

## 8.5. Рассеяние электронов и лучей света на монокристалле

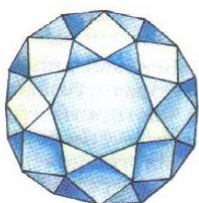


Корона Людовика XV

Исследование отражения сущностей от монокристалла имеет не только научное значение. Кристаллы активно используются в магии, поэтому понимание физических процессов, связанных с этими материальными структурами, позволяют просветлить и эту область человеческого знания. В чем же сила кристаллов?

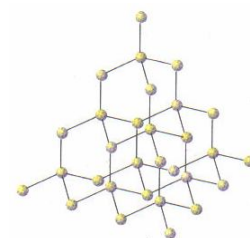
Дело в том, что магия тесно связана с манипуляцией тонкими энергиями – акупунктурными меридианами, чакрами, воображением. Среду, в которой существуют и функционируют эти энергии, маги называют астральным светом (или миром).

Низшая магия гласит, что каждая физическая структура, природная или искусственная, имеет своего астрального двойника (своего рода идеальный образ по Платону). Но астральный образ редко совпадает с материальным объектом. Мы сталкиваемся с этим во снах. Часто во снах мы встречаем людей, предметы и ландшафты, которые выглядят совсем не так, как в жизни, тем не менее мы сразу узнаем их, несмотря на то, что их астральные тела отличаются от физических. Монокристаллы уникальны, т. к. их астральный аналог в точности повторяет их физическую структуру. Это единство материального и астрального планов делает кристаллы идеальными проводниками (дверями) в астральный мир. «Свет» астрального плана интерферирует и дифрагирует на астральном образе монокристалла аналогично тому, как это происходит со светом мира сего при его рассеянии на физической структуре кристалла. Иначе говоря, кристаллы в состоянии фокусировать потоки астральной энергии.



Алмаз «Koh-i-Noor»  
(«Кох-и-Нор» – «Гора Света»)  
Современный вид.

Владельцы алмаза «Кох-и-Нор» («Гора Света»): Бабур Зейр-Эддин (Первый великий Могол); Шах-Джехан; Персидский завоеватель шах Надир (убит в 1747 г); Ахмад-Али (основатель афганской династии Дуррани). 1813 г. – Раждип-Сингх (Лахор); 1849 г. – Англиская Ост-Индская компания; 1850 г. – королева Англии Виктория; В 1852 г. прерогранен в виде бриллианта весом 108,9 карата. Украшал корону Елизаветы III.



Структура алмаза –  
шестигранники  $\square$

Напомним также про хошен, в который вкладывались урим и тумим, где 12 кристаллов: рубин, топаз, изумруд; бирюза, сапфир, бриллиант; опал, агат, аметист; хризолит, оникс и яшма в золотой оправе служили проводниками Воли ВСЕВЫШНЕГО.

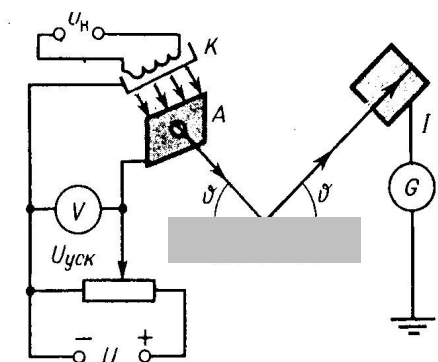


Рис. 8.9

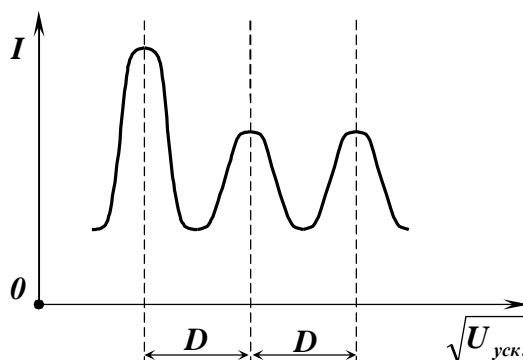


Рис. 8.10

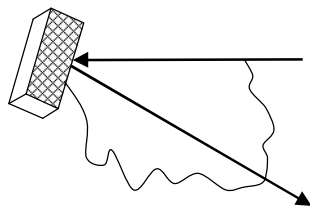


Рис. 8.11

Практически любой учебник по квантовой механике начинается с описания опытов К. Дэвиссона и Л. Джермера, наблюдавших в 1927 г. рассеяние электронов на монокристалле никеля. Схема эксперимента показана на рис. 8.9 [53]. Нить накала, нагреваемая током от источника напряжения накала  $U_n$ , в свою очередь нагревает катод  $K$ , который испускает электроны. Последние разгоняются ускоряющим напряжением  $U_{ук}$  и выходят из отверстия в аноде, приобретая определенную скорость. С помощью потенциометра можно изменять ускоряющее напряжение, тем самым сообщать электронам, вылетающим из пушки, различные скорости. Они падают на поверхность кристалла и отражаются от него. Отраженные электроны улавливаются цилиндром Фарадея.

Об интенсивности рассеянного потока электронов можно судить по силе тока  $I$ , созданного отраженными электронами и измеряемого гальванометром  $G$ . Электронная пушка, кристалл и цилиндр Фарадея находятся в вакууме. При неизменном фиксированном угле падения электронного луча на кристалл непрерывно изменялось ускоряющее напряжение, и при этом регистрировались показания гальванометра. Если по оси абсцисс отложить  $\sqrt{U_{ук}}$ , а по оси ординат – силу тока  $I$ , измеряемую гальванометром, то получается график, представленный на рис. 8.10.

Во втором опыте мишень (монокристалл) могла вращаться вокруг оси, перпендикулярной к плоскости рисунка, что позволило, при фиксированном ускоряющем напряжении  $U_{ук} = const$ , снимать диаграмму рассеяния отраженных электронов. В этом опыте ожидалось зеркальное отражение электронов, при котором угол падения равен углу отражения. Опыт же показал, что рассеяние электронов на монокристалле не подчиняется законам геометрической оптики. Результаты снятия диаграммы рассеяния электронов представлены на рис. 8.11.

Вскоре после опытов Дэвиссона и Джермера в Ленинградском университете П.С. Тартаковский и в Абердинском университете Дж. П. Томсон наблюдали дифракционную картину при прохождении пучков электронов сквозь тонкие пленки (толщиной порядка  $10^{-5}$  см) поликристаллической структуры.

На рис. 8.12 представлены дифракционные картины, полученные при рассеянии рентгеновского излучения пластинкой алюминия и пучка электронов, прошедших через тонкие пленки золота и меди.

Для объяснения этих явлений ученые привлекли идею Луи де Бройля о волновых свойствах элементарных частиц.

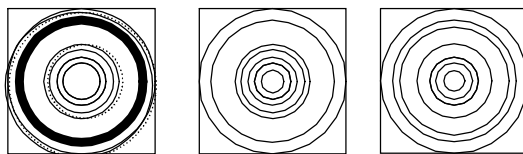


Рис. 8.12

Де Бройль в 1924 г. на основании анализа уравнений, описывающих траекторию движения частицы и луча света, пришел к выводу, что эти уравнения практически одинаковы. Данное обстоятельство позволило де Бройлю сформулировать идею, что свету могут быть присущи корпускулярные свойства, а частицам – волновые. В случае отсутствия препятствий и силовых полей распространение луча монохроматической электромагнитной волны (ЭМВ) описывается выражением

$$f(\mathbf{r}, t) = \exp \{ i (\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \}, \quad (8.204)$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота ( $\nu$  – в данном случае частота ЭМВ);

$\mathbf{k} = 2\pi/\lambda$  – волновой вектор, задающий направление распространения ЭМВ ( $\lambda$  – длина ЭМВ);

$t$  – время;

$\mathbf{r}$  – вектор, соединяющий начало координат (в котором находится передатчик) с приемником.

Прямолинейная траектория движения частицы описывается сходным выражением

$$f(\mathbf{r}, t) = \exp \{ i (Et - \mathbf{p} \cdot \mathbf{r}) \}, \quad (8.205)$$

где  $E$  – кинетическая энергия частицы;

$\mathbf{p}$  – импульс частицы.

Сравнивая (8.204) и (8.205), де Бройль увидел соответствие между  $E$  и  $\omega$ , а также между  $\mathbf{p}$  и  $\mathbf{k}$ . Что позволило ему предположить о наличии взаимосвязи между этими величинами и векторами. В результате де Бройль постулировал соотношения:

$$E = \hbar \omega, \quad (8.206)$$

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}. \quad (8.207)$$

Тем самым он положил начало идее «корпускулярно-волнового дуализма материи».

После удачного применения формул (8.206) и (8.207) для объяснения опытов по дифракции и интерференции электронов и других элементарных частиц идеи де Бройля легли в основу квантовой физики и до сих пор не потеряли своего значения.

Нисколько не умаляя заслуги этих идей в развитии наших представлений о материи, необходимо все же развенчать тайну «волшебного» сочетания корпускулярно-волновых свойств у полей и тем более у частиц. До тех пор пока эта необъяснимая связь не будет разоблачена, мы не сможем продвинуться дальше в познании Естества. То, что на протяжении многих лет служило нам лучом света во мраке материальности, теперь стало тормозом. Необходимо вырваться из тесных оков корпускулярно-волнового дуализма, и тогда Наука глотнет свежего воздуха перед новым рывком вперед.

Начало этому процессу уже положено, когда в п. 8.2, нам удалось показать, что таинственный переход от координатного представления к импульсному в квантовой механике – это всего лишь тривиальная математическая процедура перехода от ПРВ координаты места нахождения материальной точки  $\rho(x)$  к ПРВ ее импульса (т. е. производной)  $\rho(x')$ , поскольку импульс связан с производной по координате однозначным соотношением  $p_x = m dx/dt$ .

Теперь постараемся развенчать и единственность объяснения эффектов, связанных с рассеянием элементарных частиц на монокристаллических структурах на основании идеи де Бройля о существовании у частиц волновых свойств.

Рассмотрим опыт Дэвиссона и Джермера более подробно. Пусть пучок электронов падает на поверхность монокристалла. С точки зрения процесса рассеяния пучка электронов (или лучей света) монокристалл можно представить в виде последовательности эквипотенциальных слоев электромагнитной природы (рис. 8.13б).

Каждый такой слой имеет своеобразную неровную, эквипотенциальную поверхность. Эта поверхность волнуется и колеблется подобно поверхности моря, но в среднем имеет выпуклости в местах размещения атомов кристаллической решетки данного слоя.

Каждый падающий электрон (точно так же, как и тонкий луч света) может отразиться от любого слоя, находящегося вблизи с поверхностью монокристалла. Некоторые электроны (или лучи света) могут отразиться от первых слоев, а некоторые, практически беспрепятственно преодолевая первые слои, отражаются от более глубоких слоев кристаллической решетки. Причем отражение от той или иной эквипотенциальной поверхности происходит точно так же, как и в случае отражения лучей ЭМВ от крупномасштабной неровной поверхности (приближение Кирхгофа п. 8.5), т. е. по законам геометрической оптики. То есть любую эквипотенциальную поверхность можно разбить на элементарные площадки касательные к этим поверхностям. При этом отражение электрона (или луча света) от такой площадки подчиняется законам геометрической оптики (т. е. угол падения на эту элементарную площадку равен углу отражения от нее, и направление движения отраженного электрона (или луча света) лежит в плоскости падения).

Другими словами, если пренебречь вторичными отражениями (рис. 8.13б), то задача по рассеянию пучка небыстрых электронов (или нежестких лучей света) на монокристалле полностью совпадает с задачей рассеяния лучей ЭМВ на зеркальной крупномасштабно неровной поверхности (см. п. 8.5.1). Только там рассматрива-

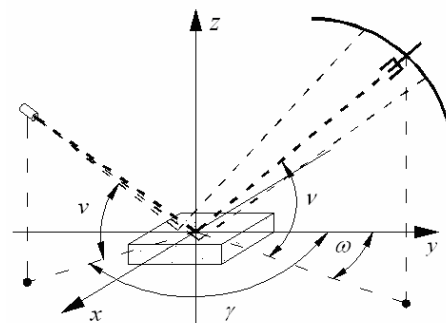


Рис. 8.13а

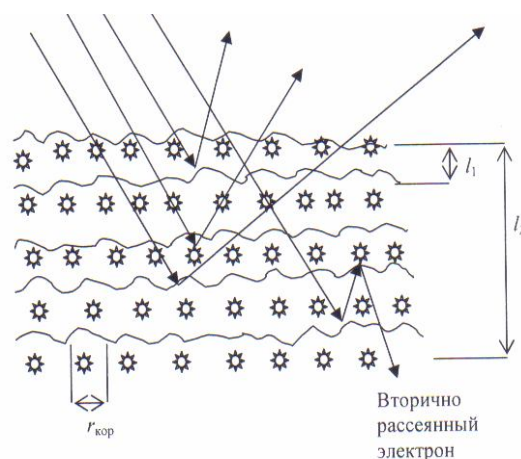


Рис. 8.13б

лись процессы отражения ЭВМ от одной идеально проводящей поверхности, а в данном случае рассеяние происходит на множестве «однотипных» слоев.

Учитывая, что траектория движения электронов (тонких лучей света) подобна (совпадает) лучу ЭМВ, повторим те же рассуждения, которые привели нас к методу расчета индикатрис рассеяния ЭМВ при выполнении условий Кирхгофа (8.111). В результате перейдем к выводу, что для описания индикатрисы рассеяния пучка электронов (или лучей света) на монокристалле вполне подходит выражение (8.201), описывающее отражение лучей от большого числа слоев эквипотенциальных поверхностей синусоидального типа. Данное выражение имеет вид

$$\rho_4(v, \omega / \vartheta, \gamma) = 4\pi n_1^2 k_4 \frac{\sin^2[\pi n_1 / 2 - k_4 \sqrt{(a^2 + b^2) / c^2} / 2]}{[(\pi n_1)^2 - k_4^2 (a^2 + b^2) / c^2]^2} \times \left| \frac{c(a'_v b'_\omega - a'_\omega b'_v) + c'_v (b a'_\omega - a b'_v)}{c^2 \sqrt{a^2 + b^2}} \right|, \quad (8.208)$$

где  $k_4 = r_{\text{кор}} n_1^2 / (0,066 l_2)$ ;

$l_2$  – толщина поверхности монокристалла, эффективно отражающего пучок электронов  $l_2 = n_1 l_1$  (где  $l_1$  – толщина одного слоя (одной эквипотенциальной поверхности), в данном случае  $n_1$  – число слоев, эффективно участвующих в рассеянии электронов (рис. 8.13а)  $n_1$ , так же, как и  $l_2$ , сильно зависит от скорости падающих электронов, т. к. от этого зависит глубина проникновения этих электронов вглубь монокристалла. Чем выше скорость, тем больше вероятность их проникновения в более глубокие слои;

$r_{\text{кор}}$  – усредненный радиус кривизны одной эквипотенциальной поверхности. Для монокристалла у всех эквипотенциальных поверхностей  $r_{\text{кор}}$  один и тот же и по сути означает эффективное сечение рассеяния атомами кристалла электронов (или лучей света), из которых состоит кристаллическая решетка монокристалла. Но, как известно, эффективное сечение процесса рассеяния электрона (или луча света) на атоме слабо, но зависит от скорости падающих электронов (или длины волны света). В нашей модели мы учтем это обстоятельство косвенным образом, подставляя в (8.208) вместо  $r_{\text{кор}}$  эффективный радиус кривизны

$$r_{\text{кор,эф}} = r_{\text{кор}} / n_1^2. \quad (8.209)$$

В свою очередь согласно (8.135)

$$\begin{aligned} a &= \cos v \cos \omega + \cos \vartheta \cos \gamma; \\ b &= \cos v \sin \omega + \cos \vartheta \sin \gamma; \\ c &= \sin v + \sin \vartheta; \\ a'_v &= -\sin v \cos \omega; \\ b'_v &= -\sin v \sin \omega; \\ c'_v &= \cos v; \\ a'_\omega &= -\cos v \sin \omega; \\ b'_\omega &= \cos v \cos \omega. \end{aligned} \quad (8.210)$$

Выражение (8.208) является, по сути, плотностью распределения вероятности (ПРВ) того, что отраженный от монокристалла электрон (луч света) полетит в направлении, задаваемом углами  $v$  и  $\omega$  при условии, что он падал на поверхность в направлении, заданном углами  $\vartheta$  и  $\gamma$ . При большом количестве падающих электронов (лучей света) ПРВ превращается в индикатрису рассеяния.

Выражение (8.208) позволяет всесторонне изучать рассеяние пучка электронов (лучей света) на монокристалле. Рассмотрим вначале индикатрису рассеяния «медленных» электронов (не жестких лучей света). Пусть электронная пушка (источник рентгеновских лучей) и цилиндр Фарадея (приемник – фотопластинка) находятся в одной плоскости, при этом  $\omega = 0$  и  $\gamma = 0$ , а  $\vartheta = 45^\circ$ . Если эти углы подставить в (8.208) при количестве эффективно отражающих слоев  $n_1 = 350$ , толщине одного слоя  $l_1 = 10^{-7}$  см и усредненном радиусе кривизны неровностей эквипотенциальных поверхностей (слоев) кристалла  $r_{\text{кор}} = 10^{-8}$  см, то получим индикатрису рассеяния пучка электронов, показанную на рис. 8.14а, которая неплохо согласуется с результатами второго эксперимента Дэвиссона и Джермера (рис. 8.11, 8.12). Напомним, что радиус эффективного сечения электрона равен  $r_{\text{сеч.эл}} \approx 10^{-13}$  см (а длина волны рентгеновских лучей  $\lambda \approx 10^{-11}$  см), при этом условия Кирхгофа вполне выполняются:  $r_{\text{кор}} \gg r_{\text{сеч.эл}}$  (или  $r_{\text{кор}} \gg \lambda$ ).

На рис. 8.14в отчетливо видно, что в середине всплеска индикатрисы рассеяния имеет место провал, а не максимум. Данное обстоятельство в свое время и привело физиков в изумление. Дело в том, что по всем канонам классической геометрической оптики на данное место должен приходиться максимум диаграммы рассеяния, а реально получалась отчетливая интерференционная картина с явным минимумом в ее центре. Это и привело к утверждению идеи о волновой природе элементарных частиц. Мы же получили данный результат, совершенно не прибегая к подобным измышлениям, просто рассеяние на регулярной периодической структуре (монокристалле) приводит к регулярной интерференционной картине.

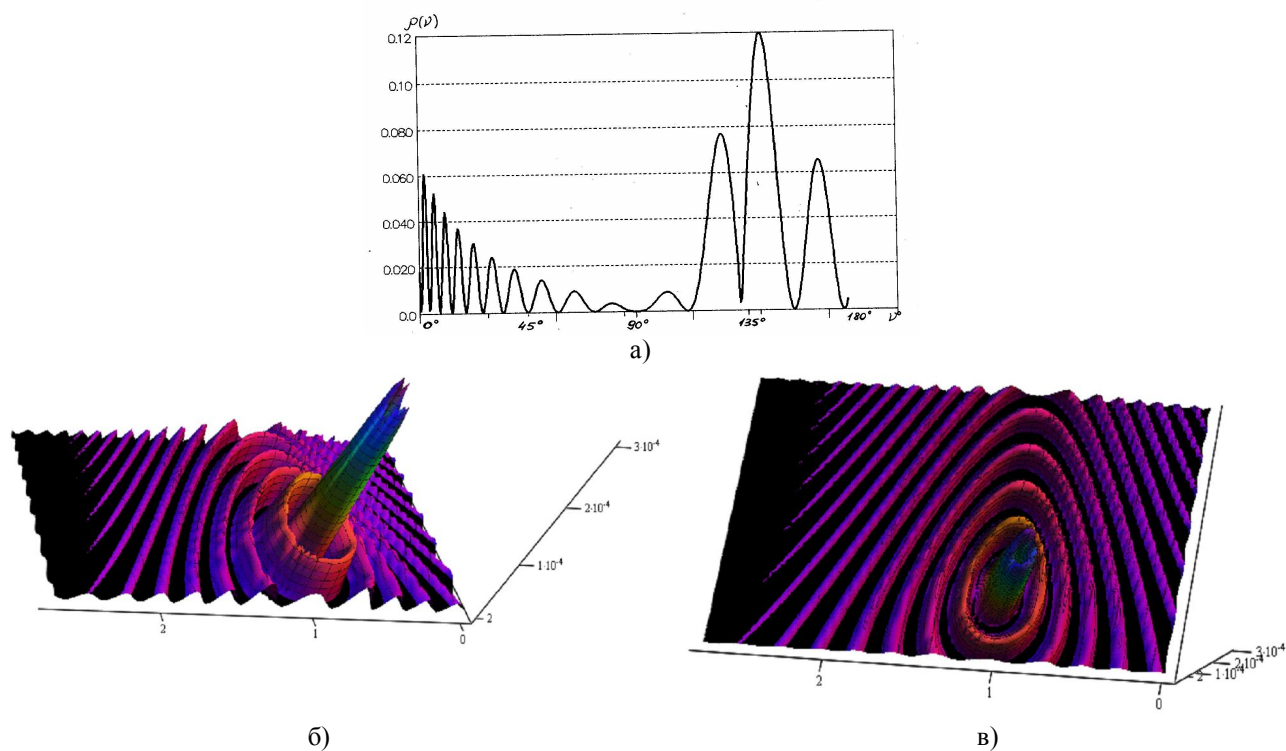


Рис. 8.14

В случае более быстрых электронов (или более жестких лучей) при тех же условиях (при этом  $\omega = 0^0$  и  $\gamma = 0^0$ , а  $\vartheta = 45^0$ ,  $l_1 = 10^{-7}$  см,  $r_{\text{кор}} = 10^{-8}$  см), но с большей глубиной проникновения, т. е. при  $n = 650$  эффективно отражающих слоев при расчетах по (8.208), получается индикатриса, показанная на рис. 8.15.

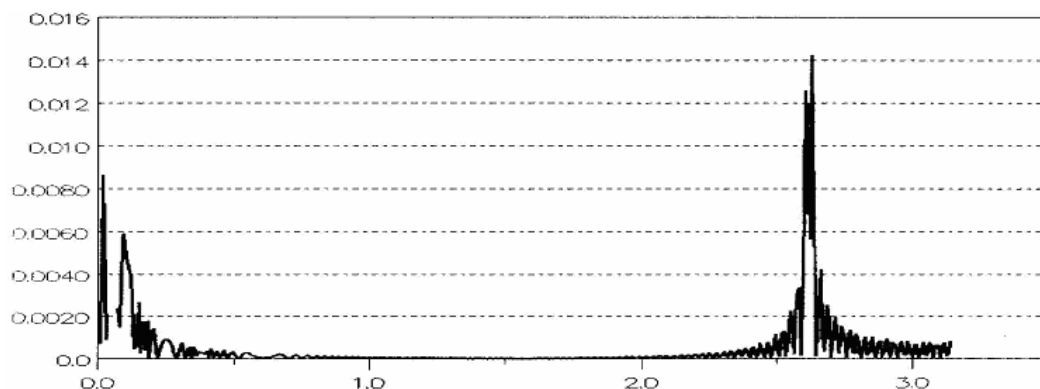


Рис. 8.15

В отношении первого эксперимента Дэвиссона и Джермера, когда при фиксированных углах падения и отражения изменяли ускоряющее напряжение  $U_{\text{уск}}$  (рис. 8.9) выражение (8.208) приводит к следующим результатам. Пусть углы  $\omega = 0^0$  и  $\gamma = 0^0$ , а  $\vartheta = 30^0$ ,  $v = 154^0$  фиксированы,  $l_1 = 10^{-7}$  см,  $r_{\text{кор}} = 10^{-8}$  см, тогда выражение (8.208) становится зависимостью только одного параметра –  $n_1$  (числа эффективно отражающих слоев).

$$\rho(v, \omega / \vartheta, \gamma, n_1) = \rho(n_1) |_{v=154^0, \omega=0^0, \vartheta=30^0, \gamma=0^0}$$

Результат расчета по формуле (8.208) при фиксированных углах падения и отражения представлен на рис.8.16, что весьма схоже с результатами эксперимента (рис.8.10).

Таким образом, можно сделать вывод, что для объяснения эффектов, связанных с рассеянием электронов и фотонов (жестких лучей электромагнитного излучения) на монокристаллах, вовсе не обязательно привлекать не поддающуюся для осознания идею волн материи де Бройля. Выясняется, что эти эффекты вполне объяснимы на базе более конструктивного подхода, вскрывающего физическую суть происходящего в микромире процесса.

Можно показать, что существует однозначная связь между двумя подходами – квантово-механическим и предложенным в данной работе, поскольку при выполнении условий геометрической оптики законы отражения частичек вещества и излучения волновой природы практически аналогичны. Поэтому частице с импульсом  $p$  можно приписать пилот-волну с длиной волны

$$\lambda = \hbar 2\pi / p,$$

а лучу электромагнитного излучения с длиной волны  $\lambda$  можно приписать корпускулярные свойства, т. е. рассматривать его как фотон с импульсом

$$p = \hbar 2\pi / \lambda.$$

Таким образом, данный подход вовсе не разрушает идеологическую подоплеку квантовой физики, а, напротив, раскрывает сущность ее исходных постулатов и открывает пути переосмысления основ квантовой механики и представлений о микроскопическом уровне организации вещества.

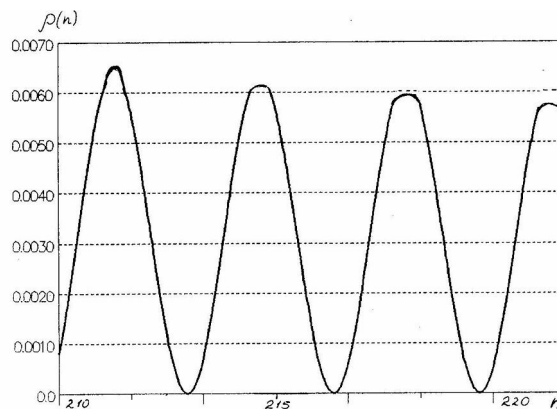


Рис. 8.16 [77]