

Волновая природа материи: от дифракции частиц на кристаллах до интерферометра Капицы – Дирака – Тальбота – Лоу

© Е.В. Смирнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены экспериментальные методы исследования волновых свойств частиц. Отмечено, что в случае крупных молекул, молекулярная масса которых превосходит 10^3 а.е.м., изучение волновых свойств частиц наиболее эффективно с помощью интерферометра Тальбота – Лоу (ИТЛ). Дополнительные преимущества в видности интерференционной картины дает использование в ИТЛ эффекта Капицы – Дирака – дифракции частиц на стоячей световой волне. Такой интерферометр Капицы – Дирака – Тальбота – Лоу позволяет исследовать волновые свойства молекул, молекулярная масса которых составляет несколько тысяч атомных единиц массы. Обозначены перспективы применения этого метода для исследования волновых свойств более массивных частиц.

Ключевые слова: волновая природа материи, волна де Бройля, эффект Тальбота, эффект Капицы – Дирака.

Гипотезе де Бройля о волновой природе вещества принадлежит важная роль в развитии и становлении квантовой физики – основы всей современной физики и новейших технологий. Известный американский физик В. Вайскопф писал, что «квантовая теория представляет такой плод человеческой мысли, который более всякого другого научного достижения углубил и расширил наше понимание мира».

Интенсивное развитие передовых современных технологий, основанных на квантовой физике, обуславливает необходимость модернизации курса общей физики, читаемого в технических университетах и вузах [1, 2]. Цель этой модернизации – подготовка выпускников технических вузов к работе на передовых направлениях науки и техники.

Одной из важных проблем при изучении основ квантовой физики является анализ волновых свойств квантовых объектов, в том числе больших органических молекул, масса которых составляет несколько тысяч атомных единиц массы.

В современной учебной литературе эта проблема практически не отражена, поскольку основные результаты в данной области были получены в последние годы.

Первые эксперименты, подтвердившие гипотезу де Бройля и выявившие волновые свойства самых легких элементарных частиц – электронов, были выполнены на кристаллах (рис. 1) в 1927–1928 гг.

Эти объекты обладают трехмерной кристаллической решеткой, период которой сравним с дебройлевской длиной волны электронов, ускоренных относительно небольшой разностью потенциалов порядка 50 В.

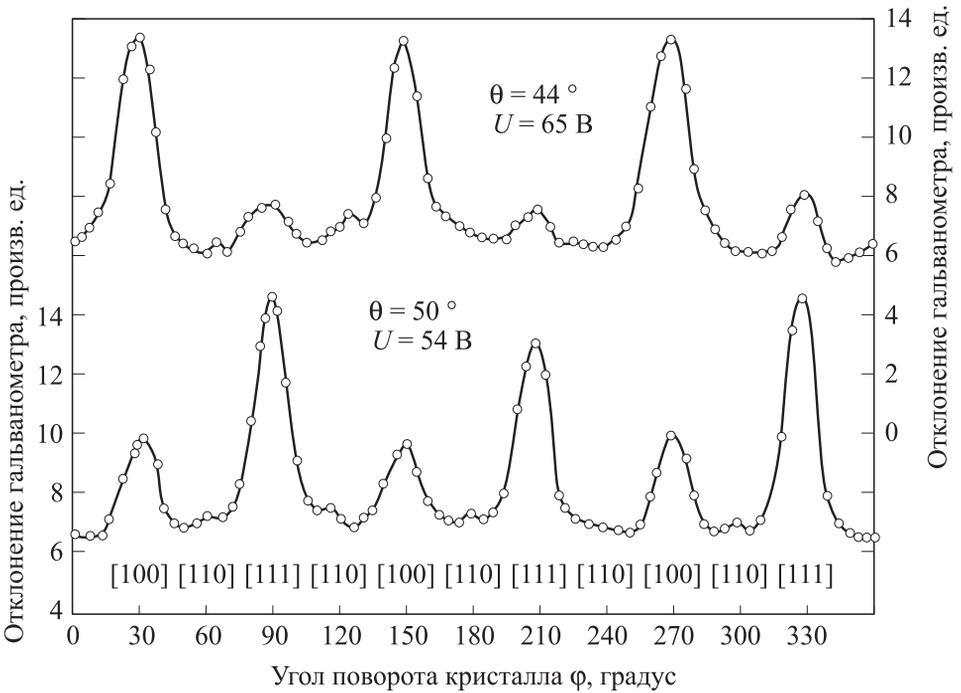


Рис. 1. Дифракция электронов на монокристалле никеля в эксперименте К. Дэвиссона и Л. Джермера:

θ – брэгговский угол; U – ускоряющая разность потенциалов

Последующие эксперименты по дифракции на кристаллах более сложных частиц – атомов гелия, неона, молекул водорода и дейтерия – показали, что волновые свойства присущи также атомам и молекулам. Однако дифракция в этом случае возникает только на двумерной поверхностной решетке кристалла, так как при малых скоростях молекулы не проникают в глубь кристалла.

Очень важными для понимания основ квантовой механики были эксперименты по дифракции частиц на двух щелях. Согласно Р. Фейнману, эксперимент по дифракции частиц на двух щелях позволил «заглянуть в самое сердце квантовой механики». А.В. Гейзенберг отмечал: «Сама попытка вообразить картину элементарных частиц и думать о них визуальным – значит иметь абсолютно неверное представление о них». Действительно, как представить, что частица может одновременно проходить через обе щели в диафрагме? Но ведь

только в этом случае на экране возникает интерференционная картина.

В 1961 г. немецким физиком К. Йенсеном был выполнен первый эксперимент по дифракции электронов на двух щелях (рис. 2). Он являлся прямым аналогом опыта Т. Юнга для видимого света.

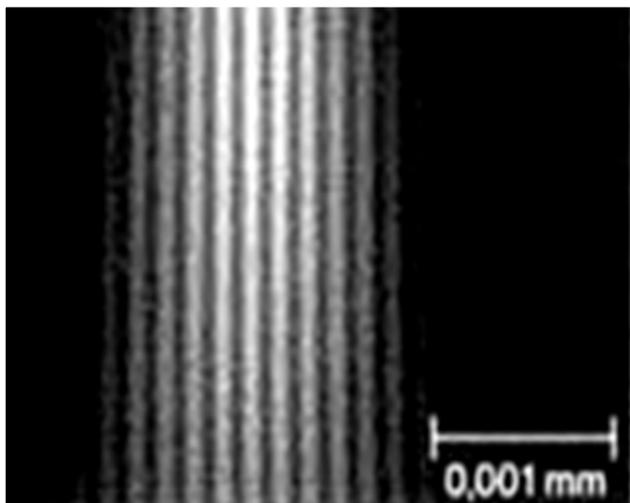


Рис. 2. Дифракция электронов на двух щелях в эксперименте К. Йенсена

В конце XX в. вследствие развития нанотехнологий появилась возможность получать дифракционные решетки, период которых достигается с очень высокой точностью. Результаты дифракции атомов гелия на такой дифракционной нанорешетке, изготовленной из нитрида кремния в Центре наноструктур Массачусетского технологического института (США), приведены на рис. 3. Представленная экспериментальная зависимость [3] позволяет определить дебройлевскую длину волны и среднюю скорость атомов илия, разброс скоростей в пучке, а также интенсивность сил Ван-дер-Ваальса взаимодействия атомов с поверхностью решетки.

Для наблюдения дифракции более крупных молекул используется известный в оптике эффект Тальбота [4] и основанный на этом эффекте интерферометр Тальбота – Лоу. Исследования показали, что для изучения волновых свойств крупных молекул наиболее перспективными являются не одиночные нанорешетки, а системы из нескольких таких решеток, в частности интерферометр ближнего поля Тальбота – Лоу (ИТЛ).

Этот интерферометр состоит из трех дифракционных решеток (рис. 4). Первая решетка обеспечивает пространственную когерентность падающего на нее слабо коллимированного молекулярного пучка в месте нахождения второй решетки. Дифракция на второй

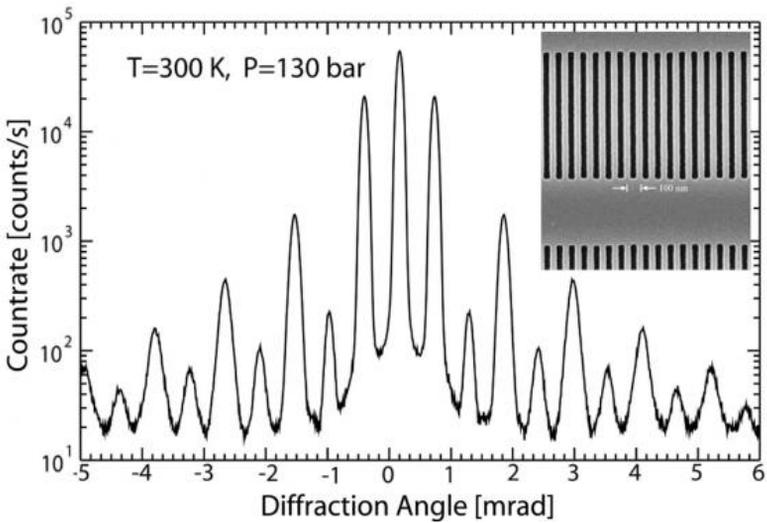


Рис. 3. Дифракция атомов гелия на дифракционной нанорешетке [3]

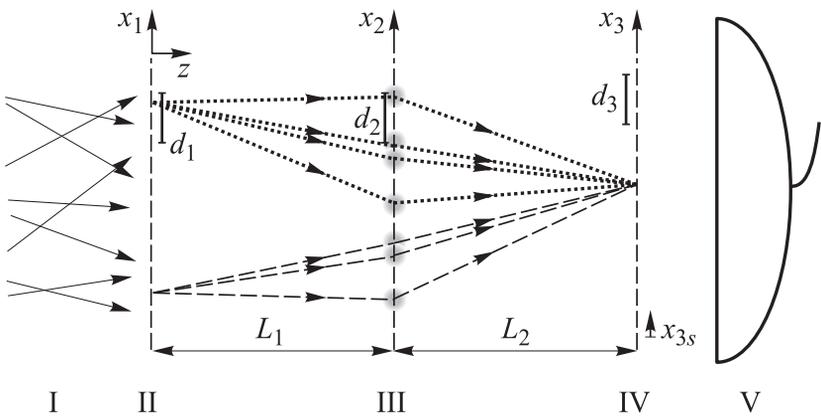


Рис. 4. Схема интерферометра Тальбота – Лоу:

I – неколлимированный пучок; II – амплитудная решетка; III – амплитудная или фазовая решетка; IV – перемещаемая решетка; V – интегральный детектор

решетке создает периодическое распределение плотности молекул в месте расположения третьей решетки. Эта решетка действует подобно поглощающей маске. Она может смещаться в поперечном направлении, преобразуя интерференционную картину в модуляцию интенсивности молекулярного пучка, которая записывается за интерферометром. В обычном ИТЛ используются три одинаковых решетки, расстояние между которыми равно или кратно длине

Тальбота $L_T = \frac{2d^2}{\lambda_{dB}}$, где d – период решетки, а λ_{dB} – дебройлевская

длина волны частицы. С помощью ИТЛ в 2003 г. были эксперимен-

тально обнаружены волновые свойства молекул фторфуллерена $C_{60}F_{48}$, а также биологических объектов – молекул тетрафинилпорфирина $C_{44}H_{30}N_4$ [5, 6].

Для изучения волновых свойств более крупных молекул ИТЛ был использован эффект Капицы – Дирака – дифракция частиц на стоячей световой волне (рис. 5). В таком интерферометре, получившем название интерферометра Капицы – Дирака – Тальбота – Лоу (ИКДТЛ) первая и третья нанорешетки изготовлены из нитрида кремния с периодом $d = 266,38 \pm 0,05$ нм. Следует отметить, что погрешность, с которой изготовлены эти решетки, сравнима с размером радиуса атома водорода. Вторая решетка в интерферометре представляла собой стоячую световую волну, получаемую при отражении от зеркала пучка лазера с длиной волны $\lambda = 532,28 \pm 0,01$ нм. Расстояние между решетками $L = 105$ мм. Использование стоячей световой волны вместо дифракционной решетки позволило повысить видность интерференционной картины примерно в 4 раза.

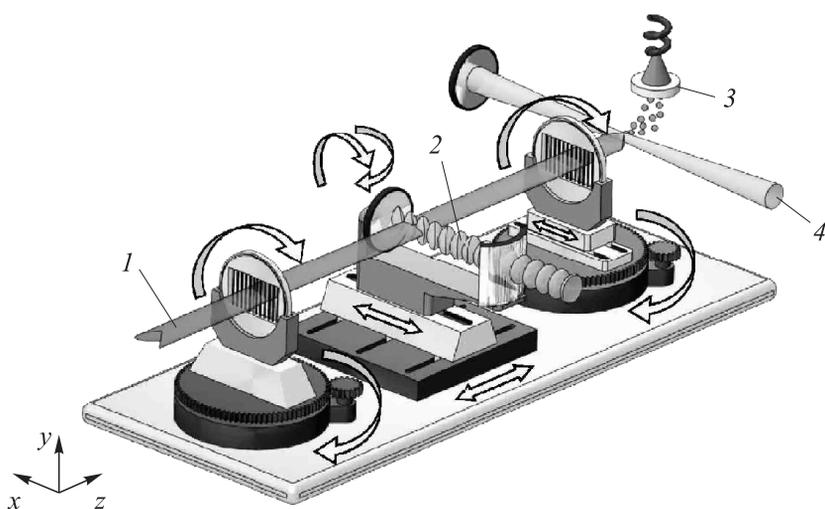


Рис. 5. Схема интерферометра Капицы – Дирака – Тальбота – Лоу:

1 – молекулярный пучок; 2 – стоячая световая волна; 3 – ионный детектор; 4 – ионизирующий лазер

Эксперименты, выполненные с ИКДТЛ (рис. 6) [7], показали, что исследуемые молекулы проявляют волновые свойства независимо от того, имеют ли они шарообразную (C_{70}) или протяженную ($C_{30}H_{12}F_{30}N_2O_4$) форму. При длине молекулы $C_{30}H_{12}F_{30}N_2O_4$, равной 3,2 нм, соответствующая ей длина волны де Бройля, определенная экспериментально, составила $\lambda_{дБ} = 4,2$ пм, т. е. почти в 1 000 раз меньше размеров самой молекулы.

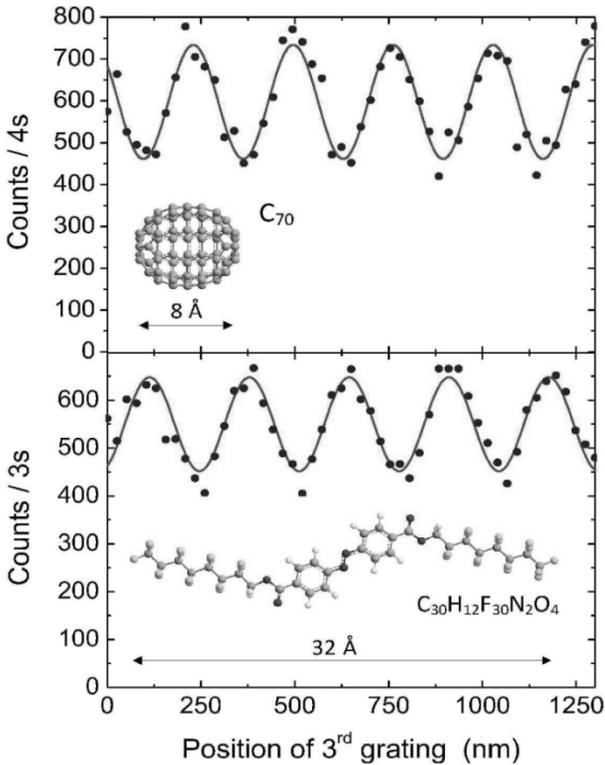


Рис. 6. Интерференция крупных молекул в ИКДТЛ. Зависимость интенсивности интерференционной картины от положения третьей решетки [7]

Все параметры используемой в этом эксперименте установки подходят для исследования пучков более тяжелых молекул, массы которых достигают 11 000 а.е.м., а скорости примерно равны 50 м/с. Эксперименты по когерентному рассеянию столь сложных объектов представляют интерес для изучения перехода от квантовой к классической физике, для измерения характеристик молекул (молекулярной метрологии), а также были предложены для проверки новых моделей пространства – времени.

В работе [4] на экспериментальной установке исследованы кластеры Au_{5000} при криогенных температурах около 10 К. В этом случае видность интерференционной картины достигает 40 % для масс $m \approx 10^6$ а.е.м., скоростей $v_z \approx 1$ м/с и разброса по массам или скоростям до 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. *Квантовая физика: учеб. пособие*. 4-е изд. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 528 с.
- [2] Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Физические основы нанотехнологий в техническом университете. *Наноинженерия*, 2011, № 2, с. 39–42.

- [3] Grisenti R., W. Schollkopf J. Toennies C. Hegerfeldt, Kohler T. Determination of Atom-surface van der Waals Potentials from Transmission-grating Diffraction Intensities. *Phys. Rev. Lett.*, 1999. vol. 83, pp. 1755–1758.
- [4] Paturski K. The Self-imaging Phenomenon and its Applications. *Progress in Optics*, 1989. vol. 27, pp. 3–108, E. Wolf, ed., North-Holland, Amsterdam.
- [5] Brezger B., Hackermuller L., Uttenthaler S., Petschinka J., M. Arndt, Zeilinger A. Matter-wave Interferometer for Large Molecules. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88(10), 100404.
- [6] Hackermuller, L., Uttenthaler S., Hornberger K., Reiger E., Brezger B., Zeilinger A., Arndt M. Wave Nature of Biomolecules and Fluorofullerenes. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, vol. 91(9), 090408.
- [7] Gerlich S., Hackermuller L., Hornberger K., Stibor A., Ulbricht H., Gring M., Goldfarb F., Savas T., Muri M., Mayor M., Arndt M. A Kapitza – Dirac – Talbot – Lau Interferometer for Highly Polarizable Molecules. *Nature Physics*, 2007, vol. 3, pp. 711–715.

Статья поступила в редакцию 05.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Смирнов Е.В. Волновая природа материи: от дифракции частиц на кристаллах до интерферометра Капицы – Дирака – Тальбота – Лоу. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/874.html>

Смирнов Евгений Васильевич окончил МФТИ в 1972 г. Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: взаимодействие излучения с веществом, дифракция мессбауэровского излучения на кристаллах, квантовая физика, физические основы нанотехнологий. Автор более 90 публикаций. e-mail: seva09@rambler.ru