

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



15/1-79

P1 - 11890

C - 482

Б.Словинский

135/2-79

ФЛУКТУАЦИИ В ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫХ ЛИВНЯХ,
ОБРАЗОВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ 30-3400 МэВ

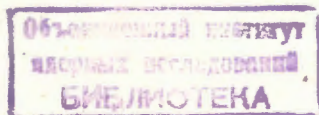
1978

P1 - 11890

Б.Словинский

ФЛУКТУАЦИИ В ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫХ ЛИВНЯХ,
ОБРАЗОВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ 30-3400 МэВ

Направлено в "Письма в ЖЭТФ"



Словинский Б.

PI - 11890

Флуктуации в электронно-фотонных ливнях, образованных гамма-квантами с энергией 30-3400 МэВ

В работе собраны и проанализированы результаты измерений ионизационных потерь ливневых электронов в электронно-фотонных ливнях, вызванных гамма-квантами с энергией 30-3400 МэВ в жидком ксеноне. Получена простая и удобная для практического использования аппроксимация зависимости между относительной дисперсией σ_A/\bar{A} доли A энерговыделения в ливнях, соответствующих глубине развития, на которой, в среднем, выделяется доля A энергии ливни, и параметром A .

Полученный результат может найти применение в различных методах регистрации гамма-квантов высоких энергий.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Slowinski B.

PI - 11890

Fluctuations in Electron Showers Produced by Gamma-Quanta of 30-3400 MeV Energies

Results of measurements of ionization losses for shower electrons in electron-photon showers produced by gamma-quanta of 30-3400 MeV energies in liquid xenon are assembled and analyzed. A simple and convenient for practical utility approximation is obtained of dependence between relative dispersion σ_A/\bar{A} and the parameter A , being the fraction of energy spent by electrons on the development depth on which on the average the fraction A of the total energy of shower is realized. The obtained results can be applied in various methods of registering high energy gamma-quanta.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

1. ВВЕДЕНИЕ

Флуктуации энерговыделения в электронно-фотонных ливнях являются одним из основных источников ошибок в определении энергии E_γ первичных гамма-квантов, образующих эти ливни в регистрирующей среде детектора. Поскольку в области достаточно высоких энергий E_γ / несколько десятков МэВ и выше / продольные размеры ливней значительно превышают их поперечные размеры, то определяющими являются практически именно флуктуации продольного развития ливней.

В качестве оценки флуктуации продольного развития ливни целесообразно взять величину относительной дисперсии σ_A/\bar{A} доли A суммарного пробега ливневых электронов, соответствующей длине d развития ливня, на которой, в среднем, выделяется в виде ионизации доля A полной энергии ливни $^{1-4}$. Такой выбор удобен тем, что величины A и σ_A/\bar{A} не зависят от свойств конкретной среды, в которой развивается электромагнитный ливень. Так как, в дополнение к этому, A является хорошей оценкой не только доли суммарных ионизационных потерь ливневых электронов, но также суммарного светового эффекта, сопровождающего каскадный электромагнитный процесс, и суммарного числа электронов и позитронов ливня, наблюдаемых на данной длине его развития 1,2 , то продольные флуктуации энерговыделения в ливне, выраженные в виде зависимости относительной дисперсии σ_A/\bar{A} параметра A от \bar{A} , могут найти практическое применение в любой методике детектирования гамма-квантов высоких энергий.

В настоящей работе приведены и проанализированы с точки зрения практического применения ранее полученные ¹⁻⁴ результаты измерения относительной дисперсии σ_A/\bar{A} доли A суммарного пробега ливневых электронов в электронно-фононных лавинах, вызванных гамма-квантами с энергией $E_\gamma = 30 \div 3400$ МэВ в жидком ксеноне.

2. Зависимость σ_A/\bar{A} от A

В табл. 1 содержатся значения относительных дисперсий σ_A/\bar{A} доли A ионизационных потерь ливневых электронов на длине d полной энергии лавины. Приведенные данные соответствуют различным значениям энергии E_γ гамма-квантов, образующих ливни в жидком ксеноне. Можно заметить, что зависимость σ_A/\bar{A} от A весьма незначительно меняет вид при изменении энергии E_γ на два порядка величины - от 30 МэВ до 4 ГэВ. Это обстоятельство позволяет единым образом описать соотношение между σ_A/\bar{A} и \bar{A} в широком интервале значений энергии E_γ гамма-квантов, образующих ливни. Для аппроксимации экспериментальных данных была взята следующая функция:

$$\sigma_A/\bar{A} = \left| \left\{ \frac{1}{b} \ln \frac{a}{\bar{A}} \right\}^{1/2} \right|, \quad /1/$$

где a и b - параметры, определяемые при статистической подгонке. Значения этих параметров, а также соответствующие значения вероятности фитирования для одиннадцати значений энергии E_γ приведены в табл. 2. Указанные ошибки относятся только к точности подгонки. Из приведенной таблицы видно, что с целью дальнейшего обобщения полученных экспериментальных данных можно положить $\bar{b} = 13,6 \pm 1,3$ и

$$a(E_\gamma) = a - \beta E_\gamma, \quad /2/$$

где $a = 1,02$, $\beta = 1,3 \cdot 10^{-5} / \text{МэВ}^{-1}$.

Таблица 1
Значения относительных флуктуаций σ_A/\bar{A} доли A ионизационных потерь ливневых электронов на длине d развития ливня, на которой выделяется, в среднем, доля \bar{A} полной энергии лавины, образованной гамма-квантом с энергией E_γ в жидком ксеноне. A и σ_A/\bar{A} выражены в процентах.

E_γ (МэВ)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
30	36 ⁺¹¹	35 ⁺⁷	35 ⁺⁸	35 ⁺⁴	35 ⁺⁴	34 ⁺⁵	26 ⁺³	19 ⁺³	13 ⁺²	10 ⁺²
50	30 ⁺¹¹	33 ⁺⁷	32 ⁺⁸	33 ⁺⁴	27 ⁺⁴	24 ⁺⁵	22 ⁺³	23 ⁺³	17 ⁺²	12 ⁺²
70	40 ⁺¹¹	46 ⁺⁷	40 ⁺⁸	36 ⁺⁴	30 ⁺⁴	27 ⁺⁵	22 ⁺³	18 ⁺³	15 ⁺²	13 ⁺²
100	48 ⁺⁸	39 ⁺⁴	32 ⁺⁴	28 ⁺³	27 ⁺³	25 ⁺²	20 ⁺²	20 ⁺²	14 ⁺²	5 ⁺¹
120	44 ⁺¹¹	44 ⁺⁷	37 ⁺³	43 ⁺⁴	31 ⁺⁴	29 ⁺⁵	27 ⁺³	23 ⁺³	18 ⁺²	13 ⁺²
200	55 ⁺⁹	33 ⁺⁴	28 ⁺³	31 ⁺⁴	25 ⁺³	25 ⁺³	22 ⁺²	19 ⁺²	12 ⁺²	5 ⁺¹
500	50 ⁺¹⁰	35 ⁺⁷	25 ⁺⁶	26 ⁺⁶	25 ⁺³	21 ⁺⁵	17 ⁺⁴	14 ⁺³	11 ⁺²	5 ⁺¹
1600	39 ⁺⁷	27 ⁺⁶	25 ⁺⁵	24 ⁺⁴	22 ⁺⁴	20 ⁺⁴	17 ⁺³	11 ⁺²	7 ⁺²	5 ⁺¹

Таблица 1 (продолжение)

E_{γ} (МэВ)	\bar{A}	σ_A/\bar{A}	3	10	20	32	43	55	67	77	87	92	94	94
875	28±8	31±5	36±4	34±4	29±4	22±4	15±3	11±2	9±2	7±1	5±1	4±1	5±1	4±1
1875	3	8	14	23	32	42	52	61	69	76	82	89	10±3	89
2125	33±8	30±7	24±7	24±6	20±6	21±5	19±4	17±4	13±4	12±4	10±3	7±1	10±3	7±1
2375	8	14	22	31	40	58	71	82	91	95	-	-	-	-
2675	54±11	35±9	28±7	16±5	22±4	18±4	13±3	11±3	7±2	3±1	90	-	90	-
2875	2	6	11	25	33	42	51	60	68	80	10±1	95	10±1	95
3125	32±7	31±6	32±6	28±7	26±6	25±5	23±4	21±4	18±4	14±3	10±1	92	10±1	92
3375	2	5	10	24	33	43	52	60	73	83	92	95	6±1	2±1
	37±7	36±7	33±6	26±5	23±4	22±4	19±4	16±4	13±3	10±3	6±1	95	6±1	2±1
	2	9	15	22	40	49	64	76	86	95	-	-	-	-
	28±7	26±7	25±7	24±4	20±4	17±4	13±3	8±2	6±1	3±1	95	-	95	-
	5	14	21	31	45	55	69	79	89	94	95	-	95	-
	39±12	28±8	25±7	22±7	22±7	19±7	15±7	12±6	9±4	6±3	3±1	-	3±1	-
	8	14	20	33	42	50	56	68	78	85	91	95	91	95
	63±12	43±7	37±7	28±6	25±4	23±4	21±4	16±3	13±3	10±2	8±2	3±1	8±2	3±1

Таблица 2

Значения параметров a и b функции (1), аппроксимирующей зависимость относительных флуктуаций σ_A/\bar{A} величины A от \bar{A} для лавин, образованных гамма-квантами с энергией E_{γ} в жидком ксеноне. P - вероятность фитирования по критерию χ^2_n , n - число степеней свободы.

E_{γ} (МэВ)	a	b	n	P (%)
50	1,20±0,01	11,4±5,1	8	78,4
70	1,09±0,01	8,5±2,0	8	99,8
100	1,01±0,01	10,3±1,6	8	73,4
200	1,03±0,01	10,3±1,5	8	31,6
500	1,00±0,01	11,8±3,8	8	98,1
1600	1,00±0,01	15,6±4,0	8	99,2
2125	1,00±0,01	19,3±5,5	8	74,2
2625	0,98±0,01	19,5±10,3	10	~100
2875	0,96±0,01	17,7±6,1	8	99,3
3125	0,99±0,01	19,9±28,2	9	10
3375	0,96±0,01	11,8±3,8	9	99,2

Соотношение /2/ справедливо в области энергии $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ, которая с методической точки зрения представляет наибольший интерес.

Формула /1/ правильно описывает зависимость σ_A/\bar{A} от \bar{A} в интервале $0,1 \leq \bar{A} \leq 0,95$. Следует также отметить, что в интервале $\bar{A} \geq 0,5$, который имеет основное практическое значение, флуктуации доли A ионизационных потерь ливневых электронов симметричны относительно среднего значения \bar{A} , и их можно аппроксимировать нормальным распределением: $A \sim N(\bar{A}; \sigma^2)$.

3. Зависимость \bar{A} от d

Для того чтобы воспользоваться на практике соотношениями /1/ и /2/, необходимо знать зависимость между средним значением доли A ионизационных потерь

ливневых электронов и соответствующей ей длиной d развития электронно-фотонного ливня, образованного гамма-квантом с данной энергией E_γ . Эту зависимость можно, в принципе, получить аналитическим путем, исходя из одномерных каскадных уравнений^{/5/}, а также численным путем, имитируя на ЭВМ методом Монте-Карло электромагнитный каскадный процесс, протекающий в определенном радиаторе /см., например^{/6/}. Автором было получено методом графической линеаризации экспериментальных данных соотношение между суммарным пробегом ливневых электронов и длиной развития ливней, вызванных гамма-квантами в жидком ксеноне^{/7/}. Выраженное через параметры A и d , это соотношение имеет следующий вид:

$$\bar{A} = 1 - \frac{1}{2} (10^{-10} X + 10^{-10} Y), \quad /3/$$

где

$$X = 0,486 [(lg d)^2 + 1,215 lg d - \frac{\lg(1,5 - \sqrt{3,3582 - \lg E_\gamma})}{0,225} - 5,1652],$$

$$Y = 0,486 [(lg d)^2 + 1,215 lg d + \frac{6,215(3,3582 - \lg E_\gamma)}{\lg E_\gamma + 0,9918} - 5,7285].$$

Здесь длина d дана в радиационных единицах среды радиатора, энергия E_γ - в МэВ. Для того чтобы получить значение доли \bar{A} , соответствующей длине развития d ливня, надо подставить в выражение /3/ вместо E_γ зарегистрированное прибором значение энергии $E_\gamma(d)$. При этом получаем значение A_0 в нулевом приближении. Следующее приближение вычисляется при подстановке в /3/ вместо E_γ величины $E'_\gamma = E_\gamma(d) / \bar{A}_0$ и т.д. Итерационный процесс можно прервать по достижении желаемой точности искомой величины \bar{A} , например, тогда, когда выполнено условие $\bar{A}_i - \bar{A}_{i-1} \leq Q$, где Q достаточно положить равным 0,01. Формула /3/ справедлива в интервале значений энергий гамма-квантов $E_\gamma = 20-2000$ МэВ.

4. Выводы

На основании выполненного анализа результатов измерений ионизационных потерь ливневых электронов в электронно-фотонных ливнях, вызванных гамма-квантами с энергией $E_\gamma = 30-3400$ МэВ в жидком ксеноне, можно заключить, что:

1. Флуктуации энерговыделения в продольном развитии лавин описываются при помощи простой формулы /1/ в широком интервале значений энергии E_γ .

2. Безразмерная величина A , определенная как доля ионизационных потерь ливневых электронов на длине d развития ливня, представляет собой также долю светового эффекта, создаваемого каскадным электромагнитным процессом в радиаторе толщиной d . Следовательно, зависимость флуктуаций, выраженных в виде относительной дисперсии σ_A/\bar{A} , от \bar{A} , могут быть использованы при оценке точности определения энергии гамма-квантов высоких энергий, регистрируемых различными методами.

В заключение следует отметить, что для приближенных оценок точность определения энергии гамма-квантов можно выразить непосредственно через параметр $\bar{A}^{1/8}$. Автор благодарен В.Пэрыту за помощь в выполнении на ЭВМ статистической подгонки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Словинский Б., Стругальский З., Яновская Б. ЯФ, 1969, 9, с. 120.
2. Словинский Б., Стругальский З., Хуберт В. ЯФ, 1972, 16, с. 734.
3. Охрименко Л.С. и др. ЯФ, 1975, 22, с. 110.
4. Охрименко Л.С. и др. ОИЯИ, Е1-9210, Дубна, 1975.
5. Беленький С.З., Иваненко И.П. УФН, 1959, 69, с. 591; Рама-Кришман А. Элементарные частицы и космические лучи. "Мир", М., М., 1965; Стругальский З., Яблонский З. ОИЯИ, Р1-8806, Дубна, 1975.

6. Борковский М.Я., Круглов С.П. ЯФ, 1972, 16, вып. 2, с. 349; Препринт ЛИЯФ, - 184, Л., 1975.
7. Словинский Б. ОИЯИ, 1-10932, Дубна, 1977; Ивановская И.А. и др. ПТЭ, 1968, № 2, с. 39.
8. Словинский Б. ОИЯИ, Р10-7681, Дубна, 1974.

*Рукопись поступила в издательский отдел
13 сентября 1978 года.*