнена в результате организованной проектной деятельности в процессе изучения физики *студентами II курса* факультета прикладной математики и информатики. Авторы разработки: Е.Н. Волохович (гр. ПМ-22), Д.В. Степин (гр. ПМ-82), К.А. Медведева (гр. ПМИ-21).

ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель: проверка справедливости формулы де Бройля.

Задание для моделирования

1. Подготовьте рабочие формулы и таблицы для записи результатов эксперимента.
2. Выберите сорт молекул для проведения эксперимента.
3. Задайте параметры эксперимента (расстояние до экрана, ширину щели, период решетки).
4. Изменяя скорость молекул, определите положения максимумов дифракционной картины. Занесите результаты в таблицу.
5. Рассчитайте значения длины волны по формуле де Бройля и из условий дифракционных максимумов. Занесите результаты в таблицу.
6. Повторите эксперименты и расчеты для другого сорта молекул.
7. По результатам эксперимента сделайте выводы.

2.3. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ДИФРАКЦИЯ ЧАСТИЦ НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ»

В компьютерном эксперименте моделируется дифракция одиночных частиц на круглом отверстии.

На рис. 7 представлено окно графического интерфейса. В изображении виртуальной установки отражены лишь наиболее существенные элементы для динамической визуализации процесса дифракции частиц.

Установка состоит из источника-ускорителя частиц, экрана для регистрации частиц и экрана-препятствия, в котором имеется отверстие. Частицы испускаются из источника-ускорителя заряженных частиц и попадают на экран-препятствие.

На панели справа находятся элементы управления, позволяющие выбирать режим выстрела, тип частицы, изменять ускоряющее напряжение, радиус отверстия и расстояние до экрана.

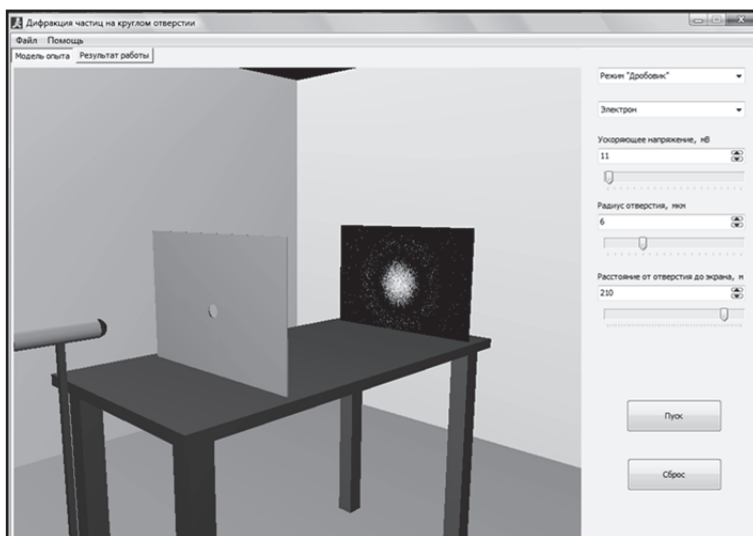


Рис. 7. Главное окно интерфейса виртуальной лаборатории

Кнопка меню «Результаты работы» воспроизводит экран с полученным распределением частиц (рис. 8). Координатные оси позволяют определять положение максимумов и минимумов дифракционной картины.

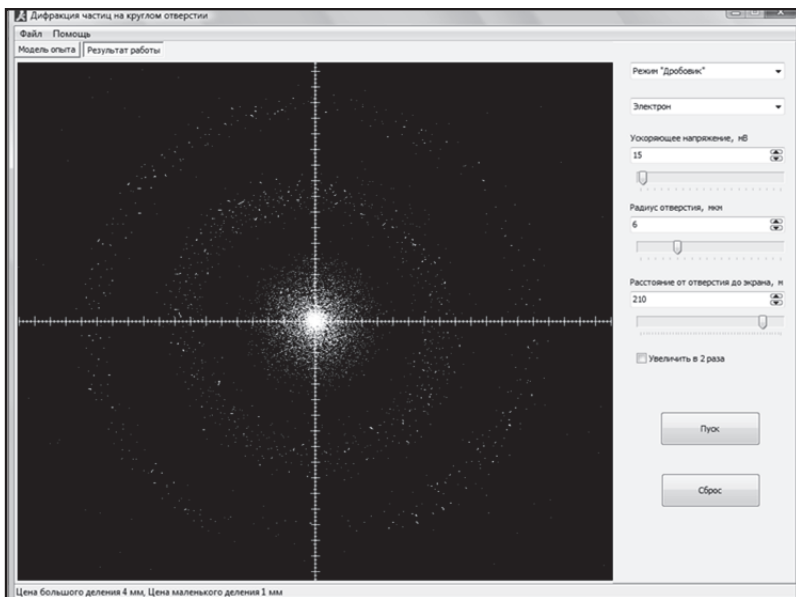


Рис. 8. Главное окно интерфейса. Распределение частиц на экране

Используя условия максимумов и минимумов, можно оценить значение дебройлевской длины волны для частиц.

Программная разработка виртуальной лаборатории осуществлена в результате организованной проектной деятельности в процессе изучения физики *студентами II курса* факультета прикладной математики и информатики. Авторы разработки: Н.А. Желтяков (гр. ПМ-84), А.А. Михайлов (гр. ПМ-84), К.В. Уварова (гр. ПМИ-81).

ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель: проверка справедливости формулы де Бройля.

Задание для моделирования

1. Подготовьте рабочие формулы и таблицы для записи результатов эксперимента.
2. Выберите сорт частиц для проведения эксперимента.
3. Задайте параметры эксперимента (радиус отверстия и расстояние до экрана).

4. Изменяя ускоряющее напряжение, определите положения максимумов дифракционной картины. Занесите результаты в таблицу.
5. Рассчитайте значения длины волны по формуле де Бройля и из условий дифракционных максимумов. Занесите результаты в таблицу.
6. Повторите эксперименты и расчеты для другого сорта частиц.
7. По результатам эксперимента сделайте выводы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jönsson C.* Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten // *Zeitschrift für Physik.* – 1961. – V. 161. – P. 454–474. Reprinted in English as «Electron diffraction at multiple slits» // *Am. J. Phys.* – 1974. – V. 42. – P. 4–11.
2. *Tonomura A., Endo T., Matsuda T., Kawasaki T., Ezawa H.* Demonstration of single electron buildup of an interference pattern // *Am. J. Phys.*, 1989. – V. 57. – P. 117–120.
3. *Juffmann T., Milic A., Mülneritsch M., Asenbaum P., Tsukernik A., Tuxen J., Mayor M., Cheshnovsky O., Arndt M.* Real-time single-molecule imaging of quantum interference // *Nature Nanotechnology.* – 2012. – V. 7. – № 7. – P. 297–300.
4. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. – М.: Высшая школа. – 2002. – 718 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	3
2. Описание компьютерных экспериментов.....	8
2.1. Компьютерный эксперимент «Интерференция электронов».....	10
2.2. Компьютерный эксперимент «Визуализация в реальном времени квантовой интерференции одиночных молекул»	12
2.3. Компьютерный эксперимент «Дифракция частиц на круглом отверстии»	15
Библиографический список	18

ДИФРАКЦИЯ ЧАСТИЦ

Методические указания

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 18.02.2016. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 200 экз.
Уч.-изд. л. 1,16. Печ. л. 1,25. Изд. № 289/15. Заказ № 310. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20