

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ФОТОННОЙ ТЕОРИИ РАССЕЯНИЯ

Э. В. Шпольский, Москва

Известно, что фотонная теория рассеяния, основанная на применении к соударению фотона и электрона законов сохранения энергии и количества движения, дала весьма простое и количественно-точное объяснение изменению частоты при рассеянии рентгеновых и  $\gamma$ -лучей, открытому А. Комптоном. Однако явление Комптона получило объяснение и в другой теории, связанной с совершенно иной концепцией, а именно в теории Бора, Крамерса и Слэтера<sup>1</sup>, сформулированной около того же времени. Согласно этой своеобразной теории, фотонов вообще не существует, и явление интерпретируется с чисто волновой точки зрения. Именно, картина рассеяния по теории Бора, Крамерса и Слэтера такова: если рассеивающий электрон находится в поле падающей волны, то он создает поле рассеянной волны, которое распространяется по классическим законам и притом так, как если бы оно излучалось „виртуальным электроном“, несущимся со скоростью

$$\beta = \frac{\alpha}{1 + \alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  равно отношению „комптоновской длины волны“  $\Delta = \frac{h}{mc}$  к длине волны первичного излучения  $\lambda_0$ . Появление электронов отдачи, согласно этому представлению, происходит за счет классического давления излучения. Но так как это давление распределяется равномерно на все электроны, а ускорение на самом деле получает лишь незначительная часть их, то допускается, что законы сохранения энергии и количества движения к индивидуальному акту рассеяния неприменимы: появление электрона отдачи есть событие случайное, каузально не связанное с актом рассеяния. При этом, однако, статистически, т. е. в среднем для большего числа электронов отдачи, законы сохранения выполняются. Таким образом в теории Бора, Крамерса, Слэтера область применения статистики перемещается: вместо статистики соударений, с которой имеет дело фотонная теория, на сцену появляется статистика корреляции между появлением электрона отдачи и рассеянием волны излучения.

Выбор между той и другой теорией можно сделать лишь на основании эксперимента. В самом деле, если верна фотонная тео-

рия рассеяния, основанная на применении законов сохранения, то должны иметь место следующие явления, требуемые этими законами: 1) электрон отдачи должен появляться одновременно с рассеянным квантом; 2) между углами электрона отдачи и рассеянного кванта с первоначальным направлением полета кванта должно выполняться простое соотношение, вытекающее из теории удара; 3) векторы количества движения падающего кванта, рассеянного кванта и электрона отдачи должны быть компланарны. Напротив, теория Бора, Крамера и Слэтера не требует никакого соответствия между электроном отдачи и рассеянной волной, кроме соответствия, обусловленного случаем.

Соответствующие опыты были выполнены вскоре после появления этих теорий Боте и Гейгером<sup>2</sup>, с одной стороны, и Комптоном и Саймоном<sup>3</sup>, с другой. Напомним схемы и результаты этих опытов. В опытах Боте и Гейгера узкий пучок жестких рентгеновых лучей испытывал рассеяние в пространстве между двумя близко друг против друга расположенными счетчиками (рис. 1), помещенными в атмосфере водорода, который и служил, таким образом, рассеивающим веществом. Электроны отдачи регистрировались правым (открытым) счетчиком, рассеянное излучение — левым

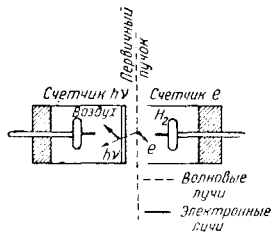


Рис. 1.

счетчиком, наполненным воздухом и закрытым спереди платиновой фольгой. Так как фотоны сами не ионизируют воздух, то действие левого счетчика обуславливалось фотоэлектронами, срываемыми с внутренней поверхности фольги (см. чертёж). Разумеется, далеко не каждый рассеянный квант вызывал появление фотоэлектрона, и потому „счетчик  $h\nu$ “ реагировал лишь на очень небольшую часть рассеянных фотонов. Но и „счетчик  $e$ “ реагировал не на каждый электрон отдачи, а лишь на 1 из 10. Отбросы электрометров, соединенных со счетчиками, регистрировались на движущемся фотографическом фильме. Согласно сказанному выше нельзя было ожидать, чтобы каждому отбросу „счетчика  $e$ “ отвечал отброс „счетчика  $h\nu$ “, но можно было ожидать, наоборот, что каждому отбросу „счетчика  $h\nu$ “ должен отвечать отброс „счетчика  $e$ “, разумеется, при условии, если фотонная теория рассеяния верна. На самом деле оказалось, что каждому 11-му отбросу счетчика фотонов отвечает одновременно с ним происходящий отброс счетчика электронов. Разрешающая способность установки составляла  $10^{-3}$  сек., так что совпадение можно было установить с неточностью в пределах этого промежутка времени. В действительности дело обстояло еще менее благоприятно, так как счетчик фотонов давал запаздывание порядка  $10^{-2}$  сек. Причину этого запаздывания экспериментаторы приписывали механизму действия самого счетчика и попытались свести его до минимума устройством специальных насадок, показанных на нашем схематическом чертеже. Однако полностью устра-

нить таким путем запаздывание не удалось. Тем не менее, подвергнув свои результаты статистическому анализу, Боте и Гейгер пришли к заключению, что можно поставить 400 000 против 1 в пользу утверждения, что наблюдавшееся ими совпадение отбросов обоих счетчиков не было случайным.

Другой опыт для подтверждения фотонной теории был выполнен А. Комптоном и Саймоном. В этом опыте была сделана попытка непосредственно зафиксировать при помощи камеры Вильсона элементарный акт рассеяния и, измерив углы полета электрона отдачи и рассеянного кванта с направлением первичного кванта, убедиться в том, что эти углы удовлетворяют соотношению, вытекающему из законов сохранения. С этой целью узкий пучок жестких рентгеновых лучей пропускался в камеру Вильсона (рис. 2).

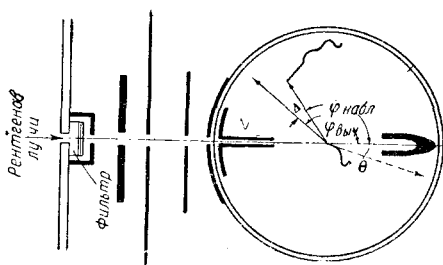


Рис. 2.

происходит рассеяние, можно установить по появлению в этом месте электрона отдачи (короткий трэк); если, кроме того, рассеянный квант случайно поглотится внутри камеры, то направление его полета после рассеяния можно установить по положению начала полета фотоэлектрона (длинный трэк). Если на снимке получился только

один электрон отдачи и один фотоэлектрон, то при помощи такого снимка можно проверить, в какой мере удовлетворяется соотношение между углами, требуемое фотонной теорией. Всего было получено 850 стереоскопических фотографий; из них только 38 оказались пригодными для промеров. Среди этих 38 снимков на 18 направление полета рассеянного фотона оказалось совпадающим с вычисленным теоретически в пределах  $20^\circ$ ; на остальных 20 снимках углы оказались случайно разбросанными без явно выраженной концентрации около какого-нибудь значения. Полученные результаты были также подвергнуты статистической обработке следующим образом. Сначала по фотографии измерялся угол полета электрона отдачи. По этому углу вычислялся угол полета рассеянного фотона и находилась разность  $\Delta$  между наблюдаемым и теоретическим (ср. рис. 2). Далее наблюдениям приписывался вес следующим образом: если на пластинке оказывался зафиксированным один электрон, то в этом случае  $\Delta$  приписывался вес 1; если оказывалось два электрона отдачи, то для каждого из них определялось  $\Delta$ , и каждому такому значению приписывался вес  $1/2$  и т. д. Результаты этой обработки графически представлены на рис 3, из которого видно, что действительно наблюдаемые отклонения  $\Delta$  заметно сгущаются около углов  $0-20^\circ$ .

Приблизительно одновременно с Боте и Гейгером аналогичный опыт производил Беннет<sup>4</sup> в Чикаго. Два счетчика, из которых один предназначался для счета квантов, а другой — для счета эле-

ктронов отдачи, располагались на плечах спектрометра. Весь прибор помещался в вакууме. Первичное излучение доставлялось рентгеновской трубкой, работавшей при 180 kV; излучение подвергалось фильтрации через 7 мм латуни. Рассеивающим телом служили промасленная бумага, слюда; в некоторых экспериментах — воздух при атмосферном давлении. Вследствие упомянутой выше „задержки“ в действии счетчиков совпадения оказались неточными, и потому этот опыт не дал однозначного ответа на вопрос.

Аналогичный опыт производил в Чикаго же Бэрден (не опубликовано). В этих опытах счетчик электронов отдачи сначала располагался в положении  $R_a$ , где согласно фотонной теории должны были наблюдаться совпадения; затем перемещался в положение  $R_b$ , где совпадения наблюдаться не должны были. Счетчик фотонов оставался в обоих случаях в одном и том же положении  $P$ . Результат получился следующий: „в положении  $R_a$  наблюдался 71 отброс в  $P$  и 31 000 в  $R$ , из них совпало только 8; в положении  $R_b$  в  $P$  наблюдалось 112 отбросов, а в  $R$  — 42 000 при 9 совпадениях. Таким образом совпадения наблюдаются в одинаковом количестве как в правильном положении, требуемом теорией, так и в неправильном“.

Наконец, в самое последнее время Р. Шэнкландом<sup>5</sup> в лаборатории А. Комптона были произведены опыты, которые также противоречат фотонной теории рассеяния. В отличие от описанных выше

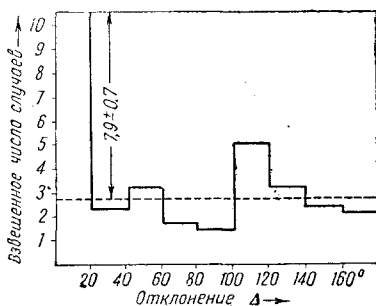


Рис. 3.

опытов, выполненных с рентгеновыми лучами, опыты Шэнкланда были поставлены с  $\gamma$ -лучами радия С, которые дают электроны отдачи значительно большей энергии. Кроме того, были внесены улучшения в конструкцию счетчиков фотонов и  $\gamma$ -квантов. Схема расположения опыта у Шэнкланда дана на рис. 4. В  $S$  помещалось рассеивающее тело; источником  $\gamma$ -квантов служила трубочка с радием, помещавшаяся в  $\gamma$ . Узкий пучок лучей направлялся через канал  $C$  (диаметр 0,80 см); специальными свинцовыми экранами и свинцовой дробью рассеивающее тело и счетчики были защищены от случайно рассеянных лучей. В  $P$  располагалось подряд пять счетчиков фотонов. Так как абсорбция  $\gamma$  лучей в объеме газа внутри счетчика ничтожна, то для регистрации рассеянных фотонов необходимо обеспечить поглощение их стенками счетчиков. С этой целью стенки счетчиков были сделаны из золота (свинец непригоден вследствие того, что он слегка радиоактивен). Счетчики были включены так, что если фотон поглощался в любом из них, то этого было достаточно для его регистрации. Специальные опыты, произведенные для оценки эффективности расположения, показали, что оно регистрирует 1 из 125 фотонов, так что веро-

ятность поглощения фотона составляла  $8 \cdot 10^{-3}$ . Счетчики были наполнены воздухом при давлении в  $10,5 \text{ см}$  и работали при  $1400 \text{ V}$ .

Счетчики электронов отдачи располагались в  $R$  под таким углом с направлением первичного пучка, чтобы он отвечал углу рассеяния фотона, если рассчитывать эти углы, применяя к соударению фотона с электроном законы сохранения. Конструкция этих счетчиков была иная. В соответствии с тем, что они были предназначены для счета электронов, необходимо было обеспечить проницаемость стенок для электронов. Два цилиндра  $A$  и  $B$  (рис. 5) были сделаны из тонкой алюминиевой фольги (толщина  $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ ); электроны попадали в счетчик, пройдя сквозь тонкое целлофановое окно  $C$  (толщина  $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ ). Этот счетчик применялся двумя способами: 1) регистрировались совпадения, когда рассеянный квант

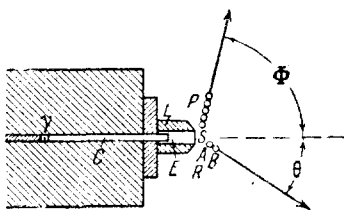


Рис. 4.

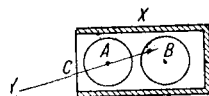


Рис. 5.

вызывал разряд в одном из счетчиков  $P$ , а электрон отдачи разряжал один только счетчик  $A$ ; эти совпадения называются в приводимой ниже таблице „двойными“; 2) регистрировались совпадения, когда рассеянный квант разряжал один из счетчиков  $P$ , а электрон отдачи вызывал разряд в обоих счетчиках  $A$  и  $B$  сразу. Эти совпадения ниже называются „тройными“. Преимущество последнего совпадения состояло в том, что оно регистрирует значительно меньшее количество случайных совпадений, нежели первое. Разрешающую способность установки во времени автор оценивает в  $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ мин.} = 2,64 \cdot 10^{-4} \text{ сек.}$ , т. е. на один порядок величины выше, нежели разрешающая способность установки Боте и Гейгера. Ожидаемое количество случайных совпадений для каждого случая оценивалось по специальным статистическим формулам. Для контроля работы двойного счетчика электронов были произведены предварительные опыты, заключающиеся в том, что перед счетчиком сначала располагался источник  $\beta$ -лучей  $Y$ , а затем — источник  $\gamma$ -лучей. В первом случае было получено большое количество совпадающих отбросов, свидетельствующее о том, что электроны действительно проходят через оба счетчика. Во втором — количество совпадающих отбросов было значительно меньше, нежели количество разрядов каждого счетчика в отдельности; число же одновременных отбросов удовлетворительно согласовалось с вычисленным числом случайных совпадений. Контроль работы всей

установки осуществлялся путем расположения всех счетчиков *P* и *A* и *B* в вертикальной плоскости и подсчета тройных совпадений, обусловленных частицами космических лучей. Получившиеся результаты по утверждению автора (цифры не приведены) хорошо согласуются с результатами, полученными другими исследователями при наблюдениях космических частиц.

ТАБЛИЦА 1

Опыты с тройными совпадениями

| Рассеивающее тело               | Источник (милли-кюри) | $\theta$     | Случайные тройные совпадения (час <sup>-1</sup> ) | Наблюденные тройные совпадения (час <sup>-1</sup> ) | Ожидаемые тройные совпадения (час <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------|-----------------------|--------------|---|---|---|
| Воздух . . . . .                | 135                   | 35°          | 0,4   | 0,0 ± 0,5   | 13  |
| Al <i>t</i> 0,0015 см . . . . . | 140                   | 35°          | 1,7   | 2,4 ± 0,5   | 23  |
| Al <i>t</i> 0,004 . . . . .     | 124                   | 35°          | 4,9   | 4,7 ± 1,5   | 48  |
| Парафин <i>t</i> 0,05 . . . . . | 138                   | 35°          | 9   | 14 ± 3  | 69  |
| Парафин <i>t</i> 0,05 . . . . . | 129                   | <i>j</i> 35° | 9   | 12 ± 4  | 9   |
| Be <i>t</i> 0,02 . . . . .      | 133                   | 35°          | 8   | 9,5 ± 2   | 48  |
| Be <i>t</i> 0,02 . . . . .      | 131                   | <i>j</i> 35° | 8   | 9,5 ± 2   | 8   |

ТАБЛИЦА 2

Опыты с двойными совпадениями

| Рассеивающее тело           | Источник (милли-кюри) | $\theta$     | Случайные двойные совпадения (мин <sup>-1</sup> ) | Наблюденные двойные совпадения (мин <sup>-1</sup> ) | Ожидаемые двойные совпадения (мин <sup>-1</sup> ) |     |
|-----------------------------|-----------------------|--------------|---|---|---|-----|
| Воздух . . . . .            | 105                   | 35°          | 0,67  | 0,92 ± 0,07   | 0,89  |     |
| Воздух . . . . .            | 102                   | <i>j</i> 35° | 0,67  | 0,87 ± 0,08   | 0,67  |     |
| Фильтровальная бумага       |                       |              |   |   |   |     |
| <i>t</i> 0,105 см . . . . . | 195                   | 25°          | 2,5   | 1,9 ± 0,18  | 5,7   |     |
| <i>t</i> 0,015 . . . . .    | 191                   | -25°         | 2,5   | 2,2 ± 0,28  | 2,5   |     |
| Парафин                     |                       |              |   |   |   |     |
| <i>t</i> 0,05 . . . . .     | }                     | 97           | 35°   | 1,5   | 1,8 ± 0,09  | 2,8 |
|                             |                       | 94           | <i>j</i> 35°                                      | 1,5   | 1,8 ± 0,17  | 1,5 |
|                             |                       | 95           | 35°   | 4,5   | 5,6 ± 0,15  | 9,9 |
|                             |                       | 93           | <i>j</i> 35°                                      | 4,5   | 6,0 ± 0,8   | 4,5 |
|                             |                       | 81           | Гор.  | 0,94  | 0,85 ± 0,11                                       | 2,4 |

После того как было установлено, таким образом, что установка работает исправно, были произведены опыты с целью проверки фотонной теории рассеяния. Счетчики фотонов и электронов отдачи располагались под углами, вычисленными при помощи законов сохранения, и измерялось количество совпадений в разрядах тех и других счетчиков. Результаты этих опытов сопоставлены в двух небольших таблицах, которые мы приводим полностью (см. стр. 463).

В этих таблицах  $\theta$  означает угол между направлением первичного пучка и положением счетчиков электронов. Если этот угол дан без всякого знака, то это означает, что счетчики были расположены под углом, требуемым фотонной теорией; знак минус означает, что счетчики электронов были расположены с той же стороны относительно направления падающего пучка, что и счетчики фотонов; наконец, символ  $j$  перед величиной угла означает, что счетчики фотонов были повернуты на  $90^\circ$  и расположены перпендикулярно к плоскости, проходящей через первичный пучок и центры счетчиков фотонов. В этом положении по фотонной теории никаких совпадений (кроме случайных) ожидать нельзя, так как законы сохранения требуют компланарность всех трех векторов количества движения: падающих и рассеянных квантов и электронов отдачи. В последнем столбце приведено количество совпадений, ожидаемое на основании фотонной теории при учете силы источника, геометрии расположения и эффективности действия счетчиков. Автор сам резюмирует полученные результаты следующим образом: „Изучение таблиц позволяет констатировать следующие факты: число совпадений всегда меньше вычисленного по фотонной теории и в действительности очень хорошо совпадает с ожидаемым числом случайных совпадений. Далее, когда счетчик электронов располагается под углом —  $\theta$  или  $j\theta$ , наблюдаемое число совпадений столь же велико, как и в правильном положении  $\theta$ . Это подтверждает взгляд, что все наблюдаемые совпадения были только случайными и что предсказания фотонной теории не подтверждаются нашим опытом. Таким образом настоящая серия опытов вместе с опытами Беннета и Бэрдена дает результаты, противоречащие результатам Боте и Гейгера и Комптона и Саймона. Трудно понять, почему описанные опыты не смогли обнаружить совпадений, если бы последние были реальны; но все без исключения опыты, выполненные автором, дали отрицательные результаты“.

Таким образом окончательный вывод, к которому приходит Шэнкланд, состоит в том, что фотонная теория рассеяния, основанная на законах сохранения энергии и количества движения, неверна. Следует с большой осторожностью относиться как к самим опытам Шэнкланда, так и, разумеется, к его окончательному выводу. Работа опубликована с необычной в таких случаях краткостью. Не приведены детали экспериментальной установки, совершенно отсутствуют хотя бы образцы протоколов и т. п. Все это затрудняет суждение о достоверности результатов. Наиболее сильным аргументом в пользу автора является то, что его работа вы-

полнена под руководством А. Комптона, который, таким образом, вместе с автором несет ответственность за ее результаты. Однако этого аргумента, само собой разумеется, недостаточно для того, чтобы считать вопрос окончательно решенным. Тщательная проверка работы Шэнкланда есть одна из острейших очередных проблем физики\*.

Необходимо, кроме того, иметь в виду следующее. Фотонная теория рассеяния, которую подверг проверке Шэнкланд, целиком основана на классической механике. Квантово-механическая теория должна бы привести к несколько менее жестким требованиям относительно совпадений. Теория Венцеля<sup>6</sup>, основанная на применении волновой механики, приводит, правда, к результатам, практически совпадающим с классической теорией; однако эта теория пригодна лишь для случаев, в которых  $h\nu \ll mc^2$ , между тем как для случая  $\gamma$ -лучей, примененных Шэнкландом,  $h\nu$  во всяком случае того же порядка величины что и  $mc^2$ . Более точная квантово-механическая теория, пригодная и для высоких частот, может привести к менее жестким условиям для угловых соотношений, а в таком случае совпадения должны быть значительно менее вероятны.

Применимость законов сохранения к элементарным процессам, в которых участвуют тяжелые частицы, согласно последним результатам ядерной физики не подлежит никакому сомнению. Достаточно вспомнить вильсоновские фотографии, относящиеся к искусственному преобразованию лития и бора протонами с их трэками, направленными относительно друг друга под углом в  $180^\circ$  или соответственно —  $120^\circ$ , или точнеешим образом установленную связь между дефектом массы и кинетической энергией продуктов распада, или испускание квантов высокой частоты, — строго отвечающей кинетической энергии возможных продуктов распада, в тех случаях, когда распада не происходит и избыток энергии возвращается в виде светового кванта. Равным образом известные опыты Клемперера, недавно вновь выполненные Алихановым, Алиханьяном и Арцимовичем<sup>7</sup> со значительно большей тщательностью и определенностью, свидетельствуют о применимости закона сохранения количества движения даже для такого процесса, как образование двух  $\gamma$ -квантов при аннигиляции пары протон-электрон. Все это вынуждает нас с особенной осторожностью относиться к результатам Шэнкланда, хотя, конечно, изученный им процесс не тождественен с только что указанными. Только многократная и тщательная проверка этих результатов может показать, имеем ли мы здесь дело с ошибкой экспериментатора или, действительно, с новым фактом весьма большого значения. Но даже и в этом последнем случае философская предпосылка о неуничтожаемости движения, разумеется, остается в силе. Если бы оказалось, что инварианты, найденные для макроскопических движений и оказавшись безупречно применимыми и для элементарных микроскопических процессов с тяже-

\* По имеющимся у нас сведениям такая проверка уже предпринята в Ленинградском физико-техническом институте А. И. Алихановым.



лыми частицами, неприменимы к случаю взаимодействия фотона и электрона, то это должно было бы послужить лишь стимулом к отысканию новых более общих инвариантов.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. N. Bohr, H. Kramers a. J. Slater, *Phil. Mag.* **47**, 785, 1924.
  2. W. Bothe a. H. Geiger, *Z. Physik*, **32**, 639, 1925.
  3. A. Compton a. A. Simon, *Phys. Rev.*, **25**, 309, 1925; **26**, 289 1925.
  4. R. Bennet, *Proc. Nat. Acad. Sci.*
  5. R. Shankland, *Phys. Rev.* **49**, 8, 1936.
  6. G. Wentzel, *Z. Physik*, **43**, 1, 1927.
  7. А. И. Алиханьян, А. И. Алиханов, Л. А. Арцимович, *ДАН* **1** (10), № 7, 1936.
-