



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

5498 /
2-81

9/11-81

P1-81-599

А.Банцрек,* Ю.Вавжинский,* Л.С.Охрименко,
Б.Словинский,* В.Чай *

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ
В ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫХ ЛИВНЯХ,
ВЫЗВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ $E_\gamma = (600 \div 2700)$ МэВ
В ЖИДКОМ КСЕНОНЕ

Направлено в ЯФ

* Варшавский технический университет

1981

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение пространственного распределения ионизационных потерь в электронно-фотонных ливнях /ЭФЛ/, вызванных гамма-квантами высоких энергий, является предметом все возрастающего интереса, в основном, с методической точки зрения. Результаты этих исследований нашли наиболее важное практическое применение в экспериментах по изучению ядерных взаимодействий адрон-ядро и ядро-ядро, равным образом в интервале энергий, достигаемых как на ускорителях, так и в космических лучах.

Настоящая работа является продолжением более ранних работ, в которых нами получено компактное аналитическое описание средних ионизационных потерь ливневых электронов и позитронов /далее: электронов/ в ЭФЛ, образованных гамма-квантами с энергией $E_\gamma = /60 \pm 2000/$ МэВ^{1/2}. Цель данной работы состоит в уточнении значений параметров α^* , β , γ и δ феноменологической формулы /1/:

$$\frac{\Delta E(E_\gamma, E_0, t, \rho)}{2\pi r \Delta \rho \Delta t} = \frac{\alpha^*}{2\sigma^2} \cdot t^\gamma \cdot \exp\left[-\left(\beta t^2 + \frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right)\right], \quad /1/$$

которая определяет зависимость от энергии E_γ гамма-кванта средних дифференциальных ионизационных потерь $\Delta E(E_\gamma, E_0, t, \rho) / 2\pi r \Delta \rho \Delta t$ электронов с энергией выше некоторого порогового значения E_0 на глубине t^* в элементе объема $2\pi r \Delta \rho \Delta t$ /этот элемент представляет собой кольцо радиусом r и толщиной $\Delta \rho$ в плоскости, перпендикулярной к ОР, а также толщиной Δt вдоль ОР/. Кроме этого, полученный нами экспериментальный материал позволил расширить область применения формулы /1/, по крайней мере качественно, до значения $E_\gamma \approx 2700$ МэВ, что особенно важно для экспериментов, проводимых с использованием космических лучей.

Работа выполнена на снимках со 180-литровой ксеноновой пьюзьковской камеры /КПК/ ИТЭФ /Москва/, облученной в пучке π^- -мезонов с импульсом 3,5 ГэВ/с, и 26-литровой КПК ЛВЗ ОИЯИ, экспонированной в пучке π^+ -мезонов с импульсом 2,34 ГэВ/с.

* Глубина t развития ЭФЛ отсчитывается от точки конверсии первичного гамма-кванта, вдоль оси развития /ОР/ лавины.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В результате просмотра 15 тыс. стереофотографий 180-л. КПК было отобрано 229 случаев ЭФЛ, удовлетворяющих соответствующим критериям. При аналогичном просмотре 25 тыс. стереоснимков 26-л. КПК получено 50 случаев ЭФЛ. Для каждого отобранного события ЭФЛ определялась, по суммарному пробегу ливневых электронов^{/2/}, энергия первичного гамма-кванта, образовавшего ливень, а также, как и ранее^{/1/}, набор величин

$$\frac{\Delta \Sigma r_i}{\Delta p \Delta t} = \frac{\Delta \Sigma r_i(E_\gamma, E_0, t, p)}{\Delta p \Delta t} \quad /2/$$

Эти величины представляют собой так называемые частичные суммарные длины пробегов электронов лавины /ЧСП/, наблюдаемые в плоскости проекции снимка внутри прямоугольника размером $\Delta t = 0,588$ радиационных единиц /рад.ед./ * вдоль ОР и $\Delta p = 0,294$ рад.ед. в направлении, перпендикулярном к ОР.

В качестве пороговой энергии E_0 были взяты два значения, представляющие наибольший практический интерес: $E_{01} = (1,5^{+1,0}_{-1,5})$ МэВ и $E_{02} = (3 \pm 1,2)$ МэВ. Ранее^{/1/} первое значение пороговой энергии,

$E_0 = (1,5^{+1,0}_{-1,5})$ МэВ, принималось нами практически равным нулю, так как оно соответствует учету ливневых электронов с минимальной длиной пробега, наблюдаемой в плоскости снимка, равной нулю. Однако результаты моделирования на ЭВМ коротких следов электронов в данных экспериментальных условиях показывают, что среднее значение пороговой энергии при этом получается равным $E = (1,5^{+1}_{-1,5})$ МэВ.

Экспериментальная процедура более подробно описана в^{/1/}. Для дальнейшего анализа использованы ливни, отобранные равным образом для настоящей работы, как и часть случаев ЭФЛ, полученная ранее^{/1/} и попадающая в рассматриваемый энергетический интервал: $E_\gamma = /600 \pm 2700/$ МэВ. Таким образом, получен 361 случай ЭФЛ. Распределение всех этих событий по энергии E_γ приведено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение случаев электронно-фотонных ливней, изучаемых в данной работе, по энергии E_γ гамма-квантов, образовавших ливни

E_γ	680	875	1125	1375	1625	1875	2125	2375	2625
/МэВ/	$+70$	$+125$	$+125$	$+125$	$+125$	$+125$	$+125$	$+125$	$+125$
	53	89	62	47	45	28	19	12	6

* Принято, что 1 рад.ед. жидкого ксенона равна $40,5^{+1,7}$ мм^{/3/}.

3. СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Выполненный в настоящей работе анализ полученных экспериментальных данных состоит, как и ранее^{/1/}, во-первых, в определении проекции на плоскость снимка дифференциальных ионизационных потерь ливневых электронов /ДИП/, $\Delta e(E_\gamma, E_0, t, p) / \Delta p \Delta t$, соответствующих элементу раstra площадью $\Delta p \Delta t$, по экспериментально измеренным значениям ЧСП, т.е. в преобразовании:

$$\frac{\Delta e(E_\gamma, E_0, t, p)}{\Delta p \Delta t} = \eta \frac{\Delta \sum_i r_i(E_\gamma, E_0, t, p)}{\Delta p \Delta t} \quad /3/$$

Во-вторых, целью этого анализа является статистическое описание зависимости $\Delta e(E_\gamma, E_0, t, p) / \Delta p \Delta t$ от E_γ , t и p для двух различных значений E_0 : 1,5 МэВ и 3 МэВ, согласно эмпирическим функциям регрессии, введенным нами ранее^{/1/}.

3.1. Зависимость между ЧСП и ДИП

В работе^{/2/} было получено линейное соотношение между суммарным пробегом ливневых электронов в пространстве, $\sum_i R_i$, и энергией E_γ гамма-кванта, вызывающего ливень:

$$E_\gamma = \alpha \cdot \sum_i R_i, \quad /4/$$

где $\alpha = /0,59 \pm 0,02/$ МэВ/мм.

Зависимость между соответствующими дифференциальными величинами, а точнее, между $\Delta \sum_i r_i(E_\gamma, E_0, t, p) / \Delta p \Delta t$ и $\Delta e(E_\gamma, E_0, t, p) / \Delta p \Delta t$,

можно также формально представить в виде линейного соотношения /3/, однако при этом коэффициент η уже не обязательно должен быть постоянной величиной. В общем случае он является функцией E_γ , E_0 , t и p :

$$\eta = \eta(E_\gamma, E_0, t, p). \quad /5/$$

Из общефизических соображений модельного характера относительно пространственного развития ЭФЛ следует, что зависимость /5/ можно свести, по крайней мере с точки зрения поставленной здесь методической задачи, к следующему виду:

$$\eta = \eta'(E_0) \eta''(E), \quad /6/$$

где величина $\eta'(E_0)$ является нормировочной константой, соответствующей данному конкретному значению энергии обрезания E_0 . В частности, $\eta' / E_0 = 1,5 \text{ МэВ} / = 1,46$. Зависимость же η от E_γ , t и p можно заменить функцией $\eta''(E)$ энергии E ливневых электронов.

С целью изучения зависимости $\eta^{\text{м}}(E)$ было выполнено на ЭВМ ODR-1305 моделирование 400 следов электронов с энергией $E = 1,5 \pm 1000$ МэВ в жидком ксеноне. Учтено при этом многократное кулоновское рассеяние, тормозное излучение и ионизационные потери, а также равновесный спектр ливневых электронов [напр., /4/]. В результате проведенного анализа получено, что коэффициент η является, с точностью $\pm 3\%$, постоянной величиной, равной при $E_0=1,5$ МэВ константе α в соотношении /4/. Так как эта точность заметно превышает точность определения ЧСП /относительная дисперсия $\sigma_{\Delta\Sigma_T} / \Delta\Sigma_T \approx 0,20$ /, то в дальнейшем принято, что $\eta = \alpha$ для всего исследуемого интервала значений энергии гамма-квантов, образующих ливни.

3.2. Общий вид функции распределения ионизационных потерь в ЭФЛ

Одним из авторов /Б.С./ был предложен следующий общий вид функции, описывающей распределение ионизационных потерь ливневых электронов в плоскости снимка:

$$f(E_\gamma, E_0, t, \rho) = \frac{\Delta\epsilon(E_\gamma, E_0, t, \rho)}{\Delta\rho \Delta t} = f_1(E_\gamma, E_0, t) f_2(E_\gamma, E_0, \rho, t). \quad /7/$$

Здесь: $f_1(E_\gamma, E_0, t)$ - так называемая функция продольного развития ливня, описывающая развитие ЭФЛ вдоль ОР, $f_2(E_\gamma, E_0, \rho, t)$ - так называемая функция поперечного развития лавины, эквивалентная функции условной вероятности распределения ионизационных потерь в плоском слое вещества, перпендикулярном к ОР и находящемся на расстоянии t от точки конверсии первичного гамма-кванта. Выражение /7/ удобно тем, что в нем в явном виде фигурирует функция продольного развития ЭФЛ, которую можно получить, в частности, из одномерной каскадной теории /4,5/, а также функция поперечного развития, ограничивающего угловую разрешающую способность детекторов гамма-квантов высоких энергий.

Воспользовавшись свойством осевой симметрии ЭФЛ /в статистическом смысле/ легко преобразовать функцию /7/ в функцию $F(E_\gamma, E_0, t, \rho)$ /1/ пространственного распределения ионизационных потерь ливневых электронов

$$F(E_\gamma, E_0, t, \rho) = \frac{\Delta E(E_\gamma, E_0, t, \rho)}{2\pi\rho \Delta\rho \Delta t} = F_1(E_\gamma, E_0, t) F_2(E_\gamma, E_0, \rho, t). \quad /8/$$

Здесь

$$F_1(E_\gamma, E_0, t) = f_1(E_\gamma, E_0, t) \quad /9/$$

есть та же самая функция продольного развития ливня, в то время как функции F_2 и f_2 связаны простым интегральным уравнением

$$f_2(E_\gamma, E_0, p, t) = 2 \int_0^{\infty} F_2(E_\gamma, E_0, p, t) \frac{dp}{\sqrt{1-p^2}/p^2} \quad /10/$$

На основании общефизических соображений модельного характера относительно процесса развития ЭФЛ в нашей ранее опубликованной работе^{1/} был установлен конкретный вид функций f_1 и f_2 :

$$f_1(E_\gamma, E_0, t) = \alpha^* t^\gamma \exp(-\beta t^2), \quad /11/$$

$$f_2(E_\gamma, E_0, p, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-p^2/2\sigma^2), \quad /12/$$

где параметры α^* , β , γ и σ являются, в свою очередь, функциями E_γ и E_0 , а σ — также и переменной t . Эти параметры надо определить по экспериментальным данным о ЧСП /2/. В настоящей работе значения таких параметров существенно уточнены на основании значительно большего числа изученных событий ЭФЛ в данном интервале значений энергии E_γ . Функция /8/ с учетом формул /9/, /10/, /11/, /12/, а также полученных здесь численных значений параметров составляет полное описание пространственного распределения средних ионизационных потерь ливневых электронов в виде, данном соотношением /1/.

3.3. Продольное развитие ЭФЛ

В результате выполненного по тесту χ^2 статистического анализа гипотезы /11/ получен набор значений параметров α^* , β и γ , соответствующих различным значениям E_γ и E_0 . Данные помещены в табл.2 и 3. При этом параметр α^* определен таким образом, чтобы выполнялось условие нормировки:

$$\int_0^{\infty} f_1(E_\gamma, E_0, t) dt = E_\gamma, \quad /13/$$

где энергия E_γ выражена в МэВ.

Как и ранее^{1/}, зависимость величин α^* , β и γ от E_γ аппроксимировалась следующими простыми функциями:

$$\alpha^* = a_1 E_\gamma^{b_1}, \quad /14/$$

$$\beta = a_2 E_\gamma^{-b_2} + c, \quad /15/$$

$$\gamma = a_3 E_\gamma^{b_3}. \quad /16/$$

Полученные численные значения параметров a_i , b_i ($i=1,2,3$) даны в табл.4. Там же приведены значения тестовой статистики χ^2 , которые, совместно с аналогичными данными относительно вида

/11/ функции $f_1(E_\gamma, E_0, t)$ /табл. 2 и 3/, говорят о том, что принятые нами гипотезы относительно продольного развития ЭФЛ не противоречат экспериментальным данным с удовлетворительной вероятностью.

Таблица 2

Численные значения параметров α^* , β и γ функции /11/ продольного развития ЭФЛ. E_γ - энергия гамма-квантов, инициирующих ливни. χ_n^2 - значение тестовой статистики χ^2 при n степенях свободы. Длина t выражена в единицах $\Delta t = 0,588$ рад.ед. Данные соответствуют энергии обрезания ливневых электронов $E_0 = 1,5$ МэВ

E_f (МэВ)	α^*	$\beta \cdot 10^3$	γ	χ_n^2/n
680	52,1 \pm 4,3	22 \pm 2	0,64 \pm 0,05	13,0/16
875	56,9 \pm 3,8	19 \pm 1	0,67 \pm 0,04	7,3/19
1125	54,5 \pm 4,2	16 \pm 1	0,76 \pm 0,04	11,6/19
1375	58,2 \pm 4,6	16 \pm 1	0,84 \pm 0,05	13,5/21
1625	55,9 \pm 3,9	13 \pm 1	0,85 \pm 0,05	14,6/21
1875	56,3 \pm 4,4	11 \pm 1	0,83 \pm 0,05	9,9/21
2125	72,8 \pm 7,4	11 \pm 1	0,77 \pm 0,07	4,8/22
2375	67,4 \pm 5,2	11 \pm 1	0,87 \pm 0,09	8,5/22
2625	54,6 \pm 4,1	11 \pm 1	1,03 \pm 0,11	5,0/22

Таблица 3

То же самое, что и в таблице 2, но для энергии обрезания $E_0 = 3$ МэВ

E_f (МэВ)	α^*	$\beta \cdot 10^3$	γ	χ_n^2/n
680	56,4 \pm 4,4	23 \pm 2	0,61 \pm 0,05	11,8/16
875	57,6 \pm 4,0	18 \pm 1	0,63 \pm 0,04	7,6/19
1125	54,5 \pm 4,3	16 \pm 1	0,73 \pm 0,04	10,2/19
1375	61,3 \pm 4,9	16 \pm 1	0,81 \pm 0,05	14,7/21
1625	54,7 \pm 4,1	12 \pm 1	0,82 \pm 0,05	13,8/21
1875	58,4 \pm 4,5	11 \pm 1	0,82 \pm 0,05	9,8/21
2125	75,5 \pm 7,6	11 \pm 1	0,75 \pm 0,07	4,4/22
2375	71,2 \pm 5,2	11 \pm 1	0,84 \pm 0,09	8,0/22
2625	57,7 \pm 4,3	11 \pm 1	1,00 \pm 0,10	4,5/22

Таблица 4

Численные значения констант $a_i, b_i / i = 1, 2, 3/$ и c функций /14/, /15/ и /16/, аппроксимирующих зависимость параметров функции /11/ продольного развития ЭФЛ от энергии E_γ первичных гамма-квантов и энергии E_0 ливневых электронов. χ_n^2 - значения тестовой статистики χ^2 при n степенях свободы

i	$E_0 = 1,5 \text{ МэВ}$			$E_0 = 3 \text{ МэВ}$		
	a_i	b_i	χ_n^2/n	a_i	b_i	χ_n^2/n
1	$29,3 \pm 6,6$	$0,09 \pm 0,02$	2,1/8	$27,6 \pm 3,5$	$0,11 \pm 0,02$	2,7/8
2	$19,3 \pm 4,5$	$1,09 \pm 0,20$	1,8/8	$83,3 \pm 24,0$	$1,33 \pm 0,20$	1,5/8
3	$0,09 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,04$	1,8/8	$0,07 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,04$	1,6/8
	$c = 0,008 \pm 0,002$			$c = 0,008 \pm 0,002$		

Таблица 5

Численные значения параметров m и b формулы /17/, описывающей зависимость дисперсии поперечного развития ЭФЛ от глубины t развития ливней. E_γ - энергия гамма-квантов, создающих лавины; E_0 - энергия обрезания ливневых электронов. χ_n^2 - значения тестовой статистики χ^2 при n степенях свободы. t выражено в единицах, равных 0,588 рад.ед.

E_γ (МэВ)	$E_0 = 1,5 \text{ МэВ}$			$E_0 = 3 \text{ МэВ}$		
	$m \cdot 10^2$	$b \cdot 10^2$	χ_n^2/n	$m \cdot 10^2$	$b \cdot 10^2$	χ_n^2/n
680	8 ± 2	46 ± 8	5,0/13	7 ± 2	50 ± 8	7,1/13
875	10 ± 1	42 ± 6	1,9/17	10 ± 1	41 ± 6	1,4/17
1125	10 ± 1	37 ± 7	5,8/18	10 ± 1	35 ± 7	8,8/18
1375	10 ± 1	42 ± 7	5,5/19	10 ± 1	42 ± 7	5,3/19
1625	8 ± 1	48 ± 6	7,2/20	8 ± 1	48 ± 7	6,9/20
1875	7 ± 1	51 ± 8	13,5/20	8 ± 1	50 ± 8	11,9/20
2125	10 ± 2	41 ± 9	8,9/20	10 ± 2	40 ± 10	8,9/20
2375	11 ± 2	31 ± 11	8,3/19	11 ± 2	32 ± 11	8,4/19
2625	6 ± 2	57 ± 13	9,4/19	6 ± 2	57 ± 13	9,6/19

3.4. Поперечное развитие ЭФЛ

Измеренный экспериментально набор около 50 тыс. величин ЧСП /2/ был аппроксимирован функцией /12/, где, как и ранее /1/, принято, что:

$$\sigma = m \cdot t + b \quad /17/$$

Здесь параметры m и b суть функции энергии E_y и энергии обрезания E_0 . Полученные численные значения параметров представлены в табл.5.

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что параметры m и b не зависят, при достигнутой точности эксперимента, ни от E_y , ни от E_0 в рассматриваемом интервале значений E_y . Следовательно, на практике можно воспользоваться их значениями, усредненными по всему интервалу E_y и обоим значениям E_0 : $m = 0,088 \pm 0,017$, $b = 0,438 \pm 0,074$. Видно также, что проверяемая нами гипотеза /12/ относительно поперечного развития ЭФЛ удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

4. ВЫВОДЫ

На основании выполненных измерений длин пробегов электронов в электронно-фотонных ливнях, вызванных гамма-квантами с энергией $E_y = /600 \pm 2700/$ МэВ в жидком ксеноне, и последующего статистического анализа полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Пространственное распределение ионизационных потерь ливневых электронов удовлетворительно описывается ранее полученной нами формулой /1/ /1/.

2. Уточнены на большем объеме экспериментального материала в рассматриваемом интервале энергии E_y численные значения параметров, входящих в функции продольного /11/ и поперечного /12/ развития ЭФЛ, и, следовательно, в функцию /1/, описывающую пространственную структуру ионизационных потерь ливневых электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Словинский Б., Чай В. ОИЯИ, Р1-80-610, Дубна, 1980.
2. Коновалова Л.П. и др. ПТЭ, 1961, 6, с.261.
3. Ничипорук Б. и др. ОИЯИ, Р-2808, Дубна, 1966.
4. Беленький С.З., Иваненко И.П. УФН, 1951, 69, с.591.
5. Иваненко И.П. Электромагнитные каскадные процессы. Изд-во МГУ, М., 1972.