

Национальный исследовательский университет
Высшая Школа Экономики

курс-майнор 2017-2018 уч.года
«Квантовая физика 'для чайников'»

В.Н.Глазков

Лекция 4

Что и откуда мы знаем про устройство атома.
Волны де Бройля и модель Бора.

Оглавление

Введение: забе́гая впе́ред (и огля́дываясь наза́д).....	4
Гипоте́за о волна́х де Бройля.....	4
Экспе́рименты, позво́лившие устано́вить стро́ение ато́ма.....	5
Опы́т Лангмю́ра. Определе́ние разме́ра молеку́лы.....	5
Атомный си́ловой микроско́п.....	7
Опы́ты Фраунго́фера, Кирхго́фа и Бунзе́на. Спектроско́пия химиче́ских эле́ментов.....	9
Характери́стическое рентге́новское излу́чение. Рентгеноактивацио́нный и рентге́ноструктурный анали́з.....	12
Опы́ты Томсо́на: откры́тие электрона.....	15
Опы́ты Резерфо́рда по рассея́нию альфа-части́ц: существова́ние массивного я́дра.....	16
Опы́ты Рамзауэ́ра-Таунсе́нда: опреде́ление разме́ра ато́ма.....	17
Опы́ты Асто́на: дискретно́сть массы́ я́дер.....	19
Ускори́тельные экспе́рименты по опреде́лению разме́ра я́дра.....	20
Моде́ль Бо́ра водородоподо́бного ато́ма.....	21

Список литературы

- 1: L. de Broigle, Waves and Quanta, 1923
- 2: Irving Langmuir, Surface Chemistry (Nobel Lecture), 1932,
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1932/langmuir-lecture.html
- 3: Irving Langmuir, The Shapes of Group Molecules Forming the Surfaces of Liquids, 1917
- 4: Scott Milam @ youtube.com, Chemistry lab oleic acid, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=M0Hemmj1nTg>
- 5: wikipedia.org, Atomic force microscopy, ,
http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy
- 6: EP6, University of Augsburg, AFM images gallery, 2012, http://www.physik.uni-augsburg.de/exp6/imagegallery/afmimages/afmimages_e.shtml
- 7: Intertech Corporation, AFM Images, 2012, www.intertech-corp.ru
- 8: Dr. Alan J. Jircitano (PennState), Click on the symbol of an element to see its atomic emission spectrum, 2017, <http://chemistry.bd.psu.edu/jircitano/periodic4.html>
- 9: UNC Charlotte Observatory, Atomic spectra lab: spectra ID, 2017,
<https://observatory.uncc.edu/atomic-spectra-lab-spectra-id/>
- 10: NASA, Astronomy Picture of the Day (2000 August 15): The Solar Spectrum , 2017,
<https://apod.nasa.gov/apod/ap000815.html>
- 11: wikipedia.org, Joseph von Fraunhofer, 2017,
https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph_von_Fraunhofer
- 12: wikipedia.org, Энергия ионизации, 2016, https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергия_ионизации
- 13: wikipedia.org, Electromagnetic spectrum, 2016,
https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum
- 14: wikipedia.org, Тормозное излучение, 2016, <http://en.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung>
- 15: University of Wisconsin–Madison, EPMA History - Some documents and oral history links (в т.ч. о работах Г.Мозли), 2016, <http://www.geology.wisc.edu/~johnf/g777/EPMA-history.html>
- 16: wikipedia.org, Crookes tube, 2017, https://en.wikipedia.org/wiki/Crookes_tube
- 17: H. Geiger and E. Marsden, On a Diffuse Reflection of the α - Particles., 1909
- 18: chemteam.info, Rutherford's Experiment - Part II: The Paper of 1911, 2016,
<http://www.chemteam.info/AtomicStructure/Rutherford-Model.html>
- 19: E. Rutherford, The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom, 1911
- 20: S.G.Kukolich, Demonstration of the Ramsauer-Townsend effect in a Xenon Tyatron, 1968
- 21: Нобелевский комитет, Официальный сайт Нобелевского комитета (информация о лауреатах, Нобелевские лекции), , www.nobelprize.org
- 22: wikipedia.org, Semiconductor device fabrication, 2017,
https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_device_fabrication

Введение: забегая вперёд (и оглядываясь назад)

Наш курс не преследует своей целью ни логически строгое, ни исторически последовательное описание квантовой физики. За более чем 100 лет развития квантовой теории ее результаты уже во многом вошли в наше привычное понимание мироустройства, так, что представить себе накал обсуждений между сторонниками корпускулярной и волновой теории света, например, нам покажется невозможным. Тем не менее, основной целью этого курса является демонстрация того, что наши знания о квантовой физике (то есть, в основном, о физике микромира) не являются догматами, а основаны на вполне понятных наблюдениях.

Основная цель этой лекции — рассмотрение набора экспериментов, на основании которых сформировалось знание об устройстве атома.

Гипотеза о волнах де Бройля

На предыдущих лекциях мы рассмотрели ситуации, когда проявляются квантовые свойства излучения. В частности, как мы увидели, в некоторых случаях (эффект Комптона), взаимодействие излучения с веществом описывается языком похожим на язык обычной механики. Квант излучения рассматривается как объект с определёнными энергией и импульсом, а процесс рассеяния рассматривается исключительно в рамках решения уравнений, возникающих из законов сохранения энергии и импульса.

Де Бройль в своей работе 1923 года «Волны и кванты» [1] предположил существование некоторых волновых свойств у «нормальных» тел, движение которых описывалось ранее только классической механикой.

Интересно отметить, что сами рассуждения де Бройля опирались на идеи теории относительности Эйнштейна. Его рассуждения, таким образом, оказываются верны и для классических, и для релятивистских частиц. Результат рассуждений де Бройля заключался в том, что с каждой частицей связана некоторая форма волнового процесса с характерной длиной волны $\lambda = \frac{h}{p}$, где p — импульс частицы. На следующей лекции мы увидим, что это предположение находит полное подтверждение в экспериментах, аналогичным экспериментам волновой оптики: в опытах по дифракции и интерференции частиц. Позднее мы увидим, что эта гипотеза теперь входит в формализм квантовой механике и не является независимым предположением. Для целей сегодняшней лекции «примем на веру» это предположение.

В качестве дополнительных соображений, позволяющих легче принять эту гипотезу, вспомним, чему равен импульс фотона: $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$. Это выражение аналогично предположению гипотезы де Бройля. Кроме того, можно заметить, что с учётом релятивистских эффектов энергия частицы с импульсом p равна $E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$. Для ультрарелятивистской частицы $pc \gg mc^2$ и $E \approx pc$, что совпадает со связью энергии и импульса у фотона. Следовательно, с точки зрения релятивистской механики фотон и ультрарелятивистская частица ничем принципиально не отличаются (при записи механических законов сохранения). Поэтому приписывание такой частицы характеристики,

аналогичной длине волны фотона является вполне логичным.

Таким образом, по гипотезе де Бройля, движение материального тела может быть описано как движение некоторого волнового пакета с характерной длиной волны $\lambda = h/p$. Эта гипотеза приписывает частицам волновые свойства. В частности, из неё сразу следует противоречащее классическому «здоровому смыслу» заключение о возможности наблюдения дифракционных и интерференционных явлений в опытах с частицами. Однако чрезвычайная малость постоянной Планка показывает, почему таких явлений не наблюдается «в быту»: для тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, дебройлевская длина волны оказывается $6 \cdot 10^{-34}$ м.

В настоящий момент волновые свойства частиц являются естественной частью физической картины мира. Они непосредственно включены в математический формализм квантовой физики (формализм волновой функции). А Луису Виктору Пьеру Раймону, будущему седьмому герцогу Бройль (1960), первому шагнувшему в этом направлении, в 1929 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

Эксперименты, позволившие установить строение атома

Опыт Лангмюра. Определение размера молекулы

Представление об атоме, как о мельчайшей частице вещества можно проследить до античных времён. Не забегая так далеко, вспомним, что представление о молекулах, как о «коллективах» атомов разных типов к середине 19 века было установлено в физике и химии и дальнейших сомнений не вызывало. Наша цель сейчас, понять откуда была получена информация о разных характеристиках атома: в первую очередь об его размере и внутреннем устройстве.

Один из самых простых опытов, позволяющих, буквально, оценить размер атома при помощи линейки был поставлен Ирвингом Ленгмюром¹, нобелевским лауреатом по химии 1932 года («за открытия и исследования в области химии поверхности») [2][3]. Сам этот опыт довольно известен, его видеоролики легко могут быть найдены в сети интернет, например [4]. В этом опыте на поверхность воды выпускается капля олеиновой кислоты $C_{17}H_{33}COOH$. Эта кислота в воде не растворима, но молекула олеиновой кислоты содержит гидрофильную группу $COOH$. В результате на поверхности воды длинные молекулы $C_{17}H_{33}COOH$ выстраиваются «столбиками», причём, при малом количестве кислоты (и достаточно большой доступной поверхности), олеиновая кислота растекается мономолекулярным слоем (рисунок 1). Если знать исходный объём концентрированной кислоты V и её массу M , то, измерив площадь мономолекулярного пятна S можно оценить характерный поперечный (a) и продольный (l) размеры молекулы:

$$a^2 \approx \frac{S}{N} = \frac{S}{N_A \times (M/\mu)} \quad .$$

$$l \approx V/a^2$$

1 Irving Langmuir (1881-1957)



Рисунок 1 Светлая область в центре (границы обведены красным пунктиром для наглядности) — мономолекулярный слой олеиновой кислоты. Матовая область по периметру — покрытая мелким порошком мела поверхность чистой воды. Из видеоролика [4].

Результаты таких опытов из работы Ленгмюра [3] приведены в таблице на рисунке 2. Видно, что характерный поперечный размер молекулы измеряется несколькими ангстремами ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{ м} = 0.1\text{ нм} = 10^{-8}\text{ см}$), а типичная длина молекулы в несколько раз больше.

TABLE 1
CROSS SECTIONS AND LENGTHS OF MOLECULES

SUBSTANCE	M	CROSS SECTION a	\sqrt{a}	LENGTH τ
		<i>sq. cm.</i> $\times 10^{-16}$	<i>cm.</i> $\times 10^{-8}$	<i>cm.</i> $\times 10^{-8}$
Palmitic acid $C_{15}H_{31}COOH$	256	24	4.9	19.6
Stearic acid $C_{17}H_{35}COOH$	284	24	4.9	21.8
Cerotic acid $C_{25}H_{51}COOH$	396	25	5.0	29.0
Cetyl alcohol $C_{16}H_{33}OH$	242	21	4.6	21.9
Myricyl alcohol $C_{30}H_{61}OH$	536	29	5.4	35.2
Tristearin $(C_{18}H_{35}O_2)_3C_3H_5$	891	69	8.3	23.7
Cetyl palmitate $C_{15}H_{31}COOC_{16}H_{33}$	482	21	4.6	44.0
Oleic acid $C_{17}H_{33}COOH$	282	48	6.9	10.8
Triolein $(C_{18}H_{33}O_2)_3C_3H_5$	885	145	12.0	11.2
Trioleidin $(C_{18}H_{33}O_2)_3C_3H_5$	885	137	11.7	11.9
Ricinoleic acid $C_{17}H_{32}(OH)COOH$	297	90	9.5	5.8
Linoleic acid $C_{17}H_{31}COOH$	280	47	6.9	10.7
Linolenic acid $C_{17}H_{29}COOH$	278	66	8.1	7.6
Castor oil $(C_{17}H_{32}(OH)COO)_3C_3H_5$	929	280	16.8	5.7
Linseed oil $(C_{17}H_{31}COO)_3C_3H_5$	875	143	11.9	11.0

Рисунок 2 Результаты измерения размеров молекул в опытах Ленгмюра. Первый столбец — исследуемое вещество, второй — молярная масса (г/моль), третий — оцененное поперечное сечение (в единицах 10^{-16} см²), четвертый — характерный поперечный размер (в единицах 10^{-8} см, т.е. в единицах Å), пятый — оцененная длина молекулы (в единицах 10^{-8} см, т.е. в единицах Å). Из статьи [3].

Таким образом, даже простые эксперименты показывают, что размеры атома должны быть порядка ангстрема. Подчеркнем, что этот размер оказывается далеко за пределами нашего «житейского здравого смысла», поэтому нет ничего невероятного и невообразимого, что при описании свойств атома проявляются неклассические законы физики.

Атомный силовой микроскоп.

Интересным и наглядным проявлением взаимодействия атомов является работа атомного силового микроскопа [5]. В этом приборе измеряется сила взаимодействия атомов на острие сканирующей иглы с атомами исследуемой поверхности. Для измерения этой силы игла устанавливается на конце гибкой микроконсоли. В первых экспериментальных приборах это был микроосколок алмаза, установленный на золотой фольге. В современных версиях (выпускаемых коммерчески) консоль с иглой обычно формируется литографическими методами из кремния или его соединений (рисунки 3, 4).

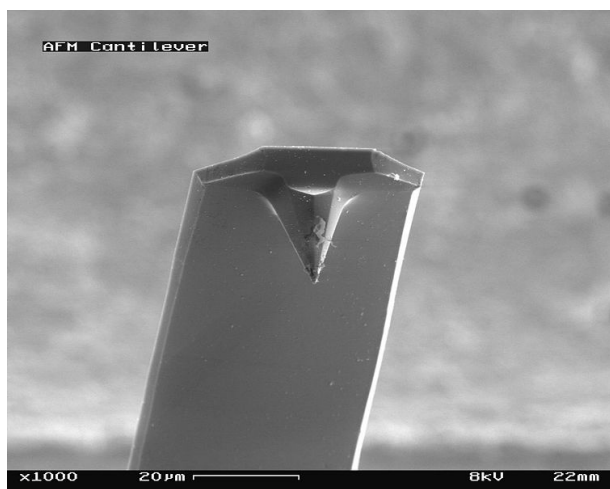


Рисунок 3: Изображение иглы атомного силового микроскопа. С сайта [5].

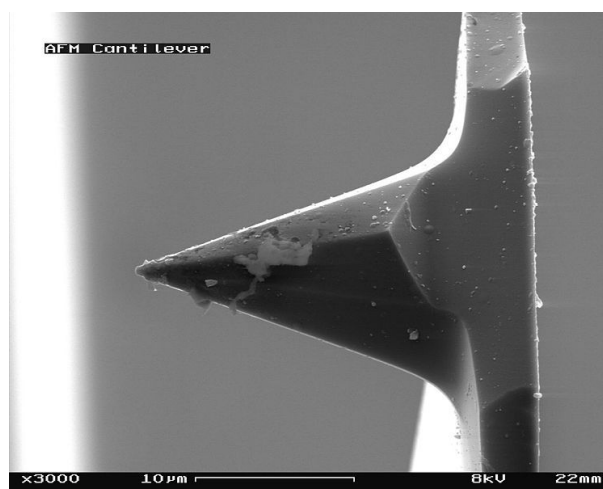


Рисунок 4: Изображение иглы атомного силового микроскопа. С сайта [5].

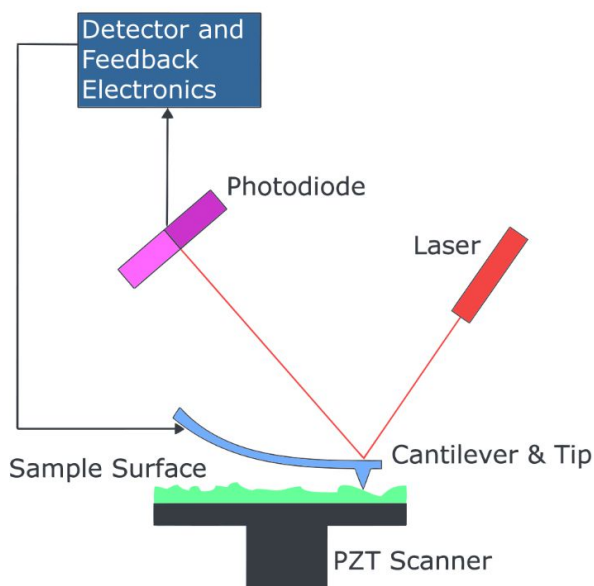


Рисунок 5: Схема работы атомного силового микроскопа. С сайта [5].

Конец иглы подводится к поверхности исследуемого образца так близко, что он начинает чувствовать межатомные вандерваальсовы силы (расстояние до поверхности порядка 1-10 нм). Можно сказать, что острие иглы практически находится в контакте с поверхностью. Возникающая под действием сил взаимодействия иглы и поверхности деформация консоли детектируется, например, при помощи отклонения направленного на консоль луча лазера (рисунок 5).

Передвигая иглу вдоль образца (обычно это делается при помощи пьезоэлементов, изменяющих свою длину под действием приложенного электрического напряжения) и поддерживая постоянным расстояние между иглой и поверхностью (поддерживая постоянную деформацию консоли), можно получить карту

поверхности («поверхность постоянной силы») с разрешением порядка нанометра или даже лучше. Если на иглу поместить молекулы одного сорта, а на поверхность — молекулы другого сорта, то можно с большой чувствительностью измерить взаимодействие этих молекул (рисунок 8), что имеет принципиальное значение для задач физики длинных молекул: полимеров, ДНК.

Ниже представлен набор изображений разных систем, полученных атомным силовым микроскопом [6][7]. Цвет на этих рисунках подобран компьютером, его интенсивность или изменение соответствуют изменению уровня поверхности. Обратите внимание, что поперечный размер молекул (рисунок 7) или межатомное расстояние на изображении поверхности с атомным разрешением (рисунок 6) оказываются также порядка нескольких ангстрем.

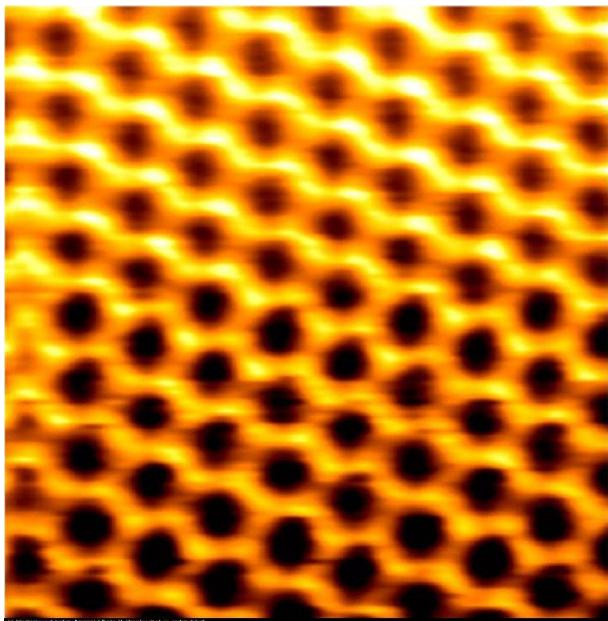


Рисунок 6: Изображение поверхности графита, полученное при помощи атомного силового микроскопа. Размер кадра 2×2 нм². С сайта [6].

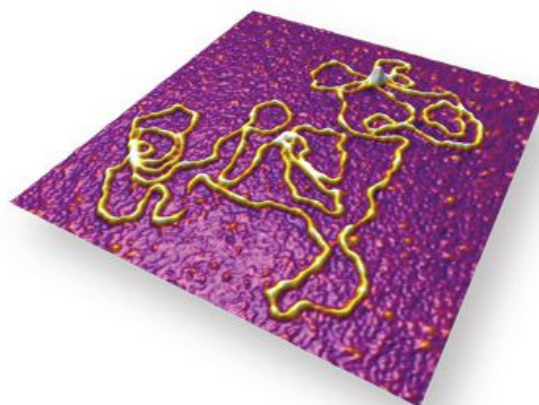


Рисунок 7: Изображение молекулы ДНК, полученное атомным силовым микроскопом. Размер области сканирования 530 нм. С сайта [7].

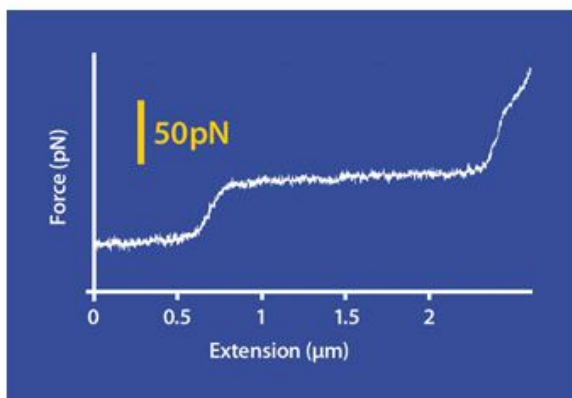


Рисунок 8: Зависимость силы межмолекулярного взаимодействия от расстояния для молекулы ДНК. С сайта [7].

Опыты Фраунгофера, Кирхгофа и Бунзена. Спектроскопия химических элементов

Мы уже упоминали в первой лекции, что одним из необъяснимых в классической физике наблюдений было появление дискретных (линейчатых) спектров излучения и поглощения. Спектры поглощения возникают при пропускании «белого» света через разреженный газ или через пары химических элементов или их соединений, спектры излучения — при свечении нагретых газов и паров. Для одного и того же вещества линии поглощения и линии излучения точно совпадают. При этом довольно быстро было установлено, что набор линий

спектра является точным «отпечатком пальца» этого вещества, что позволило использовать спектры для химического анализа. Наглядная интерактивная презентация спектров различных элементов представлена на сайте [8], пример нескольких спектров [9] показан на рисунке 9.

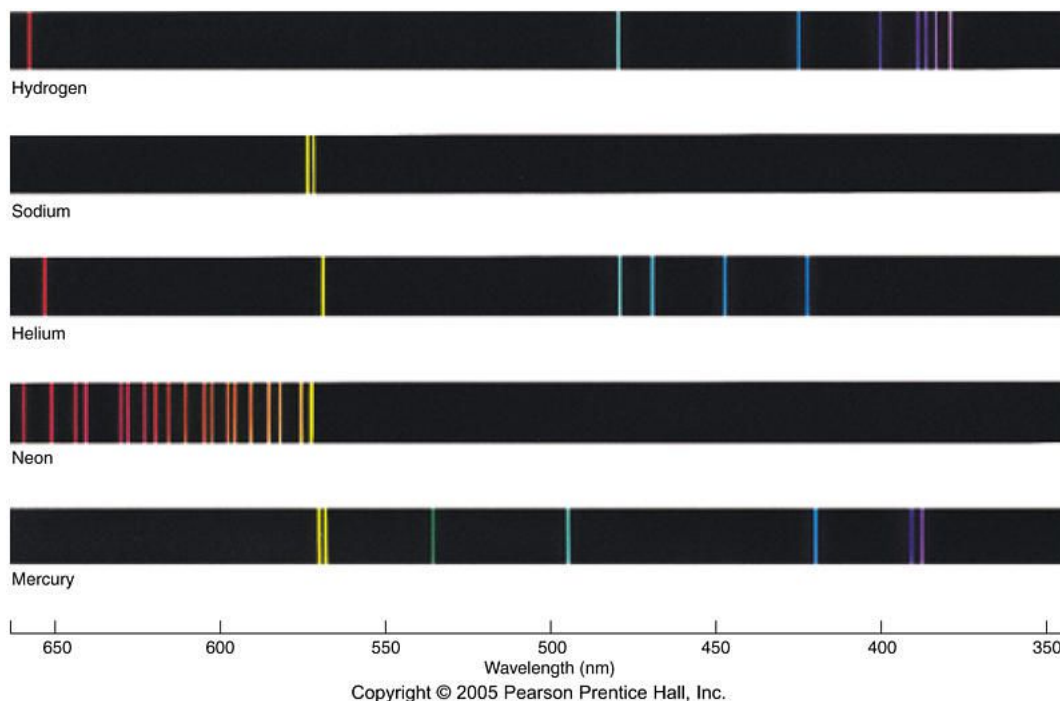


Рисунок 9 Спектры излучения некоторых элементов. С сайта [9].

Эта индивидуальность спектра элементов делает (эмпирически, независимо даже от нашего понимания происхождения этих линий) спектральный анализ мощным методом обнаружения химических элементов как в лабораторных условиях, так и в астрофизике. Пример спектра Солнца с многочисленными тёмными линиями [10] (линиями Фраунгофера [11]) показан на рисунке 10. Не вдаваясь в детали, отметим, что анализ спектров астрономических объектов позволяет определить элементный состав внешних слоёв² далёких звёзд, состав атмосферы экзопланет, а смещение спектральных линий из-за эффекта Доплера позволяет получить информацию о скорости движения астрономических объектов. Таким образом, этот эффект (квантовый эффект, как мы увидим в дальнейшем) оказывается мощным и удобным инструментом физики и химии.

2 Более плотные внутренние слои звезды формируют раскалённый шар плазмы, излучение которого соответствует излучению абсолютно чёрного тела. Хорошо определённые фраунгоферовы линии возникают при прохождении этого непрерывного излучения через разреженные газы внешних слоёв.

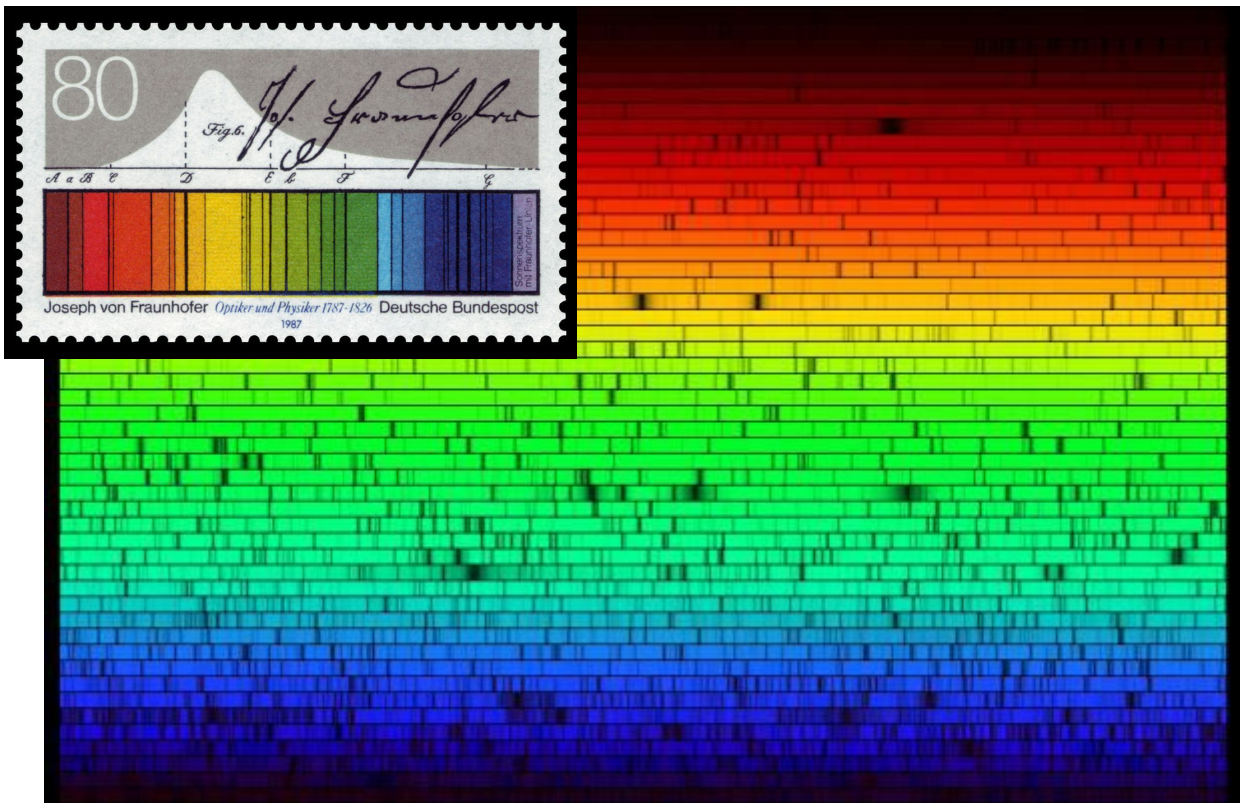


Рисунок 10 Основной рисунок — спектр Солнца с линиями Фраунгофера. С сайта [10]. На вставке — памятная марка ФРГ (1987 год), воспроизводящая оригинальный рисунок Фраунгофера. С сайта [11].

Положение линий спектра водорода удивительным образом оказалось возможно описать простой эмпирической формулой Ридберга: $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right)$. Здесь R_H — постоянная

Ридберга для водорода, равная 109737 см^{-1} , а целое число n_0 принимает разные значения для разных серий: $n_0=2$ для серии Бальмера (видимые линии спектра водорода, рисунок 9), 1 — для серии Лимана (ультрафиолетовая часть спектра), 3 — для серии Пашена, 4, 5 и 6 — для серий Бракетта, Пфунда и Хэмпфри, соответственно (инфракрасный спектр).

Наблюдаемые линии спектра в видимой области спектра имеют длину волны 400-600 нм. Найдём энергию кванта света с длиной волны 500 нм для оценки:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{500 \times 10^{-9}} \text{ Дж} = 4 \times 10^{-19} \text{ Дж} = 2.5 \text{ эВ} .$$

То есть, характерные порции энергии, которые описывают атомную физику имеют масштаб электронвольт. Поэтому тот же масштаб энергии (единицы и десятки электронвольт) является типичным для всех процессов, связанных с внешними электронами атомов: ионизации (рис. 11, [12]), формирования химической связи.

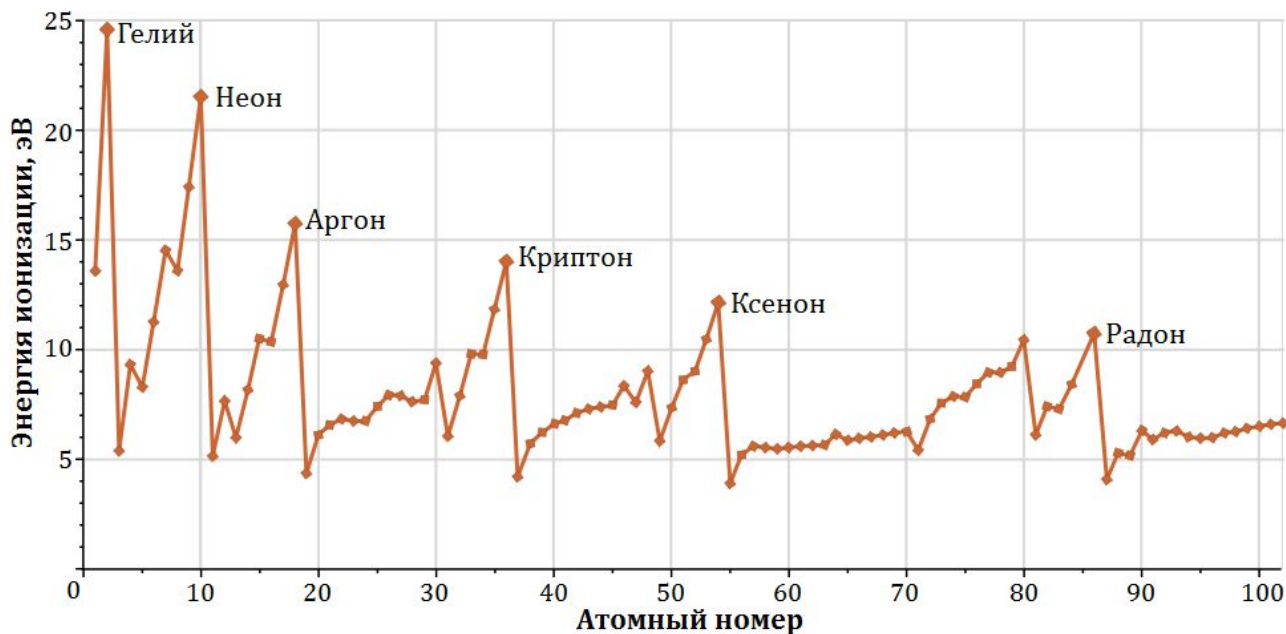


Рисунок 11: Зависимость энергии ионизации от атомного номера элемента. С сайта [12].

Вспомним теперь про гипотезу де Бройля и оценим длину волны для электрона с энергией несколько электронвольт (2 эВ для удобства вычисления):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 10^{-30} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2}} \cdot m = 0.8 \times 10^{-9} \cdot m = 8 \text{ \AA} .$$

Получилась величина близкая к оцененному ранее размеру молекул. Это означает, что вообще говоря электрон внутри атома должен быть сильно делокализован — на вопрос о том где начинается волна можно ответить только с точностью порядка длины волны.

Характеристическое рентгеновское излучение. Рентгеноактивационный и рентгеноструктурный анализ.

Полный же спектр электромагнитного излучения гораздо шире видимого диапазона [13]: он включает как более длинноволновое излучение (с менее энергичными квантами) в инфракрасной части спектра или даже в области радиоволн, так и коротковолновое (с более энергичными квантами) ультрафиолетовое и рентгеновское излучение (рисунок 12).

Традиционным лабораторным источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, в которой поток электронов бомбардирует анод-мишень. При торможении электрона в мишени в полном соответствии с законами электродинамики ускоренно движущийся электрон излучает непрерывный спектр излучения (так называемое тормозное излучение [14]). Согласно закону сохранения энергии максимальная частота фотона равна энергии электрона $h\nu = E = eU$. Типичное значение ускоряющей разности потенциалов U составляет 20-150кВ. Однако оказалось, что помимо непрерывного спектра тормозного излучения наблюдаются резкие пики интенсивности излучения (рисунок 13). Энергии и относительные интенсивности различных линий специфичны для разных элементов и изотопов (за обнаружение чего, в частности, была присуждена Нобелевская премия по физике 1917 года Ч.Г.Баркла, и в 1924 году К.М.Г.Зигбану), что позволяет использовать их для идентификации элементов (рисунок 14). Эти спектральные линии называют характеристическим рентгеновским излучением, оно впервые было обнаружено Г.Мозли в 1913 году (см., например, [15]). Это же свойство позволяет получать рентгеновское излучение определённой длины волны подбором материала анода, бомбардируемого электронами в рентгеновской трубке. Например, в широко используемой в простых кристаллографических приборах трубке с медным анодом получается излучение с энергией кванта 8.048 и 8.028 кэВ для близких линий К- α_1 и К- α_2 соответственно (длина волны около 1.5Å).

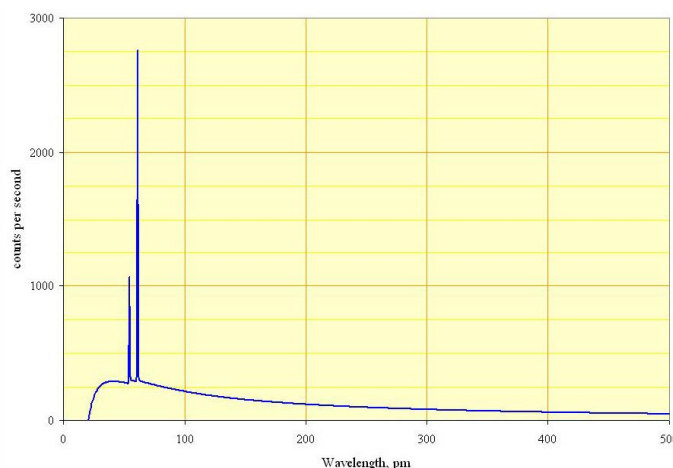
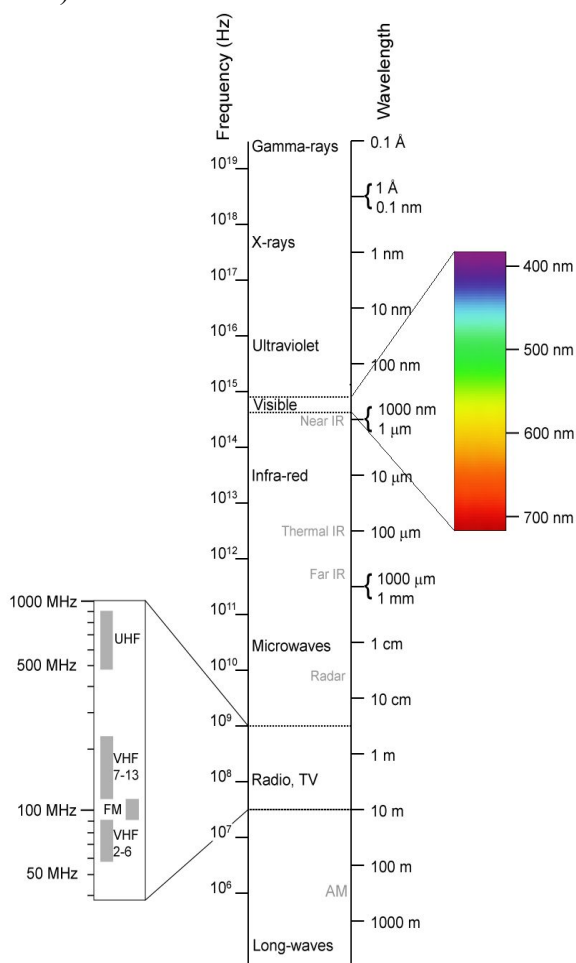


Рисунок 13: Спектр рентгеновского излучения в трубке с родиевым анодом при энергии электронов 60кэВ. С сайта [14].

Рисунок 12: Спектр электромагнитного излучения. С сайта [13].

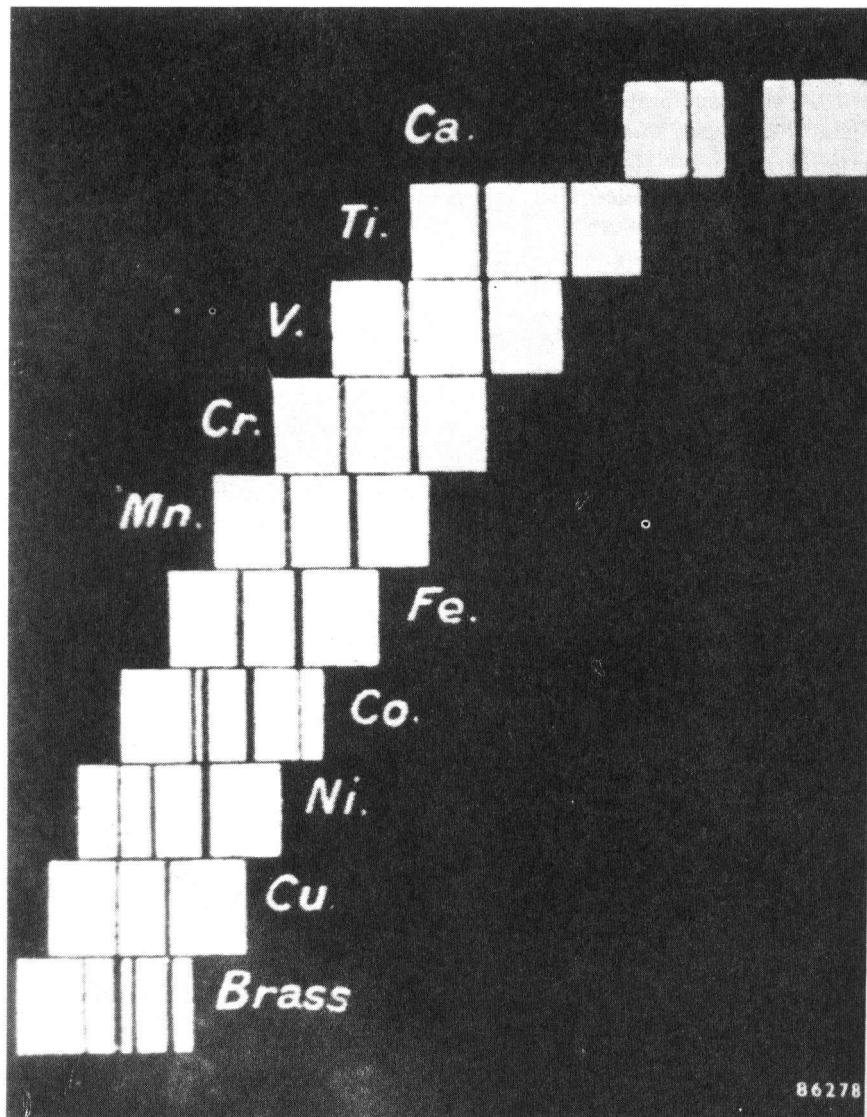


Рисунок 14: Серия фотопластинок с записью линий характеристического рентгеновского излучения разных материалов из работы Г.Мозли (1913). Пластинки смещены по горизонтали, чтобы положение линий соответствовало одной шкале длин волн, длина волны растёт слева направо. Обратите внимание на интенсивную линию меди в спектре характеристического излучения латуни (англ. brass, сплав меди и цинка). Линии с разной длиной волны разрешены благодаря дифракции на кристалле жёлтой кровяной соли $K_4[Fe(CN)_6]$. С сайта [15].

Отметим, что по методике получения энергия кванта рентгеновского характеристического излучения может быть с большой точностью определена по ускоряющей разности потенциалов, необходимой для получения этой линии. Тогда длина волны получаемого излучения равна (для ускоряющего напряжения 15 киловольт):

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{hc}{eU} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-19} \times 15 \times 10^3} \text{ м} = 0.8 \times 10^{-10} \text{ м} = 0.8 \text{ \AA} .$$

То есть, получаемое монохроматическое излучение имеет масштаб атомного размера и размера молекулы. Это позволяет использовать его в различных дифракционных

экспериментах. За первые опыты по дифракции рентгеновских лучей на кристаллах были присуждены нобелевские премии по физике 1914 (Макс фон Лауэ) и 1915 года (лауреатами стали отец и сын Вильям Генри Брэгг и Вильям Лоуренс Брэгг). В целях нашего рассказа важно отметить, что измерив картину дифракции (того, как отклонились волны, пройдя через дифракционную решётку) можно восстановить характеристики дифракционной решётки. Трёхмерный кристалл является трёхмерной дифракционной решёткой для рентгеновских лучей. Поэтому в опытах по дифракции таких лучей можно установить взаимное расположение атомов в кристалле — оказалось, что типичное межатомное расстояние в кристаллах составляет 2-3Å, что совпадает с ранее полученными результатами.

Таким образом, опыты с рентгеновским излучением подтверждают, что атом имеет размер порядка ангстрема. Кроме того, уникальность характеристических спектров позволяет использовать рентгеновскую спектроскопию для анализа элементного состава образцов (рентгеноактивационный анализ), а дифракция рентгеновского излучения позволяет изучать структуру кристаллов (рентгеноструктурный анализ).

Завершая рассказ о физике рентгеновского излучения, отметим один терминологический вопрос о различии рентгеновского и гамма-излучений. Это достаточно условное деление, часто гамма-излучением называют все электромагнитные волны с длиной волны менее 0.1 Å. Другим определением является следующее: рентгеновское излучение — это излучение, связанное с переходами между электронными уровнями энергии в атоме, а гамма-излучение — с переходами между ядерными уровнями. Эта разница, однако, чисто терминологическая и физически не принципиальна — и рентгеновское, и гамма-излучение являются электромагнитным излучением и с точки зрения физики полностью характеризуются длиной волны или, что то же самое, энергией кванта.

Опыты Томсона: открытие электрона

До конца 19 века считалось, что атом — это неделимый «элементарный кирпичик» материи. Дж.Дж.Томсон в 1897 году изучал поведение катодных лучей — обнаруженного ранее «излучения» исходящего от отрицательно заряженного электрода. Это «излучение» было обнаружено ранее и для его наблюдения использовались трубки Крукса [16]. Наблюдаемое в трубке свечение считалось новым видом лучей³, эти лучи отбрасывали тень на экране — обладали всеми свойствами обычных лучей (рисунок 15).

Однако Дж.Дж.Томсон после аккуратной постановки эксперимента (в первую очередь, достигнув достаточно высокого вакуума в своей лучевой трубке) обнаружил, что катодные лучи отклоняются магнитным полем (рисунок 15). Это означало, что катодные лучи состоят из заряженных (отрицательно, если проанализировать направление отклонения) частиц. Следовательно, в веществе содержатся и положительные, и отрицательные заряды.

За свои результаты Дж.Дж.Томсон был удостоен Нобелевской премии по физике 1906 года «за исследования прохождения электричества через газы».

3 Представление о новых видах излучения было распространено среди физиков, например при описании первых опытов по радиоактивности использовались слова «лучистая эманация радия». Да и сохранившаяся в языке терминология альфа-излучение и бета-излучение, относящаяся к испускаемым ядрами радиоактивных элементов частицам, сложилась в это время.

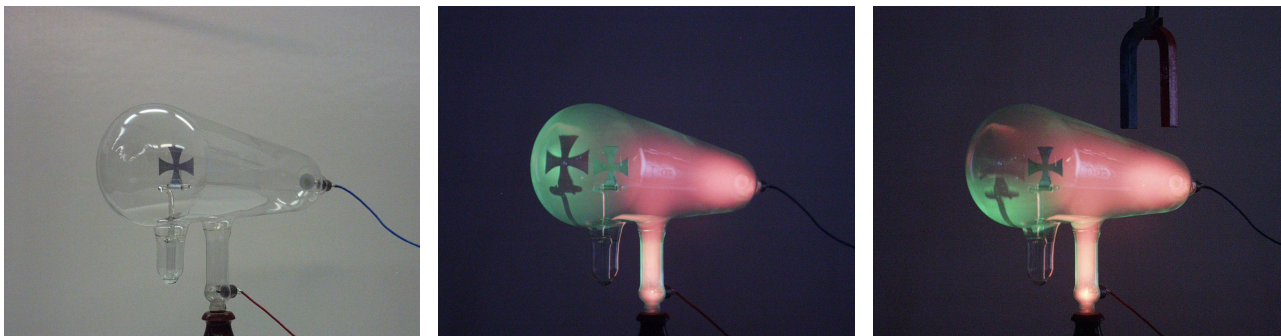


Рисунок 15 Трубка Крукса. Слева — без напряжения. В центре — приложено напряжение, на экране наблюдается «тень» от анода. Справа — смещение «тени» при поднесении магнита. С сайта [16].

Опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц: существование массивного ядра

Представление о распределении в атоме положительного и отрицательного зарядов было получено в классических опытах Резерфорда (также известные как опыты Гейгера и Марсдена) [17][18]. Это серия опытов, проведённых в лаборатории Резерфорда в Университете Манчестера. Сами опыты во многом проводились сотрудниками Резерфорда Хансом Гейгером и Эрнестом Марсденом, схемы двух таких опытов приведены на рисунках 16, 17 ниже.

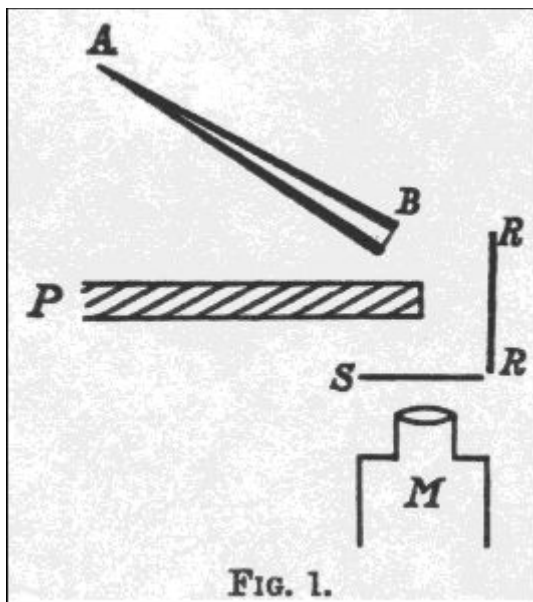


Рисунок 16: Опыт Гейгера-Марсдена (по статье [17]). АВ - трубка с источником альфа-частиц, P - свинцовый экран, RR - отражающая фольга, S - сцинтиляционный экран, M -микроскоп.

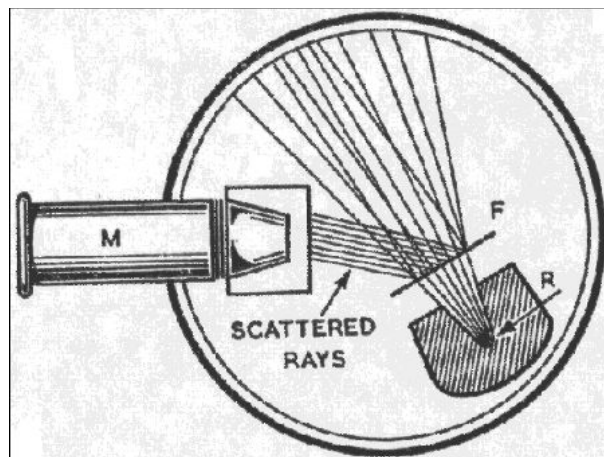


Рисунок 17: Разновидность опыта Резерфорда (с сайта [18]) R - источник радиации, F - фольга, M - микроскоп с сцинтиллирующим экраном.

В опытах изучалось рассеяние альфа-частиц на фольге из разных материалов (Al, Fe, Cu, Ag,

Sn, Pt, Au, Pb). Золото оказалось наиболее удобным материалом, так как позволяло изготавливать однородную очень тонкую фольгу (до $8,6 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 0,086 \text{ мкм}$).

Основные результаты этих опытов:

- почти все альфа-частицы проходили через фольгу, не отклоняясь от своего направления
- часть альфа-частиц отклоняется на небольшие углы $\sim 1^\circ$
- примерно 1 альфа-частица из 10000 (при толщине фольги в доли микрона) отклоняются на большой угол $\sim 90^\circ$

Резерфорд показал [19], что эти результаты могут быть объяснены в предположении, что существует компактное положительно заряженное ядро, взаимодействие с которым объясняет редкие процессы рассеяния на большой угол.

Опыты Рамзауэра-Таунсенда: определение размера атома

Немецкий физик Карл Рамзауэр и британский физик Джон Таунсенд в начале 20-х годов прошлого века независимо обнаружили, что при пропускании низкоэнергетичных электронов (электронов, ускоренных разностью потенциалов в несколько вольт) через разреженный газ электроны рассеиваются на молекулах газа. Это рассеяние (изменение направления распространения электронов) естественно в классической картине, где электроны и атомы — это «шарики». Поэтому возникновение связанного с этим рассеянием электрического сопротивления, ограничивающего электрический ток между катодом и анодом, довольно естественно. В этой классической картине ток между анодом и катодом должен плавно увеличиваться с ростом прилагаемого напряжения, так как ускоряемые электрическим полем электроны начинают двигаться быстрее и быстрее переносят заряд.

Однако на эксперименте (например, [20]) оказалось, что зависимость тока от напряжения немонотонна. Более того, при некотором значении ускоряющего напряжения ток резко возрастает — как будто электроны перестают рассеиваться на атоме, атомы становятся «прозрачными» для электронов (рисунок 18).

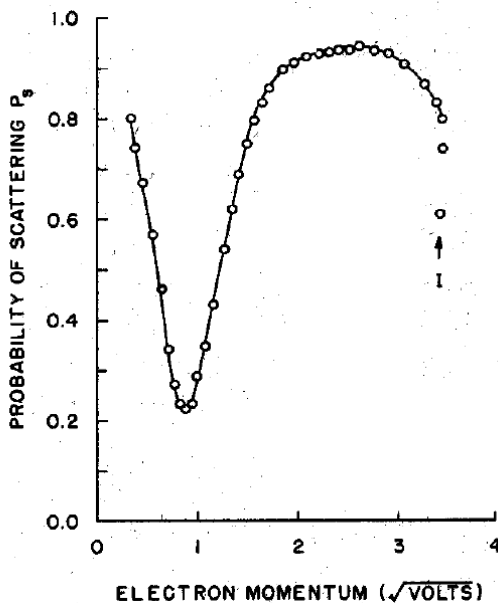
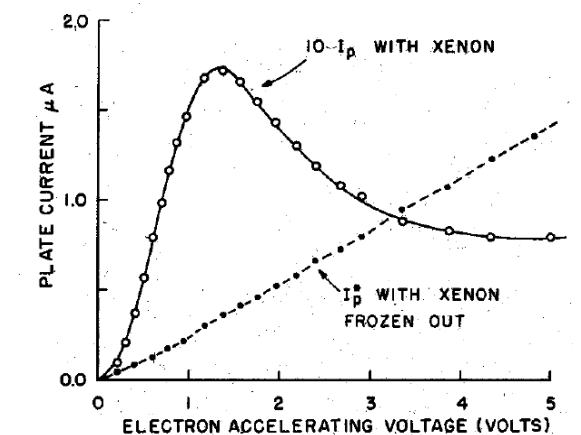
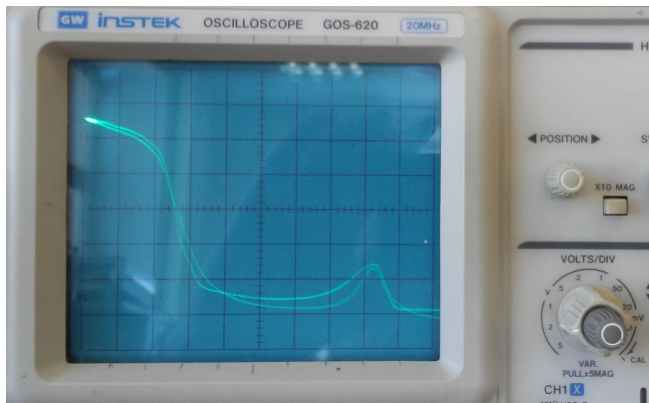


Рисунок 18 Наблюдение эффекта Рамзауэра-Таунсенда. Верхний ряд: вольт-амперные характеристики наполненной ксеноном лампы. Слева — лабораторная работа МФТИ, фото автора, справа — из работы [20]. Нижний ряд: рассчитанная по измеренной вольт-амперной характеристике вероятность рассеяния электрона на атоме, из работы [20].

Эта прозрачность может быть естественным образом объяснена при учёте волновых свойств электрона — она оказывается аналогична явлению просветления оптики, используемому для уменьшения бликов на объективах и даже стёклах очков: если покрыть стекло тонкой плёнкой, толщина которой подобрана так, что световые волны, отраженные от границы воздух-плёнка и от границы плёнка-стекло сложатся в противофазе, то отражённая от оптической системы волна будет подавлена. Для этого необходимо, чтобы разность хода этих двух волн составила половину длины волны.

Не вдаваясь в расчёты мы можем тогда для грубой оценки заметить, что наблюдаемое при ускоряющем напряжении около 1.5В (рисунок 18) «просветление» газа для электронных волн должно наблюдаться, если длина волны электрона окажется порядка атомного размера. Это позволяет ещё раз независимо измерить размер атома:

$$l \sim \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{h}{\sqrt{2meU}} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 10^{-30} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.5}} \approx 10^{-9} \text{ м} = 10 \text{ \AA}$$

То есть, опять получаем размер порядка нескольких ангстрем.

Опыты Астона: дискретность массы ядер

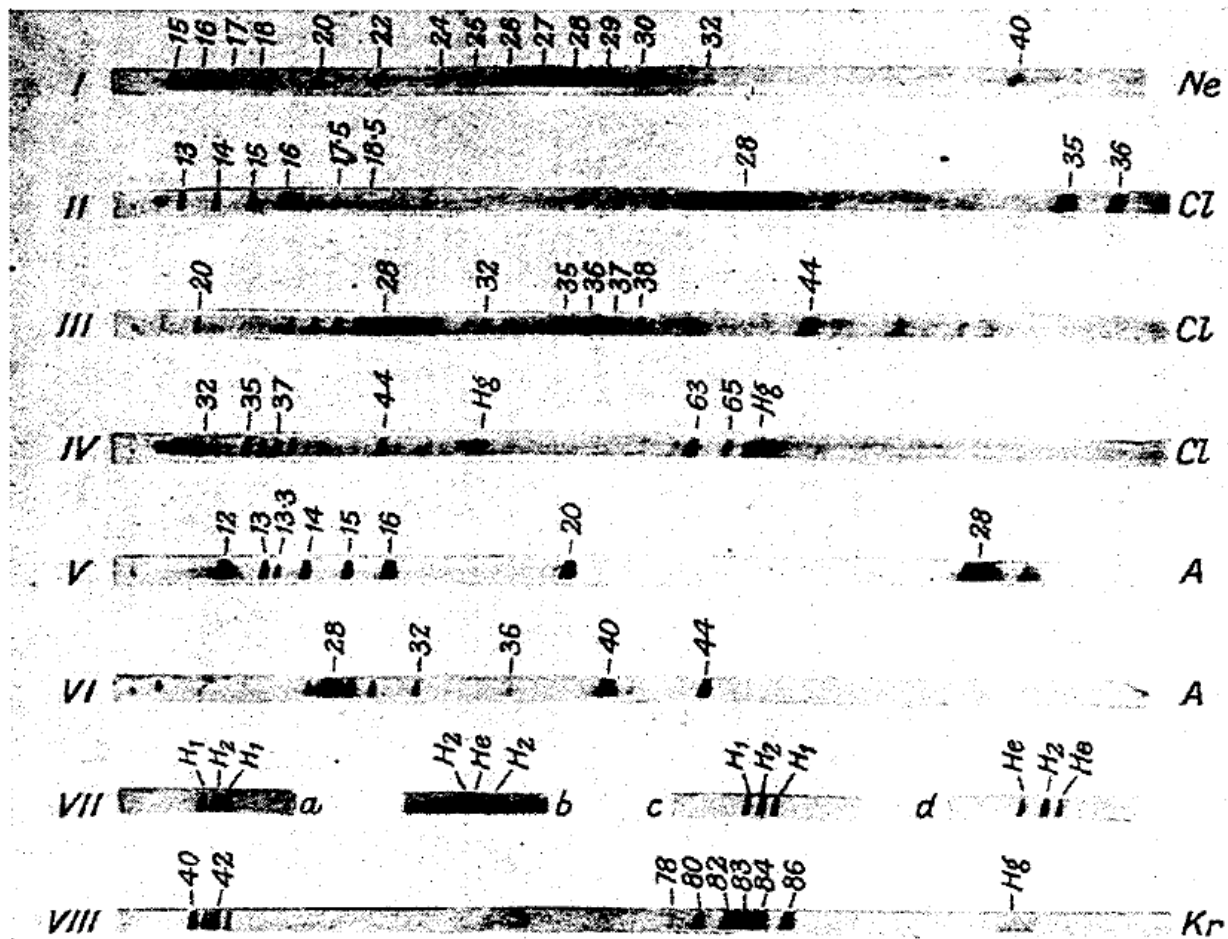


Рисунок 19 Масс-спектры некоторых элементов. Из нобелевской лекции Ф.Астона [21].

Вопрос о том, из чего состоит ядро после опытов Резерфорда оставался открытым. Опыты Ф.Астона по масс-спектрометрии различных изотопов показали, что массы атомов (то есть массы ядер, так как масса электрона примерно в 2000 раз меньше массы ядра атома водорода) с хорошей точностью кратны массе ядра атома водорода — протона (рисунок 19). Опыты Резерфорда в 1917-1919 годах показали, что при бомбардировке азота альфа-частицами образуются протоны, что свидетельствовало о том что протоны содержатся и в других ядрах (фактически, это первая описанная реакция ядерного синтеза $^{14}\text{N} + \alpha \Rightarrow ^{17}\text{O} + p$)

Поэтому место «кирпичика» в строении ядра занял протон — ядро атома водорода. Для компенсации лишнего положительного заряда в ядре предполагалось, что помимо электронов на орбитах часть электронов оказывается внутри ядра. Например, в нобелевской лекции Фрэнсиса Астона (1922 год), формулируется следующая модель строения ядра:

«Нейтральный атом элемента с атомным номером N имеет ядро, содержащее $K+N$ протонов и K электронов, и вокруг этого ядра вращаются N электронов».

С открытием нейтрона Джеймсом Чедвиком в 1932 году (нобелевская премия 1935 года)

стало ясно, что в ядре есть два сорта «кирпичиков»: положительно заряженный протон и не несущий заряда нейтрон.

Ускорительные эксперименты по определению размера ядра

Наконец, можно вспомнить результаты Р. Хофштадтера (нобелевская премия 1961 года [21]) по рассеянию высокоэнергетичных частиц, позволившие определить размеры ядер и посмотреть на распределение заряда в ядре (рисунок 20).

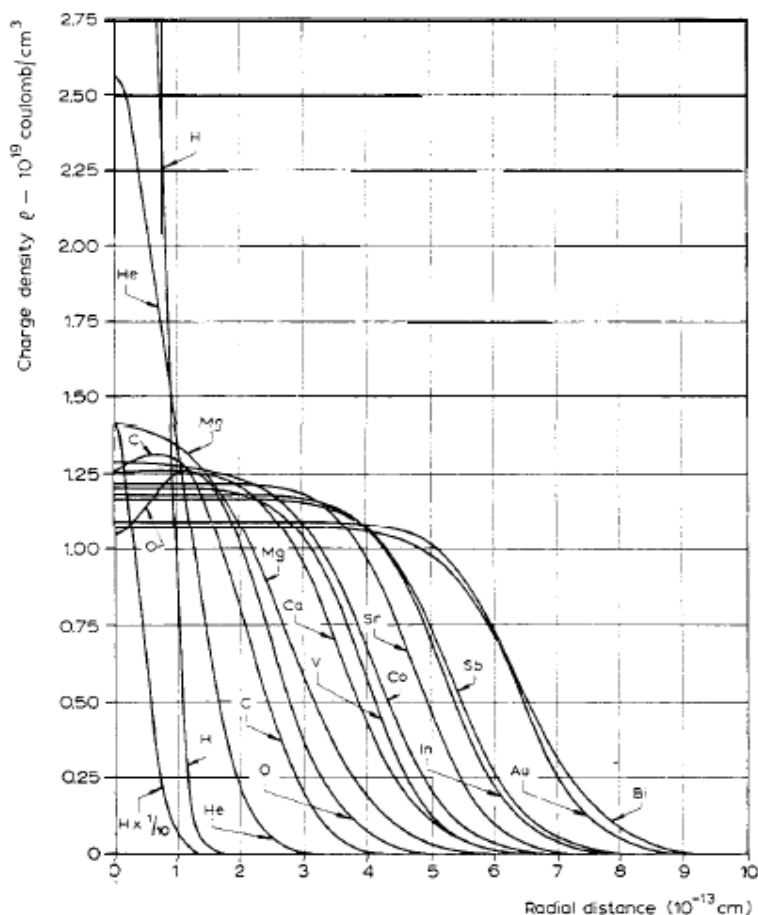


Рисунок 20: Распределение плотности заряда в ядрах разных элементов по результатам рассеяния высокоэнергетичных (~100МэВ) электронов. Из нобелевской лекции Р.Хофштадтера [21].

Напомним известное из оптики соображение — при освещении светом с длиной волны λ можно разглядеть только детали не мельче длины волны. Из-за этого оптического ограничения, например, современные технологии изготовления микросхем с размером элемента в десятки нанометров [22] используют для засветки фоторезиста не видимый свет, а ультрафиолет, рентгеновское излучение и электронные пучки. Поэтому для определения размера ядра нужно использовать частицы, у которых дебройлевская длина волны не меньше исследуемого размера.

Для нерелятивистских частиц $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{h}{mc} \sqrt{\frac{mc^2}{2E}} = \Lambda \sqrt{\frac{mc^2}{2E}}$, где Λ — комптоновская длина волны, для электрона равная 0.024 \AA . Отсюда видно, что для нерелятивистских частиц длина волны де Бройля не может быть сильно меньше комптоновской. Именно поэтому в опытах Хофштадтера использовались ускоренные до больших энергий (много больше энергии покоя электрона) частицы. Для релятивистских частиц связь энергии и импульса задаётся соотношением $E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$. так что $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{E^2 - (mc^2)^2}}$, для ультрарелятивистских ($E \gg mc^2$) частиц $\lambda \approx \frac{hc}{E} = \frac{h}{mc} \frac{mc^2}{E} = \Lambda \frac{mc^2}{E}$.

Таким образом, существует достаточно много экспериментальных наблюдений, на основании которых можно установить, что ядро атома — это компактное образование размером около $10^{-13} - 10^{-12} \text{ см}$ (то есть $10^{-5} - 10^{-4} \text{ \AA}$, в 10000 раз меньше размера атома), содержащее большую часть массы атома и состоящее в свою очередь из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов.

Модель Бора водородоподобного атома

Одним из парадоксов классической физики, с которого мы начали наш рассказ была невозможность существования планетарной модели атома с точки зрения классической электродинамики. Для объяснения этого парадокса Нильс Бор предположил существование стационарных состояний электронов в атоме, как некоторое дополнительное условие. Сам Нильс Бор в каком-то смысле угадал условия, определяющие стационарные состояния электрона в атоме. Однако, условия квантования Бора естественным образом следуют из гипотезы де Бройля, сам де Бройль именно этот аргумент считал главным обоснованием своей гипотезы — данные по дифракции частиц появились позже.

Итак, по гипотезе де Бройля с каждым электроном связан некоторый волновой процесс. Рассмотрим электрон, движущийся по круговой орбите. При каком условии это движение будет стабильным? С точки зрения гипотезы де Бройля ответ очевиден: если на траектории электрона уложится целое число дебройлевских волн. В этом случае возникнет стоячая волна, то есть состояние этого волнового процесса будет (в каком-то смысле) стационарным. Запишем это условие формально:

$$2\pi r_n = n\lambda = n \frac{h}{p_n}$$

$$r_n p_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

Далее остаётся записать механику движения электрона с зарядом $-e$ в поле ядра с зарядом $+Ze$:

$$\begin{aligned}
 m a_y &= k \frac{Ze^2}{r_n^2} \\
 m \frac{V^2}{r_n} &= k \frac{Ze^2}{r_n^2} \\
 p_n^2 r_n &= k m Ze^2 \\
 r_n &= \frac{(p_n r_n)^2}{k m Ze^2} = n^2 \frac{\hbar^2}{k m Ze^2} \\
 p_n &= \frac{k m Ze^2}{n \hbar} \\
 E_n &= \frac{p_n^2}{2m} - k \frac{Ze^2}{r_n} = -\frac{1}{2} \frac{k^2 m Z^2 e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2}
 \end{aligned}$$

Для атома водорода ($Z=1$) подстановкой можно получить значения минимальной энергии и минимального радиуса траектории ($n=1$):

- боровский радиус $r_1 = 0.53 \text{ \AA}$
- энергия основного состояния (постоянная Ридберга) $E_1 = -13.6 \text{ эВ}$.

Полученные значения находятся в соответствии с результатами экспериментов по определению размера атома и характерной энергии электрона в атоме.

Излучение и поглощение электромагнитного излучения атомом связано с переходом электрона между некоторыми стационарными состояниями. Выделяемая или поглощаемая энергия определяется законом сохранения:

$$h \nu_{mn} = |E_m - E_n| = |E_1| \cdot \left| \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right|.$$

Это соотношение естественным образом объясняет появление спектральных серий совпадает с угаданным Бальмером соотношением.

Можно убедиться, что квантовая теория излучения атома переходит в классическую при движении электрона по далёким орбитам с большими квантовыми числами n . Напомним, что по классической теории движущийся по окружности заряд должен непрерывно излучать на частоте своего вращения. Частота вращения электрона по n -ой орбите:

$$\nu_n^{(orb)} = \frac{1}{T_n} = \frac{V_n}{2\pi r_n} = \frac{1}{2\pi m} \frac{p_n}{r_n} = \frac{1}{2\pi m} \frac{(k m Ze^2)^2}{n^3 \hbar^3} = 2 \frac{|E_1|}{h n^3}$$

Частота перехода между уровнями n и $n-1$ при $n \gg 1$:

$$\nu_{n,n-1} = \frac{|E_1|}{h} \left| \frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n-1)^2} \right| = \frac{|E_1|}{h} \cdot \frac{2n-1}{n^2(n-1)^2} \approx 2 \frac{|E_1|}{h n^3}.$$

Получили совпадающие результаты. То есть, как и в других случаях, при переходе в область применимости классической физики, получаем результат классической физики. Это свойство типично для всякой правильно построенной научной теории: при переходе в область применения старой (менее общей) теории, новая (более общая) теория должна давать результат старой теории.

Наконец, отметим, что в многоэлектронном атоме можно считать, что внутренний электрон

движется в поле ядра. Тогда для внутреннего электрона сложного атома оказывается применима боровская модель и для наименьшей энергии такого электрона сразу получим

$E = -Z^2 E_1$. Для меди (заряд ядра 29) это даст примерно -13 кэВ. Этот масштаб энергий соответствует энергиям рентгеновских квантов и даёт качественное объяснение (а с минимальными поправками и количественное) характеристических рентгеновских линий: эти линии, как и оптические линейчатые спектры, связаны с переходами между уровнями электрона в атоме, но не с переходами внешних электронов, а с переходами внутренних электронов.

Завершая рассказ об атоме водорода отметим, что строго говоря интерпретация траектории электрона как некоторой стоячей дебройлевской волны как-то оправдана только при больших n . При больших значениях n и сам электрон можно считать относительно локализованным, что позволяет записать динамику в форме второго закона Ньютона, и нет необходимости объяснять а из-за чего собственно дебройлевской волне «захотелось» двигаться по кругу. Распространение результатов этой модели на область малых n — это, строго говоря, необоснованный оптимизм. Однако точное решение задачи об атоме водорода выходит за рамки нашего курса. Поэтому примем на веру утверждение, что оказывается, что и при малых n уровни энергии атома водорода описываются полученными нами формулами. И конечно же вспомним по традиции, что за получение только что рассмотренных нами результатов Нильс Бор был удостоен Нобелевской премии по физике 1922 года.