

С332.3  
В-825

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



397 / 2 - 77

7/II-74

P1 - 10140

Я.Вротняк, З.Стругальский, З.Яблонский

РАСЧЕТ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО  
И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ  
КАСКАДНЫХ КРИВЫХ И ФЛЮКТУАЦИЙ  
СРЕДНЕГО ЧИСЛА ЧАСТИЦ В ЛИВНЯХ,  
ОБРАЗОВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ  
В ЖИДКОМ КСЕНОНЕ

**1976**

P1 - 10140

Я.Вротняк, З.Стругальский, З.Яблонский

РАСЧЕТ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО  
И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ  
КАСКАДНЫХ КРИВЫХ И ФЛЮКТУАЦИЙ  
СРЕДНЕГО ЧИСЛА ЧАСТИЦ В ЛИВНЯХ,  
ОБРАЗОВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ  
В ЖИДКОМ КСЕНОНЕ

Вротняк Я. и др.

PI - 10140

Расчет по методу Монте-Карло и сравнение с экспериментальными данными каскадных кривых и флуктуаций среднего числа частиц в ливнях, образованных гамма-квантами в жидком ксеноне

Приводятся каскадные кривые и относительные флуктуации среднего числа частиц, рассчитанные по методу Монте-Карло для ливней, создаваемых в жидком ксеноне гамма-квантами с энергиями от 20 до 2000 МэВ. Результаты расчета для электронов сравниваются с соответствующими экспериментальными данными.

Наблюдается хорошее согласие расчетных и опытных результатов, свидетельствующее о правильности применяемых приближений и выбранного метода расчета.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

Wrotniak J. et al.

PI - 10140

Monte-Carlo Calculation of Cascade Curves and Fluctuations of Numbers of Shower Particles Initiated by  $\gamma$ -Quanta in Liquid Xe and their Comparison with Experimental Data

The cascade curves and corresponding fluctuations of the numbers of shower particles are evaluated, using the Monte-Carlo calculation method, for showers initiated by gamma quanta of energies from 20 to 2000 MeV in liquid xenon. Results are compared with the corresponding experimental data.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research  
Dubna 1976

С помощью электронной вычислительной машины ОДРА-1305 проводились расчёты по методу Монте-Карло разных характеристик развития электронно-фотонных ливней, образуемых гамма-квантами разных энергий в жидком ксеноне. В настоящей работе приводятся средние числа  $\langle N \rangle$  электронов, гамма-квантов, а также общего их количества и относительные флуктуации  $\lg \frac{\sigma^2}{\langle N \rangle}$ , где  $\sigma$  - стандартное отклонение числа частиц в зависимости от глубины  $t$  развития ливня, измеряемой в радиационных единицах длины для ливней с энергиями от 20 до 2000 МэВ. Минимальная энергия регистрируемых электронов принята равной 3,5 МэВ.

Программа расчёта разработана в варианте, позволяющем вычислять характеристики развития ливней для любого вещества.

## 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОД РАСЧЁТА

При составлении программы расчёта принимались во внимание следующие физические процессы /1,2/ :

а) рождение электронно-позитронных пар гамма-квантами при разных значениях энергии. Энергии электронов и позитронов в этом процессе разыгрывались из прямоугольного распределения;

б) эффект Комптона, сечение которого определяется по формуле Клейна-Нишины. Для розыгрыша энергии вторичного фотона в этом процессе была применена приближенная зависимость:

$$k = [u + k_{\min}^{2/3} (1-u)]^{3/2}, \quad (1)$$

где  $k = E'_\gamma / E_\gamma$  - отношение энергии вторичного фотона  $E'_\gamma$  к энергии первичного фотона  $E_\gamma$ ,  $k_{\min} = 0,25/E_\gamma$ , и  $u$  - случайное число из интервала  $(0,1)$ ;

в) тормозное излучение электронами вторичных фотонов, свободные пробеги электронов и энергии фотонов вычислялись из теоретических распределений для разных энергий электронов;

г) ионизационные потери электронов в зависимости от энергии.

Не учитывалось многократное кулоновское рассеяние и углы вылета частиц, поэтому выполненные нами расчёты отражают только одномерное развитие ливней.

Было разыграно 400 ливней в диапазоне энергий меньше 200 МэВ и 200 ливней - в диапазоне 200 МэВ, что обеспечивало приемлемый для сравнения с экспериментальными данными разброс результатов расчёта. Расчёты велись через каждые 0,5 радиационной единицы длины в начальной стадии развития ливней и через более широкие интервалы в районе их хвостов.

На печать выводились следующие величины: распределение числа частиц  $N$  с глубиной  $t$ , распределение энергий ливневых частиц с глубиной  $t$ , средние числа частиц  $\langle N \rangle$  с этой же глубиной и их стандартные отклонения.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА И ИХ СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

На рис. 1 - 3 показаны средние числа ливневых частиц на разных глубинах  $t$  развития ливней. На рис. 4 - 6 показан ход относительных флюктуаций  $\lg \frac{\sigma^2}{\langle N \rangle}$  в зависимости от  $t$ . Для получения плавных

зависимостей на рисунках расчётные точки были сглажены кривыми типа полиномов.

В таблице для разных энергий приведено среднее число электронов, полученное на опыте  $\langle N \rangle_{\text{эсп.}}^{/3,4/}$  в зависимости от глубины  $t$  развития ливня, и соответствующие флюктуации  $\lg \frac{\sigma^2}{\langle N \rangle}_{\text{эсп.}}^{/3,4/}$ . Рядом даны соответствующие значения из расчёта:  $\langle N \rangle_{\text{м.к.}}$  и  $\lg \frac{\sigma^2}{\langle N \rangle}_{\text{м.к.}}$ , полученные нами, а также данные Д.Е.Крауфорда и Г.Месселя <sup>/2/</sup>, полученные этим же методом для свинца:  $\langle N \rangle_{\text{Pb}}$  и  $\lg \frac{\sigma^2}{\langle N \rangle}_{\text{Pb}}$ .

С целью сравнения наших результатов с данными работы <sup>/2/</sup>, где порог регистрации принят не таким, как у нас и составлял 10 МэВ, была сделана соответствующая нормировка площадей под кривыми, поэтому энергия первичного фотона для свинца увеличилась.

Из сравнения приведенных в таблице значений следует, что расчёт даёт правильное положение максимумов числа частиц в ливнях и правильные числа частиц на данных глубинах, за исключением ливневых хвостов. Это различие обусловлено кулоновским рассеянием, которое мы не учитывали. Неплохое согласие наблюдается также между расчётными и экспериментальными данными о флюктуациях.

В нашей прежней работе <sup>/5/</sup>, где кривые были рассчитаны методом моментов, было обнаружено большое несогласие расчётных и экспериментальных данных почти для всех глубин. Можно заключить, что метод Монте-Карло более подходит для этого диапазона энергий.

Наши результаты близки также к результатам Д.Е.Крауфорда и Г.Месселя.

Продолжение таблицы

Таблица

$E_0(\text{МэВ}) 40 \pm 6$				50		
$t(t_0)$	$\langle N \rangle_{\text{экс}}$	$\langle N \rangle_{\text{МК}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{экс}}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{МК}}}$	$\langle N \rangle_{\text{РБ}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{РБ}}}$
0.5	$0.6 \pm 0.2$	0.37	0.05	0.05	0.28	0.11
1.0	$0.7 \pm 0.2$	0.40		-0.02	0.36	0.00
1.5	$0.6 \pm 0.2$	0.40		-0.08	0.35	0.00
2.0	$0.4 \pm 0.2$	0.37		-0.08	0.27	0.03
2.5	$0.2 \pm 0.1$	0.26		-0.12	0.22	0.04
3.0	$0.1 \pm 0.1$	0.19		-0.10	0.18	0.05
4.0		0.12		-0.22	0.12	0.10

$E_0(\text{МэВ}) 150 \pm 22$				200		
$t(t_0)$	$\langle N \rangle_{\text{экс}}$	$\langle N \rangle_{\text{МК}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{экс}}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{МК}}}$	$\langle N \rangle_{\text{РБ}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{РБ}}}$
0.5	$0.8 \pm 0.2$	0.50		0.12	0.45	0.18
1.0	$1.5 \pm 0.2$	0.98		0.10	0.86	0.11
1.5	$1.8 \pm 0.2$	1.10		0.05	1.04	0.00
2.0	$1.6 \pm 0.2$	1.12		-0.02	1.12	-0.03
2.5	$1.4 \pm 0.2$	1.10		-0.08	1.04	-0.05
3.0	$1.3 \pm 0.2$	1.00		-0.08	0.93	-0.05
4.0	$0.4 \pm 0.2$	0.80		-0.01	0.67	0.01
5.0	$0.1 \pm 0.1$	0.59		0.02	0.51	0.05
6.0		0.50		0.02	0.39	0.12

Продолжение таблицы

Продолжение таблицы

$E_0(\text{МэВ}) 80 \pm 12$				100		
$t(t_0)$	$\langle N \rangle_{\text{экс}}$	$\langle N \rangle_{\text{МК}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{экс}}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{МК}}}$	$\langle N \rangle_{\text{РБ}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{РБ}}}$
0.5	$0.4 \pm 0.2$	0.50		0.17	0.37	0.16
1.0	$0.7 \pm 0.2$	0.66		0.00	0.58	0.06
1.5	$1.0 \pm 0.2$	0.77		-0.05	0.64	-0.01
2.0	$0.8 \pm 0.2$	0.72		-0.05	0.60	-0.05
2.5	$0.6 \pm 0.2$	0.56		-0.05	0.52	-0.04
3.0	$0.4 \pm 0.1$	0.45		-0.05	0.46	0.02
4.0	$0.4 \pm 0.1$	0.30		-0.08	0.32	0.04
5.0	$0.2 \pm 0.1$	0.20		-0.08	0.25	0.06
6.0	$0.1 \pm 0.1$	0.14		-0.22	0.16	0.08

$E_0(\text{МэВ}) 300 \pm 45$				500		
$t(t_0)$	$\langle N \rangle_{\text{экс}}$	$\langle N \rangle_{\text{МК}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{экс}}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{МК}}}$	$\langle N \rangle_{\text{РБ}}$	$1\sigma \frac{\delta^2}{\langle N \rangle_{\text{РБ}}}$
0.5	$0.8 \pm 0.2$	0.8	0.17	0.17	0.57	0.21
1.0	$1.0 \pm 0.2$	1.3		0.17	1.02	0.18
1.5	$1.8 \pm 0.3$	1.8		0.12	1.42	0.20
2.0	$2.3 \pm 0.3$	2.0		0.10	1.77	0.14
2.5	$2.6 \pm 0.4$	2.0		0.08	2.02	0.07
3.0	$2.0 \pm 0.3$	1.9		0.06	2.09	0.06
4.0	$1.8 \pm 0.3$	1.7		0.01	2.09	0.03
5.0	$0.8 \pm 0.2$	1.3		0.05	1.77	0.05
6.0	$0.4 \pm 0.2$	1.0		0.10	1.36	0.11
7.0	$0.2 \pm 0.1$	0.8		0.08	1.00	0.17
8.0	$0.1 \pm 0.1$	0.6		0.15	0.72	0.14

Продолжение таблицы

$E_0(\text{МэВ}) 500 \pm 60$				
$t(t_0)$	$\langle N \rangle_{\text{экс.}}$	$\langle N \rangle_{\text{МК}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{экс.}}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{МК}}}$
0.5	1.0±0.4	1.0		0.18
1.0	1.0±0.1	1.6		0.26
1.5	1.8±0.2	2.2		0.29
2.0	2.5±0.3	2.6		0.30
2.5	3.0±0.3	2.9		0.26
3.0	2.7±0.2	3.2		0.18
4.0	2.0±0.2	3.0		0.09
5.0	1.5±0.2	2.4		0.10
6.0	1.1±0.1	1.9		0.13
7.0	0.5±0.1	1.5		0.20
8.0	0.0	1.2		0.24

Продолжение таблицы

$E_0(\text{МэВ}) 1000 \pm 150$				
$t(t_0)$	$\langle N \rangle_{\text{экс.}}$	$\langle N \rangle_{\text{МК}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{экс.}}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{МК}}}$
0.5	0.4±0.1	1.1	0.2280.13	0.21
1.0	1.3±0.2	1.9	0.19±0.06	0.30
1.5	2.2±0.3	2.8	0.28±0.03	0.35
2.0	2.7±0.3	4.0	0.16±0.03	0.46
2.5	4.1±0.4	5.0	0.33±0.03	0.41
3.0	4.7±0.5	5.6	0.39±0.03	0.37
4.0	5.6±0.6	5.7	0.22±0.03	0.20
5.0	5.6±0.5	5.3	0.14±0.03	0.15
6.0	5.5±0.5	4.6	0.16±0.03	0.24
7.0	3.8±0.4	3.7	0.33±0.03	0.24
8.0	2.5±0.4	2.9	0.44±0.03	0.25
9.0	1.2±0.3	2.2	0.47±0.10	0.28
10.0	0.2±0.1	1.5	0.28±0.19	0.27

Продолжение таблицы

$E_0(\text{МэВ}) 1600 \pm 240$					2000	
$t(t_0)$	$\langle N \rangle_{\text{экс.}}$	$\langle N \rangle_{\text{МК}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{экс.}}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{МК}}}$	$\langle N \rangle_{\text{РБ}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{РБ}}}$
0.5	1.2±0.4	1.1	0.16±0.11 -0.08	0.21	0.67	0.27
1.0	2.5±0.5	2.2	0.08±0.06 -0.03	0.29	1.42	0.37
1.5	3.5±0.6	3.2	0.22±0.06	0.48	2.45	0.43
2.0	4.3±0.6	4.8	0.16±0.06 -0.03	0.48	3.56	0.45
3.0	5.5±0.5	7.3	0.42±0.06	0.40	5.64	0.42
4.0	6.5±0.5	8.2	0.11±0.03	0.32	6.95	0.30
5.0	6.5±0.4	8.0	0.00±0.03	0.22	7.05	0.24
6.0	5.2±0.4	7.1	0.19±0.03	0.23	6.34	0.19
7.0	4.5±0.5	5.7	0.14±0.03	0.25	5.47	0.20
8.0	3.3±0.5	4.6	0.39±0.06	0.27	4.67	0.26
9.0	2.2±0.5	3.4	0.44±0.11 -0.08	0.30	3.52	0.33
10.0	1.0±0.3	2.5	0.72±0.16 -0.11	0.32	2.58	0.34

Продолжение таблицы

$E_0(\text{МэВ}) 2000 \pm 300$				
$t(t_0)$	$\langle N \rangle_{\text{экс.}}$	$\langle N \rangle_{\text{МК}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{экс.}}}$	$\lg \frac{E^2}{\langle N \rangle_{\text{МК}}}$
0.5	1.4±0.4	1.3	0.17±0.14 -0.08	0.17
1.0	3.0±0.7	2.2	0.39±0.11 -0.06	0.35
1.5	3.8±0.8	3.6	0.39±0.08	0.54
2.0	4.6±0.8	5.5	0.28±0.06	0.62
3.0	7.0±0.9	9.3	0.11±0.06	0.55
4.0	8.9±0.9	11.2	0.06±0.03	0.42
5.0	9.2±0.9	11.0	0.11±0.03	0.22
6.0	8.2±0.9	9.5	0.22±0.03	0.25
7.0	6.7±0.7	8.1	0.03±0.03	0.29
8.0	5.5±0.9	6.5	0.25±0.06 -0.03	0.31
9.0	3.0±0.8	4.9	0.41±0.11	0.33
10.0	2.2±0.8	3.7	0.56±0.17 -0.11	0.40
11.0	1.3±0.5	2.8	0.41±0.17 -0.11	0.47
12.0	0.3±0.2	2.1	0.33±0.44 -0.22	0.41

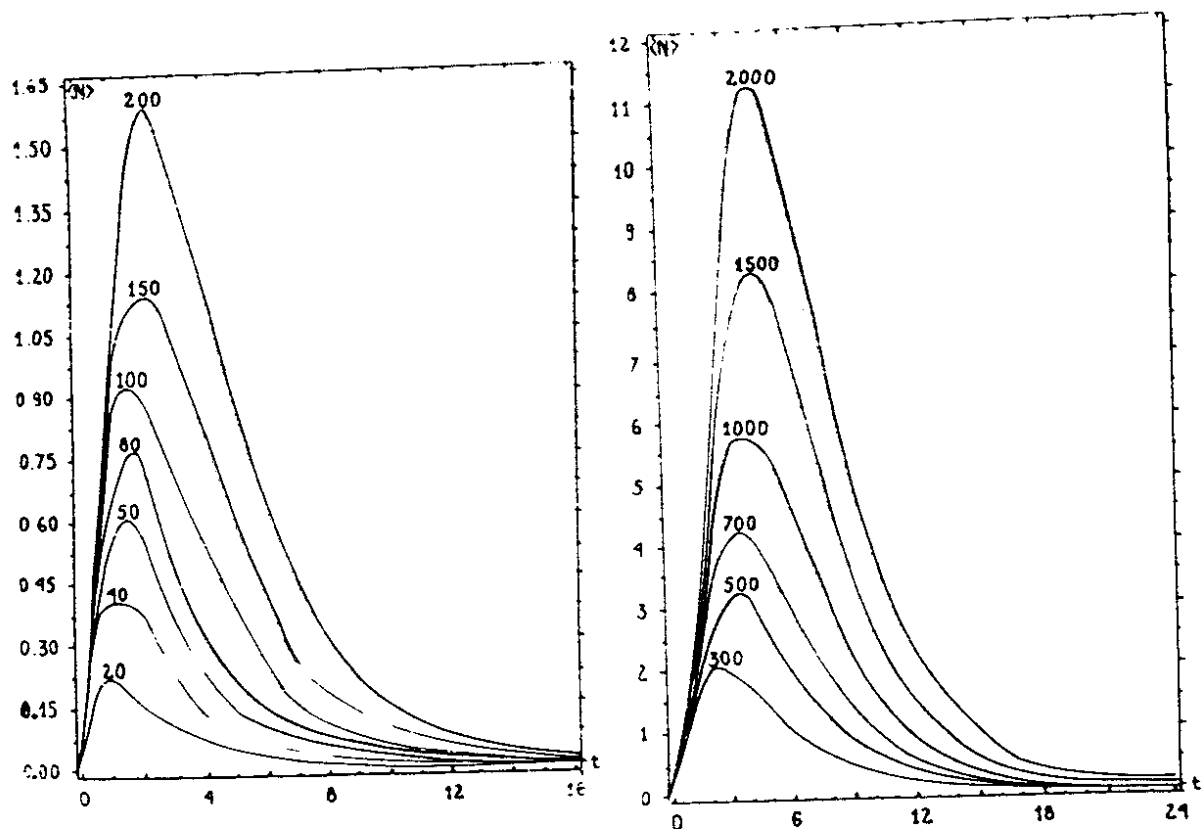


Рис. 1. Среднее число электронов  $\langle N \rangle$  с энергиями больше 3,5 МэВ на данной глубине  $t$  развития ливней, образованных гамма-квантами в жидком ксеноне. Здесь и на других рисунках значения энергий гамма-квантов, образующих ливни, написаны над кривыми.

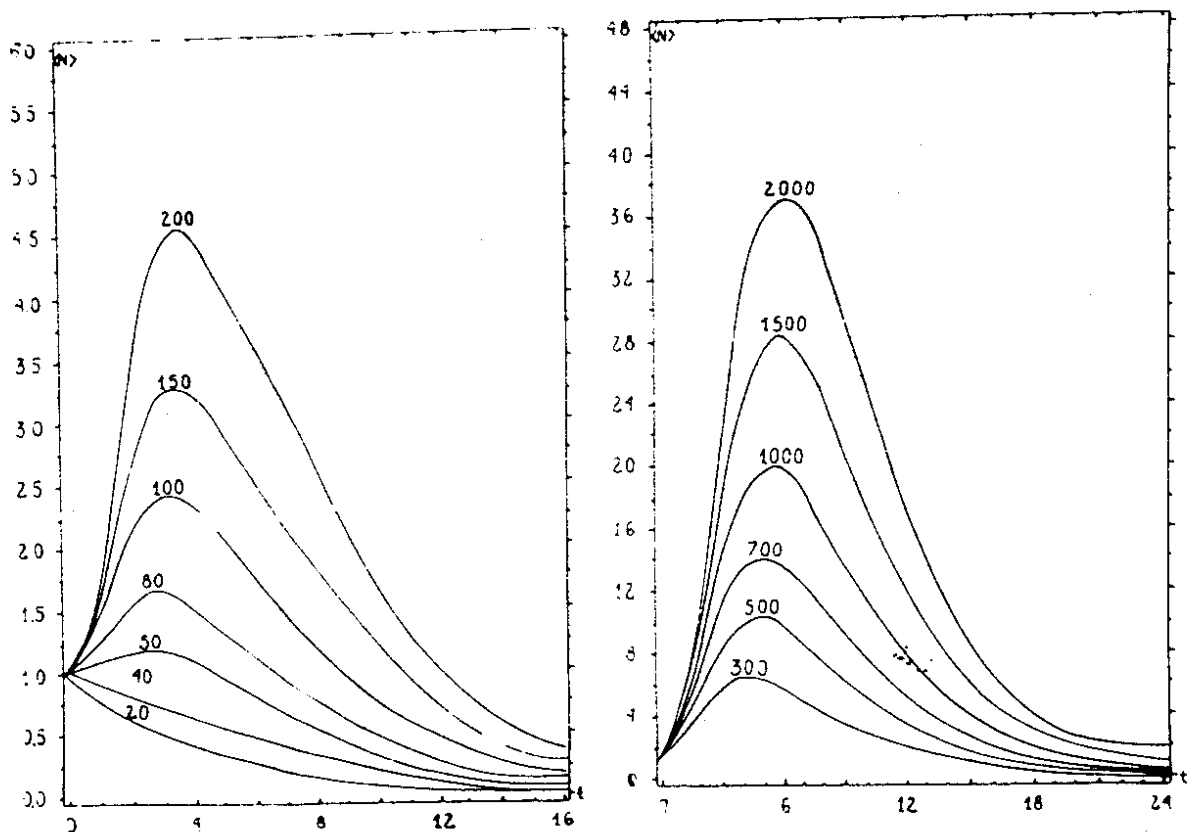


Рис. 2. Среднее число гамма-квантов  $\langle N \rangle$  с энергиями больше 3,5 МэВ на глубине  $t$  развития ливней, образованных гамма-квантами в жидком ксеноне.

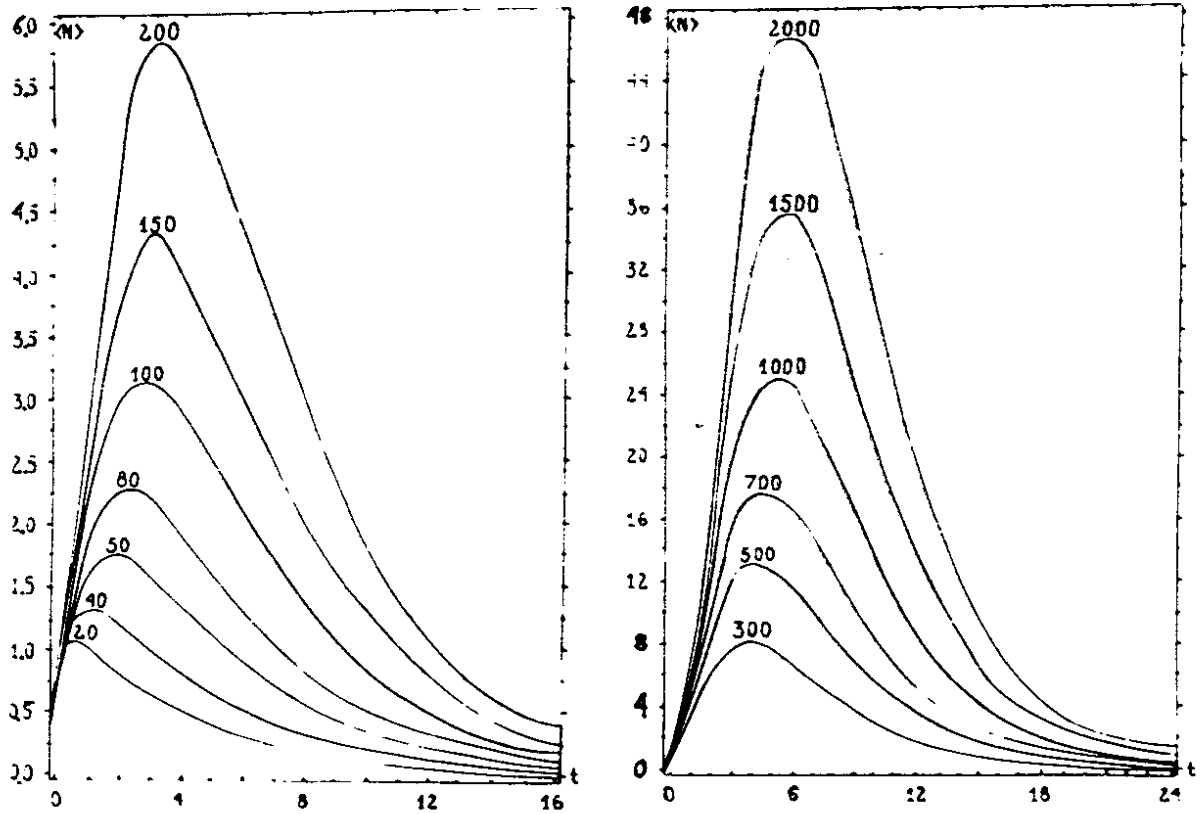


Рис. 3. Среднее число электронов и гамма-квантов  $\langle N \rangle$  с энергиями больше 3,5 МэВ на разных глубинах  $t$  в ливнях, созданных гамма-квантами в жидком ксенона.

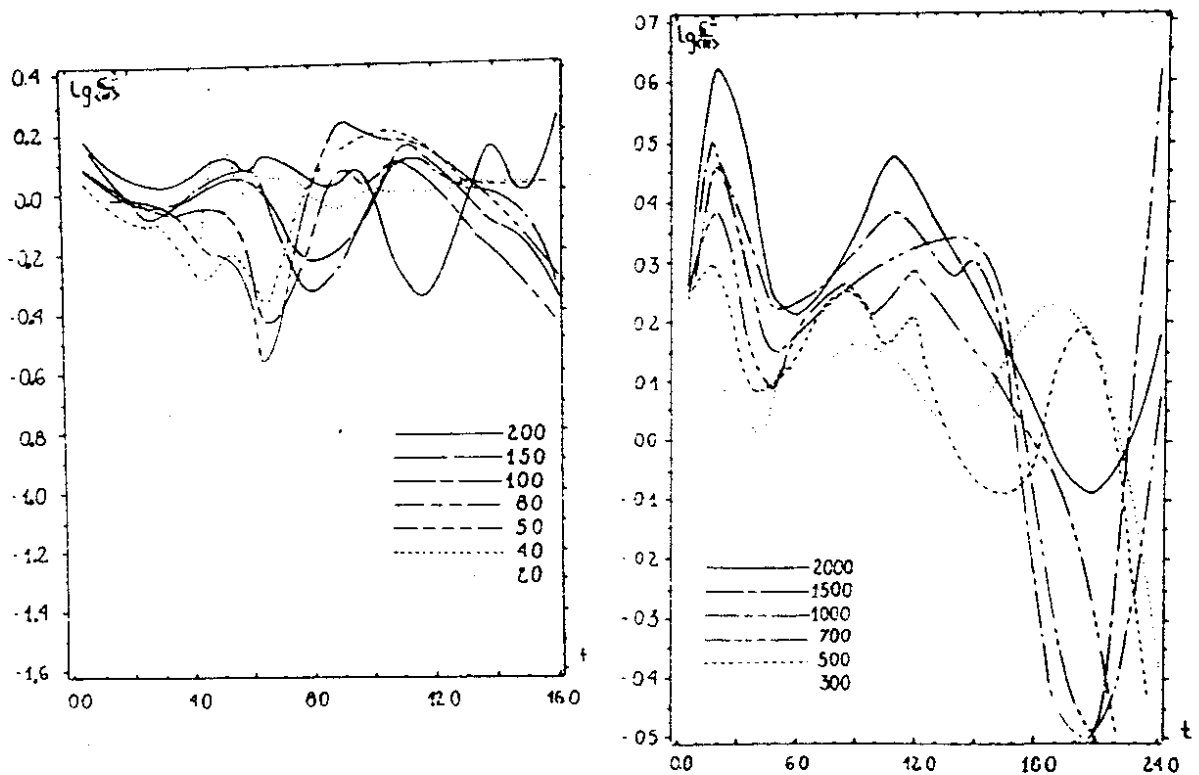


Рис. 4. Относительные флюктуации среднего числа электронов  $\lg \frac{\sigma^2}{\langle N \rangle}$  в зависимости от глубины  $t$  развития ливней, созданных гамма-квантами с энергиями от 20 до 2000 МэВ в жидком ксенона.



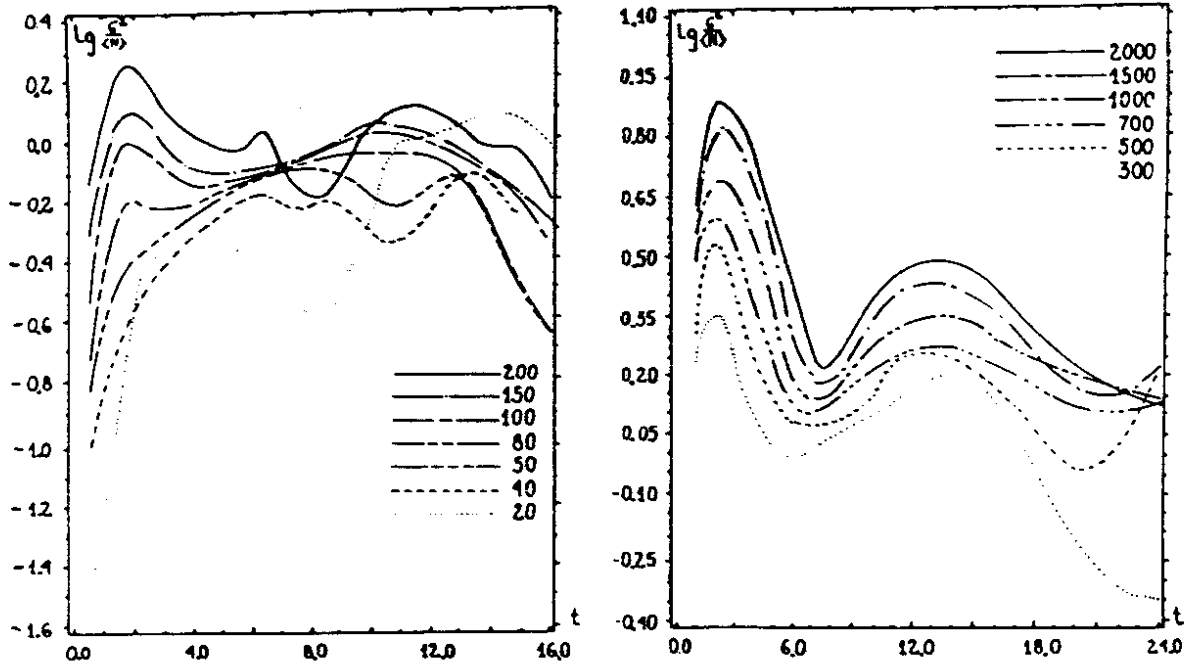


Рис. 5. Относительные флуктуации среднего числа гамма-квантов  $\lg \frac{\sigma^2}{\langle N \rangle}$  в зависимости от глубины  $t$  развития ливней, созданных гамма-квантами с энергиями от 20 до 2000 МэВ в жидком ксеноне.

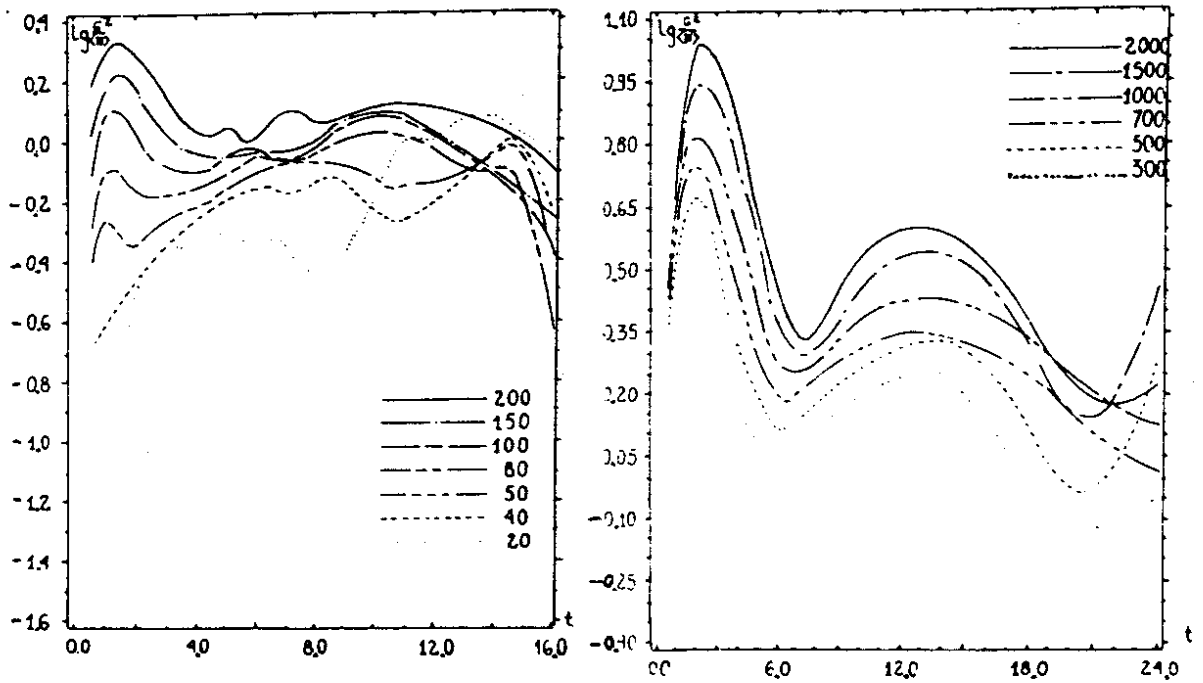


Рис. 6. Относительные флуктуации среднего числа электронов и фотонов  $\lg \frac{\sigma^2}{\langle N \rangle}$  на разных глубинах  $t$  развития ливней, созданных гамма-квантами с энергиями от 20 до 2000 МэВ в жидком ксеноне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.Гейтлер. Квантовая теория излучения. ИЛ, Москва, 1956.
2. D.E.Crawford, H.Messel. Nuclear Phys., 61, 145 (1965).
3. Б.Словинский, З.Стругальский, Б.Яновская. ЯФ, 9, 120 (1969).
4. З.Огржевальский, З.Стругальский. ОИЯИ, P1-4077, Дубна, 1968.
5. З.Стругальский, З.Яблонский. ОИЯИ, P1-8806, Дубна, 1975; ЯФ, 22, 1265 (1975).

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 октября 1976 года.