

А. А. ВАРФОЛОМЕЕВ, Д. И. ГОЛЕНКО и И. А. СВЕТЛОЛОВ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАСКАДОВ В ФОТОЭМУЛЬСИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

(Представлено академиком И. В. Курчатовым 29 V 1958)

В данной работе приводятся результаты расчетов методом Монте-Карло электромагнитных каскадов на расстоянии до 1,5 радиационных единиц, образуемых электронами с начальной энергией 10^{11} и 10^{12} эв. Расчеты проводились с учетом действительных не асимптотических сечений элементарных электромагнитных процессов (как функций энергии частиц). Проведено два варианта расчетов. В одном варианте использовались лишь соотношения Бете и Гайтлера для элементарных процессов, в другом для учета влияния среды на процессы излучения электронов высокой энергии использовались формулы из работы А. Б. Мигдала ⁽¹⁾. Условия расчета выбирались в соответствии с экспериментальными особенностями метода фотоэмульсий. При постановке задачи были приняты во внимание следующие соображения.

Представляет интерес проверить экспериментально наличие эффектов влияния среды на процессы тормозного излучения при высоких энергиях излучающих частиц. Согласно работам ^(2, 3) вероятность излучения мягких квантов электроном высокой энергии должна быть меньше, чем дают результаты обычной теории Бете и Гайтлера, вследствие влияния многократного рассеяния электронов ⁽²⁾ и вследствие поляризации среды ⁽³⁾. Детальные формулы, учитывающие оба эти эффекта, были получены Мигдалом ⁽¹⁾. Эффекты должны сказываться тем сильнее, чем выше энергия электрона и чем ниже энергия излучаемого кванта.

Наличие этих эффектов можно в принципе проверить по энергетическим спектрам электронов в электронно-фотонных ливнях высокой энергии в космических лучах. С помощью больших стопок фотоэмульсионных слоев, облученных на больших высотах, с достаточной эффективностью регистрируются электронно-фотонные ливни с энергией 10^{11} — 10^{12} эв на расстоянии в несколько радиационных длин. При этом можно с большой точностью восстановить пространственную картину ливня и провести измерения энергетического спектра вторичных электронов (пар) в области 10^8 — $5 \cdot 10^9$ эв по многократному рассеянию. Произведенные оценки показывают, что для

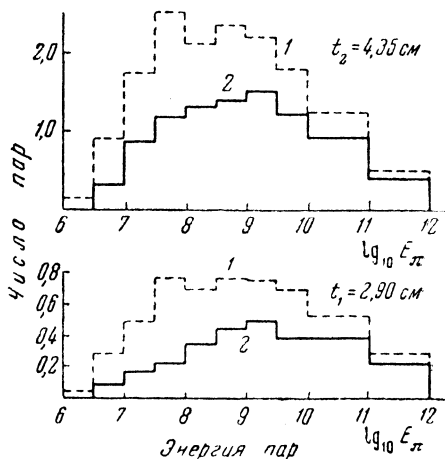


Рис. 1. Дифференциальный энергетический спектр электронно-позитронных пар, образуемых в фотоэмульсии на глубинах соответственно вплоть до t_1 и t_2 . Начальная энергия первичного электрона $E_0 = 10^{12}$ эв. 1 — расчет по Бете и Гайтлеру; 2 — расчет с учетом формул Мигдала

обнаружения рассматриваемых эффектов при имеющихся экспериментальных возможностях имеет смысл исследовать электронно-фотонные ливни с начальной энергией $10^{11} \div 10^{12}$ эв в начале их развития на глубине до $1 \div 1,5$ радиационных длин. Таким образом, желательно иметь теоретически ожидаемые спектры ливневых частиц, справедливые в области небольших энергий этих частиц и на малых глубинах. Последнее условие требует правильного учета сечений элементарных процессов. Использование асимптотических значений сечений, как это делается в обычных каскадных теориях, становится несправедливым на столь малых глубинах для рассматриваемых энергий вторичных частиц. Кроме того, для учета влияния среды необходимо использование правильных значений сечений тормозного излучения. Этим и определяется выбор метода расчета Монте-Карло.

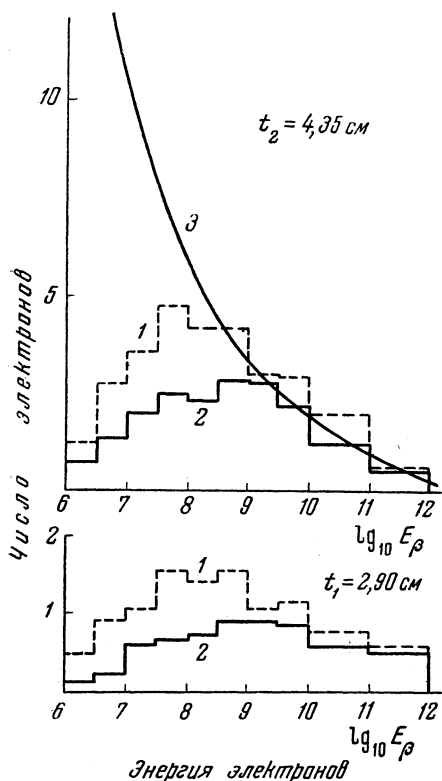


Рис. 2. Дифференциальный энергетический спектр вторичных электронов (позитронов), достигающих глубины соответственно t_1 и t_2 . Начальная энергия первичного электрона $E_0 = 10^{12}$ эв. Гистограмма 1 — расчет по Бете и Гайтлеру; гистограмма 2 — расчет с учетом формул Мигдала; кривая 3 — расчет Арли

Условия расчета каскадов были следующими. Первичными частицами считались электроны с энергией 10^{11} и 10^{12} эв. Прослеживались все частицы с полной энергией больше $1,5 \cdot 10^6$ эв. Учитывались следующие элементарные процессы в поле ядер и электронов компонент эмульсии: тормозное излучение, образование пар квантами, образование пар электронами, комптон-эффект, фотоядерное поглощение, ионизационное торможение электронов. Сечения элементарных процессов рассчитывались с учетом ядерного

состава эмульсий Илфорд G-5. (За радиационную единицу длины принималась величина $t_0 = 2,90$ см.) Пространственное распределение частиц не учитывалось. Задача считалась одномерной. Результирующие данные относились к двум значениям глубины t (расстояния от начала пути первичного электрона): $t_1 = 1,0 t_0$ и $t_2 = 1,5 t_0$. Все расчеты проводились на электронной вычислительной машине. В среднем на каждый из двух вариантов при одном значении первичной энергии сосчитано по 100 деревьев.

В результате для каждого из вариантов получены следующие данные:
 1) Энергетические спектры электронно-позитронных пар, образуемых на глубинах вплоть до t_1 и t_2 соответственно для начальной энергии 10^{12} эв (рис. 1) и 10^{11} эв (табл. 1).
 2) Энергетические спектры электронов, достигающих глубин соответственно t_1 и t_2 при начальной энергии 10^{12} эв (рис. 2) и 10^{11} эв (табл. 1).
 3) Некоторые данные, позволяющие судить о флуктуациях результатов и зависимости флуктуаций от рассматриваемой глубины t , начальной энергии, энергетического интервала вторичных частиц.

Как видно из рис. 1, при начальной энергии $E_0 = 10^{12}$ эв число пар с энергиями $\leq 10^9$ эв уменьшается за счет влияния среды в $\sim 2,5$ раза на глу-

786

Дифференциальные энергетические спектры электронов и пар в ливне, вызываемом первичным электроном с энергией 10^{11} эв

Интервал энергии, эв	Число пар				Число электронов			
	t_1 , Б.-Г.	t_1 , М.	t_2 , Б.-Г.	t_2 , М.	t_1 , Б.-Г.	t_1 , М.	t_2 , Б.-Г.	t_2 , М.
$10^6-3 \cdot 10^6$	0,030	0,012	0,129	0,084	0,307	0,120	0,950	0,614
$3 \cdot 10^6-5 \cdot 10^6$	0,040	0,012	0,099	0,145	0,228	0,145	0,594	0,385
$5 \cdot 10^6-10^7$	0,109	0,096	0,525	0,313	0,466	0,398	1,287	0,927
$10^7-3 \cdot 10^7$	0,416	0,313	1,238	1,048	0,930	0,771	2,742	2,180
$3 \cdot 10^7-10^8$	0,594	0,602	1,881	1,590	1,158	1,012	3,238	2,746
$10^8-3 \cdot 10^8$	0,594	0,422	1,871	1,301	1,020	1,00	2,881	2,277
$3 \cdot 10^8-10^9$	0,505	0,639	1,416	1,518	1,069	1,036	2,188	2,337
$10^9-3 \cdot 10^9$	0,643	0,446	1,198	1,024	0,792	0,807	1,456	1,903
$3 \cdot 10^9-10^{10}$	0,396	0,400	1,078	1,014	0,722	0,699	1,554	1,349
$10^{10}-10^{11}$	0,545	0,518	0,991	0,939	1,129	1,156	1,198	1,120

бине $t_1 = 1,0 t_0$ и почти в 2 раза на глубине $t_2 = 1,5 t_0$. При $E_0 = 10^{11}$ эв (табл. 1) число пар с энергиями $\leq 3 \cdot 10^8$ эв уменьшается примерно на 20%. Различие в спектрах электронов несколько меньше. Отсюда видно, что выгоднее измерять спектры электронно-позитронных пар.

На рис. 3 показаны распределения деревьев по числу всех электронов при энергии $E_0 = 10^{12}$ эв. Видно, что относительные флуктуации больше при учете влияния среды (М.).

Полученные результаты показывают, что исследование всего нескольких ливней с энергией 10^{12} эв уже позволит сделать определенные суждения о наличии рассматриваемых эффектов. Ливней с энергией 10^{11} эв для той же цели понадобилось бы в несколько раз больше.

Хотя расчеты проведены для конкретной среды — фотоэмульсии, полученные результаты могут быть с некоторыми допущениями использованы для других сред. Во всяком случае, они окажутся полезными там, где не оправдано использование асимптотических формул Бете и Гайтлера для элементарных процессов, что делается во всех существующих каскадных теориях. Из аналитических методов расчета на малых глубинах наиболее справедливым является метод последовательных приближений. На рис. 2 показаны для сравнения дифференциальный спектр электронов, полученный нами (в виде гистограмм), и кривая Арли⁽⁴⁾ для того же спектра, полученная методом последовательных приближений. В мягкой области видно существенное различие.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность И. И. Гуревичу за интерес к работе и обсуждение результатов и И. П. Лаврушкину за помощь в оформлении результатов.

Поступило
15 V 1958

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. Б. Мигдал, Phys. Rev., **103**, 1811 (1956); ЖЭТФ, **32**, 633 (1957). ² Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчук, ДАН, **92**, 535, 735 (1953). ³ М. Л. Тер-Микаелян, ДАН, **94**, 1033 (1954). ⁴ N. Arley, Proc. Roy. Soc., A, **168**, 519 (1938).

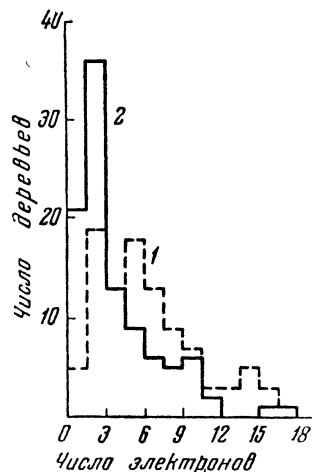


Рис. 3. Распределение деревьев по числу всех электронов с энергией $\geq 1,0 \cdot 10^6$ эв, достигающих глубины t_1 . Начальная энергия первичного электрона $E_0 = 10^{12}$ эв. 1 — расчет по Бете и Гайтлеру; 2 — расчет с учетом формул Мигдала