

Л. В. ГРОШЕВ и И. М. ФРАНК

ИМПУЛЬС ЯДРА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ПАР

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 16 III 1938)

1. В предыдущих сообщениях ^(1,2) было рассмотрено угловое распределение и вероятность образования пар в криптоне под действием γ -лучей ThC". Здесь для тех же пар рассматривается вопрос об импульсе, который при этом процессе передается ядру.

При образовании пар сумма импульсов электрона и позитрона всегда меньше импульса фотона. Для импульсов электрона и позитрона имеем $p_- = \frac{E_-}{c} \beta_1$ и $p_+ = \frac{E_+}{c} \beta_2$, где E_- и E_+ — полные энергии частиц, а β_1 и β_2 — их скорости в долях скорости света. Импульс фотона $P_\nu = \frac{h\nu}{c}$. Так как при образовании пар энергия ядру практически не передается, то

$$h\nu = E_- + E_+. \quad (1)$$

Поскольку β_1 и β_2 меньше единицы, то отсюда следует, что действительно

$$\frac{E_-}{c} \beta_1 + \frac{E_+}{c} \beta_2 < \frac{h\nu}{c}.$$

Следовательно при образовании пар некоторый импульс P всегда передается ядру. Этот импульс равен

$$\bar{P} = \bar{P}_\nu - \bar{P}_p, \quad (2)$$

где P_p — импульс пары, равный сумме импульсов электрона и позитрона:

$$\bar{P}_p = \bar{p}_+ + \bar{p}_-. \quad (3)$$

Импульс пары зависит от угла вылета частиц и от распределения энергии между ними. Максимальный импульс пара будет иметь в том случае, когда электрон и позитрон вылетают в одном направлении, причем энергии обеих частиц одинаковы. Для пар от основной линии ThC" ($h\nu = 5.2 \text{ mc}^2$) этот максимальный импульс равен 4.8 mc . Таким образом минимальный импульс, переданный ядру, в нашем случае $P_{\min} = 5.2 - 4.8 = 0.4 \text{ mc}$ (направления импульсов P_p и P_ν совпадают), и максимальный $P_{\max} = 5.2 + 4.8 = 10 \text{ mc}$ (направления P_p и P_ν противоположны). В этих крайних случаях импульс, переданный ядру, по направлению совпадает с импульсом фотона. В промежуточных случаях он образует с ним острый угол (не больше 58°).

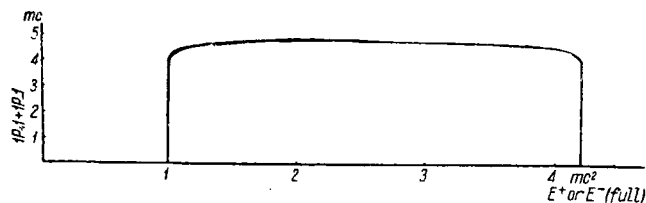
2. В нашем случае при вычислении импульса P возникает трудность, связанная с малой точностью измерения энергий электрона и позитрона в криптоне. Однако при нахождении импульса P можно воспользоваться такой системой координат, в которой две его составляющие могут быть вычислены на основании только угловых измерений, если известна энергия фотонов, образующих пары. Выберем следующую прямоугольную систему координат. Начало координат поместим в вершине пары. Плоскость, в которой лежат направления вылета электрона и позитрона, — плоскость пары, примем за плоскость YZ . Ось Z направим по биссектрисе угла φ между электроном и позитроном с положительным направлением внутрь этого угла. Тогда ось Y будет биссектрисой угла, дополнительного к φ . Положительным направлением Y будем считать направление от электрона к позитрону. Ось X перпендикулярна к плоскости пары и образует с осями Y и Z правую систему.

Составляющие импульса ядра (P_x, P_y, P_z) на основании (2) получим как разность соответствующих составляющих импульсов фотона (P_{vx}, P_{vy}, P_{vz}) и импульса пары (P_{px}, P_{py}, P_{pz}) . При этом P_{px} равно нулю, так как импульс пары лежит в плоскости YZ , $P_{pz} = (p_+ + p_-) \cos \frac{\varphi}{2}$ и $P_{py} = (p_+ - p_-) \sin \frac{\varphi}{2}$, где p_+ и p_- — абсолютные величины импульсов электрона и позитрона. Таким образом имеем:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= P_{vx}, \\ P_z &= P_{vz} - (p_+ + p_-) \cos \frac{\varphi}{2}, \\ P_y &= P_{vy} - (p_+ - p_-) \sin \frac{\varphi}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рассмотрим каждую из этих составляющих в отдельности.

Составляющая $P_x = P_{vx} = P_v \sin \alpha$, где α — угол между направлением фотона и плоскостью пары. Поэтому для определения P_x нужно знать только импульс фотона P_v и угол α . При вычислении было предположено, что полученные нами пары образованы фотонами от основной



Фиг. 1.

линии излучения ThC'' , т. е. $P_v = 5.2 mc$. Угол α из 80 полученных нами пар был вычислен для всех пар за исключением трех. У этих трех пар практически вся энергия сосредоточена у позитрона, поэтому направление вылета электрона, а следовательно и плоскость пары не могут быть определены.

Составляющая P_z кроме углов зависит от суммы $(p_+ + p_-)$. Для нахождения этой суммы в большинстве случаев не нужно знать p_+ и p_- в отдельности. На фиг. 1 приведена зависимость арифметической суммы $(p_+ + p_-)$ от полной энергии одной из частиц. График построен в предположении, что сумма энергий обеих частиц $E_- + E_+ = 5.2 mc^2$. Из приведенной кривой видно, что величину $(p_+ + p_-)$ практически можно считать постоянной, если энергия одной из частиц не меньше 100 экВ.

Этому условию не удовлетворяют только указанные выше три пары. При вычислении P_z для остальных 77 пар ($p_+ + p_-$) положено равным 4.7 мс.

Таким образом при определении составляющих P_x и P_z ошибка при измерении энергии частиц практически исключается.

Для вычисления составляющей P_y кроме углов нужно знать еще величину ($p_+ - p_-$), которая существенным образом зависит от распределения энергии между позитроном и электроном, поэтому определение P_y может быть выполнено лишь с заметно меньшей точностью, чем P_x и P_z . Вычисление этой составляющей было выполнено для 29 пар, у которых измеренная сумма энергии электрона и позитрона лежит в пределах 1400—1800 экВ, т. е. баланс энергии выполняется с точностью до 200 экВ. По всем остальным признакам эти 29 пар ничем не отличаются от остальных: среднее значение всех углов, а также составляющих P_x и P_z оказалось в пределах ошибок совпадающим с средними значениями, вычисленными для остальных пар.

Для этих 29 пар был вычислен также полный импульс P , передаваемый ядру, а также угол между фотоном и импульсом пары. Все результаты приведены ниже.

3. Для численной величины составляющей P_x , перпендикулярной плоскости пары, получено распределение, представленное на фиг. 2,а. Число пар с положительным и отрицательным P_x примерно одинаково. Отсюда следует, что равновероятны случаи, когда P_x образует с позитроном и электроном как правую, так и левую систему.

Как уже было указано, P_x пропорционально $\sin \alpha$, где α — угол между направлением фотона и плоскостью пары. Распределение для этого угла дано в таблице.

Угловой интервал	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	Всего
Число пар	41	21	9	5	1	0	77

Из таблицы видно, что в большинстве случаев угол α имеет малое значение, т. е. плоскость пары не очень сильно отклоняется от направления фотона. Среднее значение $\bar{\alpha} = 12^\circ$.

Распределение величины P_z дано на фиг. 2,б. Знак P_z , как правило, положителен, т. е. в большинстве случаев эта составляющая импульса направлена вперед по биссектрисе угла между электроном и позитроном. Отсюда следует, что угол между направлением фотона и биссектрисой угла ϕ мал. Среднее значение этого угла $\bar{\phi} = 19^\circ$. Обычно импульс пары образует с биссектрисой небольшой угол (он равен нулю, если $E_- = E_+$), поэтому можно ожидать, что и угол $\bar{\epsilon}$, образуемый направлением фотона и импульсом пары, не сильно отличается от $\bar{\phi}$.

Из полученного нами материала резко выпадают три случая. Для них P_z имеет величину, большую 4 мс и притом с отрицательным знаком (они на фиг. 2,б не нанесены). Эти пары отличаются тем, что в них направление вылета позитрона образует с фотоном угол, больший 120° . Повидимому, как уже указывалось и раньше⁽²⁾, эти три пары на самом деле являются не парами, а отражениями комптоновских электронов. При всех вычислениях средних величин эти три случая были исключены.

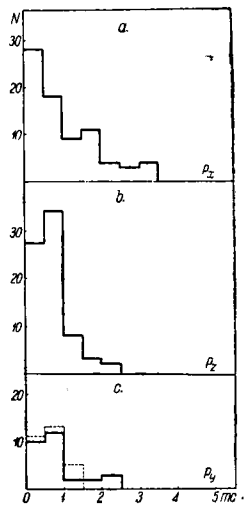
Распределение величины P_y для 29 пар дано на фиг. 2,с. Составляющая P_y , так же как и P_x , с равной вероятностью принимает как

положительные, так и отрицательные значения. Пунктиром на фиг. 2, с дано распределение величины P_z для тех же 29 пар.

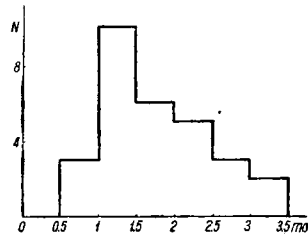
Как видно из фиг. 2, характер распределения для P_y и P_z одинаков и повидимому несколько отличается от распределения для P_x . Среднее значение составляющих $\bar{P}_x = 1.0 \text{ мс}$, $\bar{P}_y = 0.8 \text{ мс}$, $\bar{P}_z = 0.7 \text{ мс}$.

Для 29 пар, у которых известны все три составляющие, был вычислен полный импульс P , передаваемый ядру при образовании пары. Результаты представлены графически на фиг. 3. Среднее значение полного импульса равно 1.7 мс .

Распределение для величины импульса, передаваемого ядру, может быть вычислено теоретически. Такие расчеты были сделаны только для энергий, много больших mc^2 . Для этих энергий получается большая вероятность передачи ядру импульса, много меньшего mc . В нашем случае это невозможно, поскольку минимальный импульс, передаваемый ядру, как уже отмечалось, равен 0.4 мс . Однако повидимому и для энергии $h\nu = 5.2 \text{ мс}^2$ следует ожидать передачи импульса, не сильно отличающегося от минимального, что согласуется с нашими результатами.



Фиг. 2.



Фиг. 3.

В виду того, что импульс P не велик, то угол ϵ между импульсами фотона и пары не может быть большим. Для 29 пар, в которых он был определен, в 24 он не превышает 25° . Среднее значение $\epsilon = 17^\circ$. Это значение хорошо согласуется с оценкой ϵ , сделанной выше при анализе данных о составляющей P_z .

Как уже было отмечено, при рассмотрении импульсов были исключены три пары, в которых позитрон несет практически всю энергию. В них угол между направлением вылета позитрона и направлением фотона равен 5 , 10 и 14° . Так как в этих парах направление движения позитрона практически совпадает с импульсом пары, то эти углы мало отличаются от ϵ , и следовательно и в этих парах угол ϵ мал.

Физический институт им. П. Н. Лебедева.
Академия Наук СССР.
Москва.

Поступило
16 III 1938.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. В. Грошев и И. М. Франк, ДАН, XVIII, № 7, 417 (1938).
² Л. В. Грошев и И. М. Франк, ДАН, XIX, № 1—2 (1938). ³ Н. Bethe a. W. Heitler. Proc. Roy. Soc. A, 146, 83 (1934); Н. Bethe, Proc. Camb. Phil. Soc., 30, 524 (1934.)