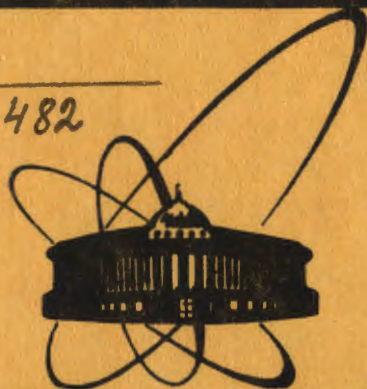


86-811

C-482



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P1-86-811^{e+}

Б.Словинский, Д.Чижевска¹, Г.Енджеец²,
Р.Висьневский³

ФЛУКТУАЦИИ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ
В ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННЫХ ЛИВНЯХ,
ВЫЗВАННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ $E_{\gamma} = 200 \div 3500$ МэВ

¹ Институт ядерных проблем, Варшава

² Институт атомной энергии, Варшава

³ Институт физики Варшавского политехнического
института

1986

1. ВВЕДЕНИЕ

Стохастический характер элементарных процессов, из которых состоит электронно-фотонный ливень /ЭФЛ/, вызванный гамма-квантом /ГК/ достаточно высоких энергий ($E_\gamma \geq 100$ МэВ), приводит к значительным флуктуациям большинства его характеристик: числа частиц и ионизационных потерь в данном элементе объема, угловых характеристик, пространственных размеров и др. Главная причина этих флуктуаций сводится к тому, что высокоэнергетические электроны теряют большую часть своей энергии на излучение небольшого числа ГК с энергиями, сравнимыми с энергиями излучаемой частицы.

При детектировании ГК по создаваемым ими ливням флуктуации характеристик ЭФЛ являются основным источником ошибок в определении энергии ГК. Дело в том, что из-за флуктуаций продольных и поперечных размеров ЭФЛ, а также длины конверсии ГК, образовавшего ливень, в детекторе конечных размеров выделяется лишь часть полной энергии ливня, по которой требуется восстановить энергию первичного ГК. Задача существенно усложняется, когда нет возможности воспользоваться дополнительными сведениями об источнике регистрируемых ГК /как, например, в случае распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ или $\eta \rightarrow 2\gamma$ / или невозможны калибровочные измерения. Дополнительные методические трудности возникают при регистрации двух и более ГК одновременно, когда создаваемые ими ливни частично перекрываются.

В настоящей работе проведено исследование флуктуаций ионизационных потерь ливневых электронов и позитронов /далее: электронов/ в ЭФЛ, созданных ГК с энергией $E_\gamma = 200 \div 3500$ МэВ в жидком ксеноне. Экспериментальный материал был получен на снимках 180 л ксеноновой пузырьковой камеры /далее:КПК/ ИТЭФ /Москва/, облученной π^- -мезонами с импульсом 3,5 ГэВ/с.

Методика КПК дает возможность детально проследить и измерить пробеги ливневых электронов в плоскости снимка. Кроме этого, размеры 180 л КПК ИТЭФ достаточно велики /25,7×11×10 рад.ед.³ /, что позволяет изучать структуру ливней до энергии $E_\gamma \leq 4$ ГэВ ^{1/2}.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

При просмотре снимков 180 л КПК ИТЭФ было отобрано 416 случаев ЭФЛ, вызванных ГК с энергиями E_γ , значения которых указаны в таблице. Критерии просмотра обеспечивали такой выбор ливней, чтобы возможные искажения, обусловленные конечными размерами де-

Таблица

Числа N_γ отобранных случаев ливней и числа N_γ^* тех из них, которые удовлетворяют условию /2/. $t_{\max}^*(E_\gamma)$ — максимальная для данной выборки наблюдаемая длина развития ливня, вызванного гамма-квантом с энергией E_γ

E_γ /МэВ/	210 <u>+20</u>	310 <u>+30</u>	555 <u>+55</u>	1125 <u>+125</u>	2125 <u>+125</u>	3375 <u>+125</u>
N_γ	35	36	97	158	52	38
N_γ^*	33	32	49	75	20	8
$t_{\max}^*(E_\gamma)$ /рад.ед./	12	16	20	20	21	24

тектора, были минимальны. С этой целью для каждого ливня измерялись: 1/ суммарная длина Σr пробегов ливневых электронов в плоскости проекции; 2/ максимальная наблюдаемая на снимке длина /или, что то же самое, глубина/ развития ливня, t_{\max} , отсчитываемая от точки конверсии первичного ГК, вдоль направления его импульса /далее: ось развития ливня — ОР/; 3/ потенциальная длина развития ЭФЛ, L_{pot} , т.е. расстояние от точки конверсии первичного ГК до точки пересечения ОР со стенкой камеры. Энергия E_γ ГК, инициирующего ливень, определялась по формуле

$$E_\gamma = \alpha \cdot \Sigma R, \quad /1/$$

где $\alpha = 0,59 \pm 0,02$ МэВ/мм^{3,4}. Суммарный пробег электронов лавины ΣR пропорционален Σr , причем коэффициент пропорциональности одинаков для всех случаев ЭФЛ, так как, согласно критериям просмотра, ОР лежит в плоскости снимка. Минимальная различаемая на снимке длина следов ливневых электронов заключена в интервале 1÷3 мм, что эквивалентно пороговой энергии их регистрации, равной $E_0 = 0 \div 1,5$ МэВ. Для каждой выборки случаев ЭФЛ, соответствующей данному интервалу значений E_γ , определялась максимальная для этой выборки величина $t_{\max}^*(E_\gamma)$. В дальнейшем анализировались лишь те случаи ЭФЛ, которые удовлетворяют условию:

$$L_{\text{pot}} \geq t_{\max}^*(E_\gamma). \quad /2/$$

Считая первоначальные выборки событий случайными и достаточно репрезентативными, можно утверждать, что на выборках тех случаев ЭФЛ, для которых выполняется соотношение /2/, конечные размеры КПК практически не сказываются. Числа N_γ всех отобранных собы-

тий и числа N_γ^* только тех из них, для которых справедливо условие /2/, приведены в таблице для всех шести рассматриваемых интервалов энергии E_γ . Там же указаны соответствующие значения $t_{\max}^*(E_\gamma)$.

В каждом случае ливня измерялись в плоскости проекции снимка суммарные пробеги ливневых электронов $\Delta \Sigma r(E_\gamma, p, t) / \Delta p \Delta t$, наблюдаемые в клетках раstra с координатами $(t, t + \Delta t)$ вдоль ОР и $(p, p + \Delta p)$ перпендикулярно к ОР. Как было показано ранее /2/, оптимальными с точки зрения размеров и точности определения СП являются значения $\Delta t = 2 \Delta p = 0,6$ рад.ед., при которых средняя относительная ошибка измерения СП составляет ~ 0,20.

Путем моделирования на ЭВМ каскадного электромагнитного процесса, инициированного ГК с энергией $E_\gamma = 200 \div 3500$ МэВ, было установлено, что отношение средней величины ионизационных потерь энергии ливневых электронов $\Delta E(E_\gamma, p, t) / \Delta p \Delta t$, выделяемой внутри параллелепипеда, проекцией которого на плоскость снимка является клетка раstra площадью $\Delta p \Delta t$, к соответствующей ей величине СП есть постоянная величина $\eta_{t,p}$ /с точностью до нескольких процентов/, не зависящая ни от E_γ , ни от координат (t, p) :

$$\frac{\Delta E(E_\gamma, p, t)}{\Delta t \Delta p} / \frac{\Delta \Sigma r(E_\gamma, p, t)}{\Delta t \Delta p} = \eta_{t,p} = \text{const.} \quad /3/$$

Расчеты были выполнены для $\Delta t = 2 \Delta p = 0,6$ рад.ед. Численное значение коэффициента $\eta_{t,p}$ совпадает со значением коэффициента α в /1/, если учесть среднее увеличение следов ливневых электронов в проекции экрана. Вопросы моделирования отношения /3/ описаны в /2/.

3. ФЛУКТУАЦИИ ПРОДОЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЭФЛ

В качестве величины, характеризующей флуктуации продольного развития ЭФЛ, целесообразно взять, как в наших более ранних работах /5/, вариацию $\sigma_A(\bar{t}_A) / A$ доли A ионизационных потерь на глубине \bar{t}_A развития ливня, на которой выделяется в среднем в виде ИП доля A полной энергии лавины. При определении энергии ГК по создаваемым ими ливням именно эта величина играет основную роль /например, /6/ /.

На рис. 1 представлена зависимость вариации $\sigma_A(\bar{t}_A) / A$ от A для шести значений энергии E_γ ГК, инициирующих лавины. Можно заметить, что при достигнутой точности эксперимента функция $\sigma_A(\bar{t}_A) = f(A)$ не проявляет зависимости от энергии ГК, в интервале $E_\gamma = 200 \div 3500$ МэВ. Аналогичный результат был нами по-

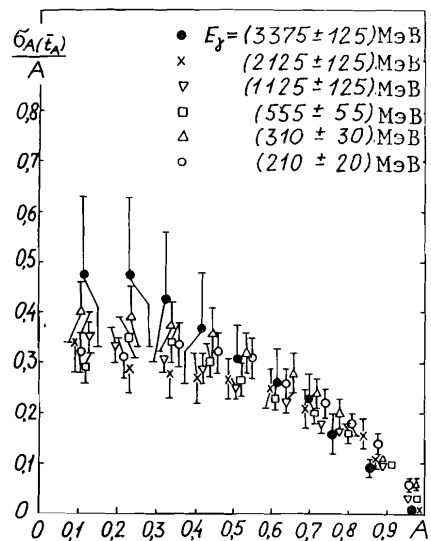


Рис. 1. Вариация $\sigma_{A(\bar{t}_A)} / A$ доли А ионизационных потерь ливневых электронов, соответствующей длине развития ЭФЛ, на которой в среднем выделяется в виде ионизации доля А полной энергии лавины. Ливни вызваны гамма-квантами с энергией E_γ в жидком ксеноне. Длина t развития ЭФЛ измеряется вдоль оси ливня.

лучен ранее /7/ для интервала $E_\gamma = 60 \div 3000$ МэВ. Зависимость $\sigma_{A(\bar{t}_A)} / A$ от А аппроксимировалась в интервале $A \in /0,1; 0,95/$ функцией

$$\sigma_{A(\bar{t}_A)} / A = \left\{ \frac{1}{b} \ln \frac{a}{A(t)} \right\}^{1/2}, \quad /4/$$

где $a = /1,02 \pm 1,3 \cdot 10^{-5} / E_\gamma$, $b = 13,6 \pm 1,3$,

$$\bar{A}(t) = \frac{1}{E_\gamma} \int_0^t f_t(E_\gamma, \tau) d\tau;$$

f_t - распределение СИП вдоль ОР /2/. Было также установлено, что величина энергии $E(t) = A(t) \cdot E_\gamma$, теряемой в виде ионизации ливневыми электронами в толщине t поглотителя, имеет нормальное распределение с параметрами

$$E(t) \sim N(\bar{E}(t); (\sigma_A \bar{E}(t))^2), \quad /5/$$

когда $\bar{A}(t) \geq 0,5$. Здесь $\bar{E}(t) = \bar{A}(t) \cdot E_\gamma$.

На рис. 2 показана зависимость среднеквадратичного разброса σ_t средней длины t развития ливней от энергии E_γ первичного ГК. Вариация этой величины, σ_t / \bar{t} , при разных значениях E_γ приведена на рис. 3. Полученные данные можно описать при помощи простых соотношений:

$$\sigma_t = a_t + b_t \cdot \ln E_\gamma, \quad /6/$$

$$a_t = /-6,2 \pm 1,6/ \text{ рад.ед.}, \quad b_t = 1,65 \pm 0,26, \quad \chi^2/4 = 1,5/4, \text{ и}$$

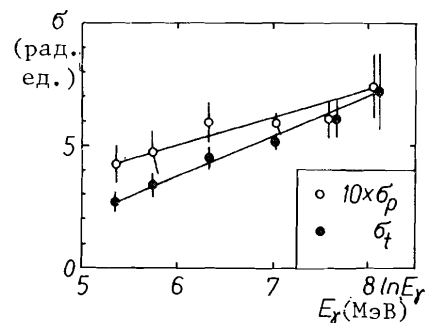


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного разброса средней длины t , σ_t и ширины p, σ_p развития ливней от энергии E_γ создающих их гамма-квантов. Прямые линии изображены соответствующие аппроксимирующие функции /6/ и /8/.

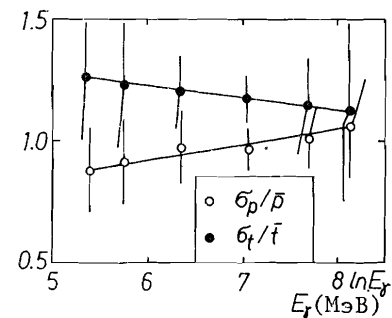


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для вариаций σ_t / \bar{t} и σ_p / \bar{p} . Аппроксимирующие функции определены формулами /7/ и /9/.

$$\sigma_t / \bar{t} = a_t + \beta_t \cdot \ln E_\gamma, \quad /7/$$

$a_t = 1,53 \pm 0,73$, $\beta_t = -0,05 \pm 0,11$, $\chi^2/4 = 0,02/4$, E_γ выражено в МэВ.

4. ФЛУКТУАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО РАЗВИТИЯ

Аналогично, как в случае продольного развития ливней, флуктуации поперечного распределения ионизационных потерь электронов лавины описываются нами посредством зависимости от А вариации $\sigma_{A(\bar{p}_A)} / A$ доли А ИП в слое поглотителя толщиной $2p$, в котором в среднем выделяется доля А суммарных ИП лавины. Стенки этого слоя параллельны ОР и расположены по разные стороны от нее на расстоянии p . Зависимость $\sigma_{A(\bar{p}_A)} / A$ от А приведена на рис. 4.

Можно заметить, что вариация $\sigma_{A(\bar{p}_A)} / A$ постоянна при данной энергии E_γ в интервале значений $0,1 \leq A \leq 0,65$ и при увеличении до А быстро убывает. Но в отличие от $\sigma_{A(\bar{t}_A)} / A$ вариация поперечного развития ливней сильно зависит от энергии E_γ вызывающих их ГК: с ростом E_γ лавины становятся относительно все более компактными по своим поперечным размерам.

На рис. 2 и 3 изображена зависимость от энергии E_γ среднеквадратичного разброса σ_p и вариации σ_p / \bar{p} ширины слоя поглотителя

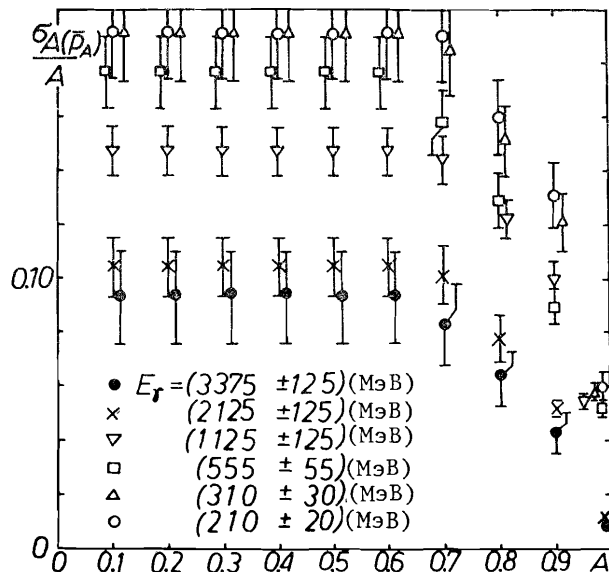


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но для поперечного развития ЭФЛ.

теля, внутри которого выделяется в среднем доля A суммарных ИП лавин соответственно. Аппроксимирующие эти данные функции таковы:

$$\sigma_p = a_p + b_p \cdot \ln E_\gamma, \quad /8/$$

$$a_p = -0,17 \pm 0,24 / \text{рад.ед.}, \quad b_p = 0,112 \pm 0,036, \quad \chi^2/4 = 2,3/4, \quad \text{и}$$

$$\sigma_p / \bar{p} = a_p + \beta_p \cdot \ln E_\gamma, \quad /9/$$

$$a_p = 0,53 \pm 0,48, \quad \beta_p = 0,065 \pm 0,070, \quad \chi^2/4 = 0,1/4, \quad E_\gamma \text{ выражено в МэВ.}$$

5. ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования ионизационных потерь энергии в электронно-фотонных ливнях, вызванных гамма-квантами с энергией $E_\gamma = 200 \div 3500$ МэВ в жидком ксеноне, можно сделать следующие выводы:

1. Вариация $\sigma_A(\bar{p}_A)/A$ доли A ионизационных потерь энергии ливневых электронов, измеряемой вдоль оси ливня, не зависит от E_γ и монотонно убывает с ростом A от $\sim 0,4$ при $A=0,1$ до 0 при $A=1$ /рис. 1/.

2. Вариация $\sigma_A(\bar{p}_A)/A$ доли A ионизационных потерь энергии ливневых электронов, измеряемой в направлении, перпендикулярном к оси ливня, существенно зависит от энергии E_γ , но при каждом значении E_γ она сохраняет постоянное значение в интервале $E_\gamma = 0,1 \div 0,65$ /рис. 4/. Качественно это означает, что с ростом энергии E_γ поперечные размеры слоя поглотителя, внутри которого выделяется в виде ионизационных потерь определенная доля A энергии ливня, становятся все более четкими при всех значениях A .

3. Среднеквадратичный разброс σ_t средней длины развития ливня растет с E_γ как $\ln E_\gamma$ /формула /6/, рис. 2/. Аналогичный рост с E_γ наблюдается также в случае среднеквадратичного разброса σ_p средней ширины ливня, однако отношение σ_p/σ_t по порядку величины равно $\sim 0,1$ и убывает с увеличением E_γ /рис. 5/.

4. Вариация σ_t/\bar{t} средних продольных размеров ливней убывает с E_γ /рис. 3/, формула /7//, в то время как аналогичная величина, σ_p/\bar{p} , характеризующая статистическую изменчивость средних поперечных размеров ливней, увеличивается с возрастанием E_γ /рис. 3 формула /9//.

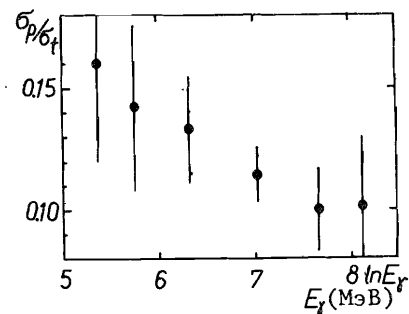


Рис. 5. Отношение среднеквадратичного рассеяния поперечных σ_p и продольных σ_t размеров ливней, вызванных гамма-квантами с энергией $E_\gamma = 200 \div 3500$ МэВ.

В заключение авторы выражают свою признательность директору ЛВТА профессору М.Г.Мещерякову за интерес к работе и поддержку, а также Л.Н.Голубевой и З.Лонцкой за помощь при измерениях и кодировании экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Е.В. и др. - ПТЭ, 1970, 2, с.56.
2. Словинский Б. и др. - ОИЯИ, Р1-86-809, Дубна, 1986.
3. Коновалова Л.П. и др. - ОИЯИ, Р-700, Дубна, 1961; ПТЭ, 1961, 6, с.261.
4. Борковский М.Я., Круглов С.П. - Препринт ЛИЯФ АН СССР, №184, Л., 1975.
5. Słowiński B. et al. - JINR, E1-84-418, Dubna, 1984.
6. Czyżewski O. et al. - Acta Phys.Polon., 1963, Vol.24, p.509.
7. Словинский Б. ОИЯИ, Р1-11890, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 декабря 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

- | | | |
|---------------|---|-------------|
| D2-82-568 | Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982. | 1 р. 75 к. |
| D9-82-664 | Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982. | 3 р. 30 к. |
| D3,4-82-704 | Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982. | 5 р. 00 к. |
| D11-83-511 | Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982. | 2 р. 50 к. |
| D7-83-644 | Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983. | 6 р. 55 к. |
| D2,13-83-689 | Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983. | 2 р. 00 к. |
| D13-84-63 | Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983. | 4 р. 50 к. |
| D2-84-366 | Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984. | 4 р. 30 к. |
| D1,2-84-599 | Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984. | 5 р. 50 к. |
| D17-84-850 | Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/ | 7 р. 75 к. |
| D10,11-84-818 | Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983. | 3 р. 50 к. |
| | Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/ | 13 р. 50 к. |
| D4-85-851 | Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985. | 3 р. 75 к. |
| D11-85-791 | Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985. | 4 р. |
| D13-85-793 | Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985. | 4 р. 80 к. |

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Словинский Б. и др.

P1-86-811

Флуктуации ионизационных потерь в электронно-фотонных ливнях, вызванных гамма-квантами с энергией $E_\gamma = 200 \div 3500$ МэВ

На снимках 180 л ксеноновой пузырьковой камеры ИТЭФ/Москва/, облученной π^- -мезонами с импульсом 3,5 ГэВ/с, измерены ионизационные потери энергии электронов и позитронов /ИП/ в электронно-фотонных лавинах /ЭФЛ/, вызванных гамма-квантами с энергией $E_\gamma = 200 \div 3500$ МэВ. Получены оценки величин, характеризующих флуктуации размеров ЭФЛ: вариация доли ИП вдоль и перпендикулярно оси ливня, среднеквадратичный разброс и вариации средней длины и ширины развития ливня.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ и в Институте физики Варшавского политехнического института.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Słowiński B. et al.

P1-86-811

Fluctuations of Ionization Losses in Electromagnetic Showers Created by Gamma-Quanta with the $E_\gamma = 200 \div 3500$ MeV Energy

Using pictures of the 180 liter xenon bubble chamber (ITEP, Moscow) irradiated by the mesons at 3.5 GeV/c ionization energy losses (IL) of electrons and positrons in electromagnetic showers produced by gamma-quanta with the $E_\gamma = 200 \div 3500$ MeV energy has been measured. Estimations of quantities describing fluctuations of shower dimensions such as variation coefficient of a part of IL along and perpendicular to the shower axis, root mean square, and variation of average longitudinal and transversal shower dimensions are obtained.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR and at the Institute of Physics of the Warsaw Technical University.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986