

Читателю нетрудно убедиться, что из полученных средних значений по ансамблям ρ_0 , ρ_R и ρ_L следует

$$\rho_0 = \rho_L/2 + \rho_R/2. \quad (60e)$$

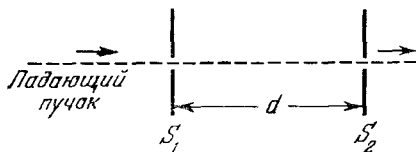
Этот вывод находится в согласии с рассуждениями п. 38.

Таким образом, хаотический ансамбль можно рассматривать как *некогерентную суперпозицию* двух чистых ансамблей ρ_R и ρ_L .

61. В школьные годы автора беспокоил вопрос о различии между неполяризованным светом и светом, поляризованным по кругу. Он читал в книгах, что неполяризованный свет является смесью света, поляризованного в двух перпендикулярных направлениях. Там же было написано, что свет, поляризованный по кругу, является суперпозицией света, поляризованного в двух перпендикулярных направлениях. В конце концов автор понял, что в первом случае происходит сложение *интенсивностей*, а во втором — сложение *амплитуд*. Поляризованный по кругу свет представляет собой *когерентную* смесь света, поляризованного в двух перпендикулярных направлениях, тогда как неполяризованный свет представляет собой *некогерентную* смесь.

Задачи

1. При попытках опровергнуть соотношение неопределенностей излюбленным доводом является следующий (см. рисунок к этой задаче). Пучок электронов с определенным импульсом p падает слева на экран S_1 , в котором имеется отверстие диаметром a . На расстоянии d от S_1 помещен другой экран S_2 с таким же отверстием. Оба отверстия находятся строго на одной линии по направлению пучка. Часть электронов, пройдя первую щель, отклонится, а часть пройдет через вторую щель. Рассмотрим один из таких электронов. Неопределенность в его координате порядка $\Delta x \approx a$, а импульс равен p , так как электрон в этом опыте не теряет и не приобретает энергии. Поскольку известно, что электрон прошел через *обе* щели, то неопределенность в направлении импульса будет меньше или порядка $\Delta \theta \approx a/d$. Поэтому неопределенность в поперечной проекции импульса электрона имеет порядок $\Delta p \approx (a/d)p$. Таким образом, произведение неопределенностей координаты и импульса для поперечного направления



К задаче 1. В задаче ошибочно допускается, что принцип неопределенностей может быть нарушен, если сделать щели узкими, а расстояние d большим. В этом случае кажется, что произведение неопределенности импульса на неопределенность положения в пространстве в момент прохождения частицы через вторую щель может быть сделано сколь угодно малым. В чем ошибка этого рассуждения?

проекция импульса электрона имеет порядок $\Delta p \approx (a/d)p$. Таким образом, произведение неопределенностей координаты и импульса для поперечного направления

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx (a/d)ap$$

может быть сделано при подходящем выборе a и d сколь угодно малым. Это нарушает соотношение неопределенностей, являющееся одной из основ квантовой механики.

Можете ли вы опровергнуть это рассуждение?

Приведенное рассуждение является одним из многих, претендовавших на опровержение квантовой механики через отрицание соотношения неопределенностей. Следует, однако, уяснить себе, что подобные рассуждения ни в какой мере не угрожают соотношению неопределенностей, если принять *предпосылки волновой механики*, так как из этих предпосылок соотношение неопределенностей вытекает. Попытки «отказа» от волновой механики можно разделить на две группы:

а) Доводы, отклоняющие идеи волновой механики, хотя и не всегда в явной форме.

б) Доводы которые «запутывают», но основаны на некоторых идеях волновой механики.

Тщательный анализ высказываемых концепций объясняет природу «отказов». Полный отказ от волновой механики не может быть, конечно, опровергнут логическим путем, и нам следует обратиться к экспериментальным фактам; логические следствия «отказа» оказываются в противоречии с опытом. Доводы категории б) просто ошибочны.

2. а) Рассмотрим идеализированный опыт. Почти совершенно монохроматический свет с длиной волны 6000 \AA проходит через очень быстрый затвор, который периодически открывается и закрывается так, что он открыт 10^{-10} с и закрыт 10^{-2} с в течение периода. Прошедший через затвор свет больше не монохроматичен: мы обнаружим определенный разброс длин волн. Оцените неопределенность в длине волны (в ангстремах).

б) Прошедший через затвор свет направляется в длинную трубу, заполненную сероуглеродом (CS_2). Это дисперсионная среда, для которой в интересующем нас диапазоне длин волн изменение показателя преломления n с длиной волны определяется соотношением

$$\frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} = -0,075.$$

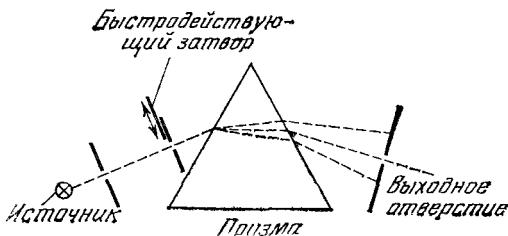
Пусть скорость световых импульсов, проходящих через затвор, измеряется с помощью другого затвора, расположенного на определенном расстоянии от первого и открывающегося позже. С какой скоростью распространяются в сероуглероде световые импульсы?

3. Рассмотрим еще одну идею о нарушении принципа неопределенностей. Она касается на этот раз соотношения между временем и частотой. Принцип опыта показан, весьма схематично, на рисунке к этой задаче. Почти монохроматический свет проходит через щель, за которой стоит быстродействующий затвор. Мы не входим в технические трудности и предполагаем, что затвор можно открывать на предельно короткие времена. Тем самым на спектрограф, изображенный в виде призмы, можно посылать короткие волновые пучки. Падающий на спектрограф свет не будет больше монохроматическим, а будет иметь разброс частот, подобно тому как это обсуждалось в задаче 2. Мы можем, однако, снабдить спектрограф достаточно узкой выходной щелью, показанной в правой части рисунка, и отбросить тем самым крайне узкий участок спектра. Свет после выходного отверстия может быть сделан монохроматическим в произвольно высокой степени. С другой стороны, с помощью затвора продолжительность импульса может быть сделана сколь угодно малой. Таким образом, свет, вышедший из спектрографа, может иметь произвольно малую длительность и произвольно точную частоту, что противоречит соотношению неопределенностей.

Можете ли вы указать ошибку в этих рассуждениях?

4. Вспомнив рассуждения п. 29, предположим, что температура нити равна 1000°C , а ускоряющий потенциал равен 10 В . Оцените относительный разброс импульсов испущенных электронов, т. е. величину q/ρ_0 . Достаточно грубой оценки.

5. Получив пучок электронов очень малой энергии, можно произвести «макроскопический» опыт с дифракцией электронов. Предположим, что мы пытаемся создать пучок с точно определенным импульсом, соответствующим, например, энергии $0,01 \text{ эВ}$. Рассмотрите практические трудности создания такого пучка. Очевидно, что простое устройство из нити накала и одного ускоряющего электрода



К задаче 3. Попытаемся снова нарушить принцип неопределенностей. Призма символически обозначает спектрограф с очень большим разрешением, с помощью которого мы выделяем крайне узкую полосу частот проходящего света. Падение света на призму управляется быстрым затвором. Автору кажется, что время прохождения щели светом и его частота могут быть заданы сколь угодно точно. В чем ошибка этого утверждения?

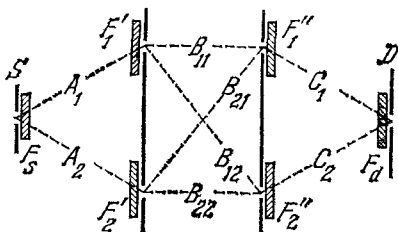
не годится, но, вероятно, существуют другие методы, о которых можно подумать. Попробуйте указать на некоторые из них и обсудите, насколько они технически осуществимы.

6. Рассмотрим решетку из задачи 5 гл. 5. Предположим, что решетка *не* бесконечно велика, а содержит только N штрихов. В этом случае она не будет строго периодической системой, а дифрагированный пучок будет иметь угловой разброс. Положение можно выразить следующим образом. Характеристический импульс, переданный решетке, больше не кратен точно $2\pi/a$, а определен с погрешностью Δq . Найдите связь между N и Δq . Поверните рисунок на 90° и сравните его с рис. 5А этой главы. Возможно, это сравнение даст вам некоторые идеи. Воспользуйтесь результатом, чтобы получить выражение для разброса углов, под которыми испускаются дифрагировавшие лучи.

7. Рассмотрим почти монохроматический пучок света, испущенный стационарным источником. Проблема заключается в определении с помощью опытов неизвестного состояния поляризации пучка.

а) В нашем распоряжении идеальный поляризационный фильтр и фотоумножитель. Каково наименьшее число измерений, с помощью которых можно полностью определить поляризационное состояние пучка? Объясните ваше утверждение.

б) Предположим, что имеется фотоумножитель, две одинаковые поляроидные пленки и пластинка в четверть волны. Как, используя только вышеописанное оборудование, определить состояние поляризации пучка? В этом случае вы не должны предполагать, что поляририд представляет собой идеальный поляризационный фильтр.



8. На рисунке показан более чистый вариант опыта с двумя двойными щелями, обсуждавшегося в п. 41—43. Перед щелями, а также перед источником и регистрирующим прибором (детектором) помещены (или отсутствуют) идеальные поляризационные фильтры. Предположим, что амплитуды прохождения, рассмотренные в п. 41—43, не зависят от состояния поляризации и что источник дает неполяризованный свет. Получите выражение, аналогичное (43 б), для вероятности того, что фотон, покинувший щель в S , пройдет через щель в D при различных комбинациях фильтров, указанных в следующей таблице:

К задаче 8. Щели покрыты идеальными поляризационными фильтрами. Требуется найти вероятность того, что фотон, покинувший щель в S , попадет в щель D при различных комбинациях фильтров. Через A_m , B_{mn} и C_m обозначены амплитуды переходов в отсутствие фильтров. Мы предполагаем, что эти амплитуды не зависят от состояния поляризации

8. На рисунке показан более чистый вариант опыта с двумя двойными щелями, обсуждавшегося в п. 41—43. Перед щелями, а также перед источником и регистрирующим прибором (детектором) помещены (или отсутствуют) идеальные поляризационные фильтры. Предположим, что амплитуды прохождения, рассмотренные в п. 41—43, не зависят от состояния поляризации и что источник дает неполяризованный свет. Получите выражение, аналогичное (43 б), для вероятности того, что фотон, покинувший щель в S , пройдет через щель в D при различных комбинациях фильтров, указанных в следующей таблице:

F_S	F'_1	F'_2	F''_1	F''_2	F_D
нет	Г	В	нет	нет	нет
ЛП	Г	В	нет	нет	нет
ЛП	Г	В	нет	нет	ПП
ЛП	Г	В	ПП	ЛП	Г
нет	Г	нет	нет	Г	нет

«Нет» — фильтр отсутствует; Г и В — фильтры, создающие горизонтальную и вертикальную поляризацию; ЛП и ПП — фильтры левой и правой круговой поляризации соответственно

9. Рассмотрим различие между идеальным и обычным счетчиками. Реальный счетчик может, к сожалению, сработать в отсутствие события и пропустить (не зарегистрировать) событие. Число отсчетов в отсутствие источника именуется

фоном измерений. Одним из источников фона является проникающее всюду космическое излучение. Далее, если два события разделены слишком коротким интервалом времени, то счетчик не разрешит их и отметит как одно. Наименьшее время t_0 между двумя событиями, при котором они еще регистрируются счетчиком раздельно, называется *разрешающим временем* счетчика. Его можно определить следующим образом. Пусть имеются два радиоактивных источника 1 и 2. Поместим их на таких расстояниях от счетчика, чтобы число отсчетов от каждого было приблизительно одинаково. Пусть N_0 — скорость счета, когда оба источника убраны, N_1 и N_2 — скорости счета отдельно от источников 1 и 2, N_{12} — скорость счета в присутствии обоих источников. Подберем расстояния так, чтобы N_{12} было заметно меньше $1/t_0$, но не пренебрежимо мало по сравнению с $1/t_0$. Пусть также N_0 меньше N_1 , N_2 и N_{12} . Покажите, что из этих четырех измерений скорости счета можно определить t_0 . Выразите t_0 через N_0 , N_1 , N_2 и N_{12} .

Заметим, что для идеального счетчика и при отсутствии фона $N_{12} = N_1 + N_2$.

Дополнительная литература

Изложенную в этой главе теорию следует дополнить описанием экспериментальных методов физики элементарных частиц. Мы рекомендуем следующие источники:

Фриш Д., Торндайк А. Элементарные частицы.— М.: Атомиздат, 1966.

Статьи в сборнике «Над чем думают физики»:

Ягода Г. Треки-следы элементарных частиц.— 1962, вып. 1, с. 25.

О'Нейл Ж. К. Искровая камера.— 1965, вып. 4, с. 56.

Статьи в журнале «Scientific American»:

Bilaniuk O. M. Semiconductor Particle-Detectors.— 1962, Oct., p. 72.

Collins G. B. Scintillation Counters.— 1953, Nov., p. 36.

Glaser D. A. The Bubble Chamber.— 1955, Feb., p. 46.

Yount D. E. The Streamer Chamber.— 1967, Oct., p. 38.

Rochester G. D., Wilson J. G. Cloud Chamber Photographs of the Cosmic Radiation. (Альбом снимков различных явлений, возникающих при прохождении космических лучей через камеру Вильсона.)

Introduction to the Detection of Nuclear Particles in a Bubble Chamber (Prepared at the Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley, The University of California), 1964. (Альбом стереоскопических снимков разнообразных взаимодействий элементарных частиц в пузырьковых камерах.)

Дайон М. М., Лексин Г. А. Искровые детекторы заряженных частиц.— УФН, 1965, т. 86, с. 371.

Рывкин С. М., Матвеев О. А., Строкан Н. Б. Полупроводниковые счетчики элементарных частиц.— М.: Знание, 1964.