

МНОГОРЯДНЫЙ ДЕТЕКТОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАСКАДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ МЮОНОВ (РАСЧЕТ РАЗВИТИЯ КАСКАДОВ)

В. А. АСТАФЬЕВ, А. Н. ГРУШИНСКИЙ, Ю. Г. ЛЮТОВ,
Б. А. ХРЕНОВ, Я. ОЛЕЙНИЧАК

В работе рассмотрена возможность измерения энергии мюона в области $E_\mu \geq 10^{12}$ эВ с помощью многорядных детекторов, использующих эффект прямого образования e^+e^- -пар мюонами. Рассчитаны электронно-фотонные каскады, образованные мюонами различных энергий в детекторе, состоящем из многих рядов искровых камер, переслоенных свинцом. Показано, что измерение энергии мюона можно производить простым путем счета числа рядов искровых камер, в которых регистрируется число вторичных электронов выше некоторого порога. Приведены ожидаемые точности измерения энергии мюона для разного числа рядов и различной толщины свинца между искровыми камерами.

В последние годы для изучения мюонов высокой энергии ($E_\mu > 10^{12}$ эВ) в космических лучах делаются попытки использовать многорядные детекторы, регистрирующие небольшие электромагнитные ливни, создаваемые мюоном за счет прямого образования e^+e^- -пар. Идея измерения энергии мюона с помощью эффекта прямого образования пар была высказана в 1959 году Алексеевым и Зацепиным [1]. Дифференциальное сечение образования e^+e^- -пар в области передач энергии $\varepsilon/E_\mu \sim 10^{-3}$ почти на два порядка больше, чем дифференциальное сечение тормозного излучения. Порог регистрации детекторами вторичных ливней составляет величину порядка 10^8 эВ. Мюон с энергией $E_\mu \geq 10^8 \times E_{\mu/\varepsilon} \approx 10^{11}$ эВ создает в веществе ряд последовательных ливней, которые можно регистрировать с помощью чувствительных детекторов.

С ростом энергии мюона растет как сечение образования пар (примерно как $\ln^2 E_\mu$), так и средняя мощность вторичных ливней. Поэтому возникает возможность с помощью установки, способной регистрировать ливни (их число и мощность) в большом количестве вещества, измерять энергию мюона. Применение этого метода особенно интересно в области сверхвысоких энергий мюонов, где ограничены возможности метода магнитного спектрометра (в частности, из-за большой вероятности образования вторичных ливней, маскирующих трек мюона). Однако первые расчеты точности измерения энергии подобным методом «парного» спектрометра, проведенные Веденевым, Дмитриевым и Христиансенем [2], показали, что для получения точности порядка 10—20% в измерении энергии индивидуального мюона с энергией 10^{13} — 10^{14} эВ требуются установки с большим числом рядов ($\sim 10^3$).

Первые экспериментальные попытки использовать эффекты образования e^+e^- -пар для измерения энергии мюона были сделаны с помощью

детекторов из малого числа рядов (4—8) [3—5]. В работах [3, 4] экспериментально было показано, что эффект прямого образования пар позволяет оценить среднюю энергию мюона в спектре по вероятности образования малых ливней с заданным порогом даже в одном ряду детектора, если энергетический спектр мюонов жесткий, каким он является, например, в центральной области ШАЛ. В работе [5] было показано, что для оценки энергии мюона с помощью 8-рядного детектора важно фиксировать не только присутствие ливня определенной величины в ряду, но и отсутствие ливня в других рядах. Оказалось также, что с помощью искровых камер в свинцовом детекторе оценка энергии мюонов возможна, начиная с энергии 10^{11} эВ.

Для развития метода «парного» спектрометра важно найти оптимальный вариант анализа информации, которую несет многорядный детектор. В реальных детекторах возникают также следующие особенности, которые необходимо учесть.

1. Слои вещества между чувствительными рядами оказываются достаточно тонкими и не исключают проникновения каскада из ряда в ряд.

2. Число электронов в каскаде, регистрируемое детекторами, должно быть поправлено на переходный эффект и неэффективность детектора.

3. В наблюдаемые каскады могут вносить вклад «ядерные» ливни, возникающие при неупругом взаимодействии мюонов (см. [6]).

Целью настоящей работы является проведение расчета прохождения мюонов (с образованием вторичных ливней) через реальный многорядный детектор и анализ возможностей детектора для измерения энергии мюонов. Для анализа выбран детектор НИИЯФ МГУ [7], состоящий из широкоазорных искровых камер, прослоенных свинцом.

1. Многорядный детектор и метод расчета прохождения мюона через детектор

Детектор НИИЯФ МГУ состоит из 8 рядов искровых камер и 3 рядов сцинтилляционных счетчиков. Все ряды детекторов прослоены свинцом с толщиной 4 см. В настоящей работе мы принимаем, что все чувствительные ряды одинаковы (искровые камеры). Таким образом, установка представляет собой 11-рядный детектор с общим количеством свинца 44 см. Для выяснения принципиальных возможностей метода «парного» спектрометра были рассмотрены также установки из большего числа рядов искровых камер с различными толщинами свинца между рядами.

Расчет проводился методом Монте-Карло. В расчете учитывались процессы ионизации, тормозного излучения и образования пар мюоном. Для ионизации использовалось сечение, полученное Баба [8], для тормозного излучения — формула, полученная в работе Петрухина и Шестакова [9] и для процесса образования пар — выражение Петрухина и Кокоулина [10], основанное на расчетах Кельнера и Котова [11]. Последнее, наиболее полное рассмотрение процесса образования пар Никишовым [12] подтверждает расчеты [11].

В соответствии с сечениями [8—10] разыгрывались точки взаимодействия мюона в установке, тип взаимодействия и энергия, переданная электронам или γ -кванту в акте взаимодействия. Следующим шагом расчета является определение числа электронов, детектируемых искровыми камерами в рядах установки. Искровые камеры регистрируют электроны, прошедшие через стенку камеры (ионизационные потери в стенке камеры составляют $\Delta E = 1$ МэВ) и оказавшиеся в некотором эффективном конусе углов относительно электрического поля в камере. В случае первичного мюона, проходящего по направлению электрического поля в камере, эффективно регистрируются вторичные электроны, обладающие в свинце энергией $E \geq 1$ МэВ, под углами $\theta \leq 30-45^\circ$.

Для расчета каскадных кривых с учетом перехода из свинца в искровую камеру были использованы аналитическое решение угловой задачи [13] и наиболее точные расчеты полного числа частиц в каскаде [14]. Каскадные кривые [14] дают число электронов с порогом $E = 1$ МэВ на заданной глубине t развития ливня (или для заданного возраста s ливня). Для вычисления доли электронов, идущих вперед в конусе углов $\theta < \theta_{\text{пред.}}$, использовалось решение угловой задачи в приближении Ландау с учетом больших углов в виде

$$N(E_0, E, s, \theta) = c(E_0, E, s) P_{-\frac{1}{2} + i \frac{2E}{E_k} \sqrt{\frac{q}{\alpha}}}^{2-s} (\cos(\pi - \theta)), \quad (1)$$

где $q(E, s)$ и $\alpha(s)$ определены в [13], а $P_\nu^\mu(x)$ — модифицированная функция Лежандра.

В конусе углов $\theta_{\text{пред.}} = \pi/6$ (соответствующем конусу эффективной регистрации частиц в искровой камере) доля электронов есть

$$K(s) = \frac{\int_0^{\pi/6} P_{-\frac{1}{2} + i \frac{2E}{E_k} \sqrt{\frac{q}{\alpha}}}^{2-s} (\cos(\pi - \theta)) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi} P_{-\frac{1}{2} + i \frac{2E}{E_k} \sqrt{\frac{q}{\alpha}}}^{2-s} (\cos(\pi - \theta)) \sin \theta d\theta}. \quad (2)$$

Ниже в таблице представлены вычисленные доли $K(s)$. Переход от s к t производился методом перевала.

s	0,4	0,6	1,0	1,2
$K(s)$	0,69	0,57	0,37	0,28

На рис. 1 представлен результат расчета каскадных кривых — число электронов, регистрируемых в искровых камерах на различных глубинах свинца. Цифры у кривых указывают первичную энергию электрона (позитрона), генерированного во взаимодействии мюоном.

На основе кривых рис. 1 были вычислены значения чисел электронов n_e , зарегистрированных в заданном ряду детектора от отдельных взаимодействий мюона, и затем вычислено суммарное по всем имевшим место взаимодействиям значение n_e в этом ряду. В результате для каждого мюона с заданной энергией E_μ вычислялся набор значений n_e в рядах спектрометра. Разыгрывалось по 10^4 прохождений мюона с энергиями $E_\mu = 5, 10, 20, 50, 100$ и т. д. до $2 \cdot 10^4$ ГэВ.

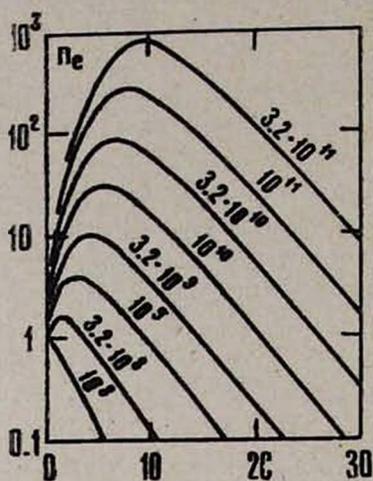


Рис. 1.

Рис. 1. Число электронов с энергией $E \geq 1$ МэВ в конусе углов $\theta \leq \pi/6$ на различных глубинах в свинце (цифры у кривых указывают энергию первичного электрона в единицах эВ).

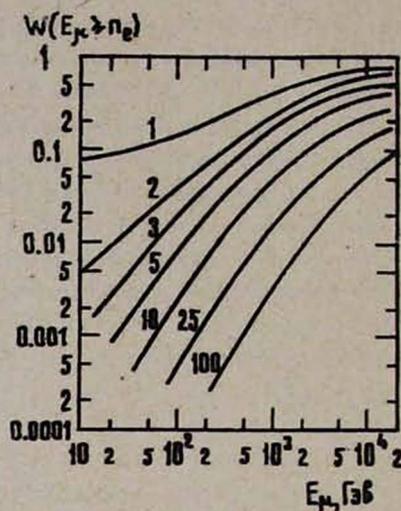


Рис. 2.

Рис. 2. Вероятность появления вторичного ливня в одном ряду детектора с порогом n_e по числу частиц (цифры у кривых — пороговые значения n_e).

Особенностью расчета, проведенного в настоящей работе, является определение числа электронов в искровой камере, начиная с одного электрона (в предыдущих расчетах [2] число электронов вычислялось лишь для ливней с $n_e > 10$ частиц, генерированных только в процессах тормозного излучения и образования пар). В случае, когда среднее число частиц по каскадной кривой оказывалось менее 1, разыгрывался факт появления одного электрона в соответствии с вероятностью, даваемой каскадной кривой.

2. Результаты расчета

На рис. 2 приведены вероятности $W_1(E_\mu, \geq n_e)$ образования ливней с заданным порогом по числу электронов для одного ряда детектора, находящегося на глубине 16 см свинца. При фиксированном значении порога n_e вероятность образования ливня достаточно быстро растет с энергией мюона, что и является основой метода «парного» спектрометра. Оценка средней энергии мюона может быть проведена на основе измерения ве-

роятности $W_1 (\geq n_e)$ в одном ряду детектора, если имеется возможность абсолютной калибровки зависимости $W_1 (E_\mu, \geq n_e)$ при каком-либо значении энергии мюона. Установка НИИЯФ МГУ благодаря применению в составе установки магнитного спектрометра позволит калибровать кривые $W_1 (E_\mu, \geq n_e)$ при энергиях $E_\mu = 10-500$ ГэВ.

Использование многорядного детектора позволяет переходить от оценки средней энергии мюонов к измерениям энергии индивидуальных частиц. Возможны различные варианты использования информации, поступающей от многорядного детектора. Рассмотрим вариант, принятый в эксперименте с искровыми камерами [3]. В эксперименте наблюдается возникновение комбинаций срабатывания k рядов из общего числа m рядов при заданном пороге по числу регистрируемых электронов n_e в ряду. Пусть порог по n_e для искровых камер изменяется от 1 до 25 частиц. В расчетах получаем вероятности появления ливней с порогом $n_e = 1, 2, 3, 5, 10$ и 25 в k рядах из $m=11$ для различных энергий мюона. На рис. 3а представлен результат расчета для порога $n_e = 1$. Видно, что при фиксированном значении k существует значение E_μ , при котором вероятность «срабатывания» рядов достигает максимума. В то же время видно, что дисперсия значений E_μ для заданного числа «сработавших» рядов велика (например, для $k = 5 \sqrt{D(E_\mu)}/E_\mu = 0,55$).

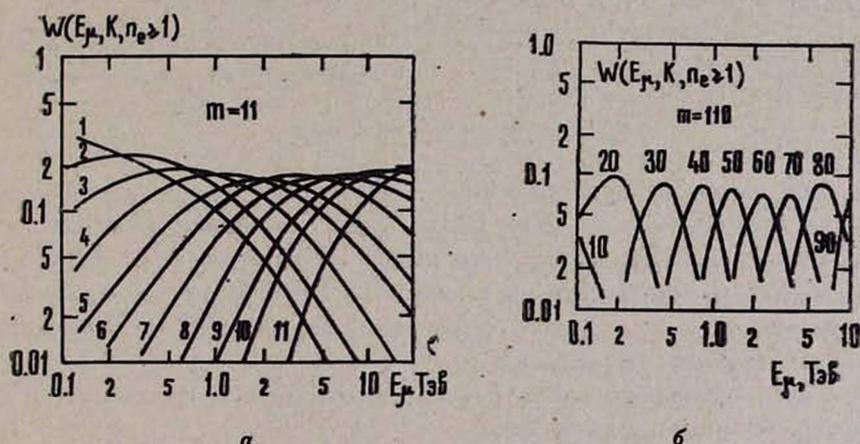


Рис. 3. Распределение по энергии мюонов для событий со «срабатыванием» k рядов в детекторе из m рядов, прослоенных свинцом с толщиной l (цифры у кривых — число сработавших рядов k): а) $m = 11, l = 4$ см; б) $m = 110, l = 4$ см.

Увеличение порога по n_e сдвигает вероятности срабатывания k рядов вверх по энергии мюона. На рис. 4 представлено соответствие между средним числом сработавших рядов k и наиболее вероятной энергией мюона для различных порогов по n_e .

В связи с тем, что дисперсия в определении энергии мюона 11-рядным детектором велика, были проанализированы возможности улучшения точности спектрометра. Были посчитаны вероятности срабатывания k ря-

дов для различных значений числа рядов m и различной толщины слоя свинца l между рядами. Для выяснения роли флуктуаций в числе каскадных электронов на один ряд были найдены те же вероятности в предположении, что число электронов в ряду флуктуирует. Значения дисперсии для числа электронов, флуктуирующих на данной глубине каскада, были взяты согласно работе [15].

На рис. 5 представлены относительные дисперсии в определении среднего числа срабатывающих рядов k для установки из m рядов с тол-

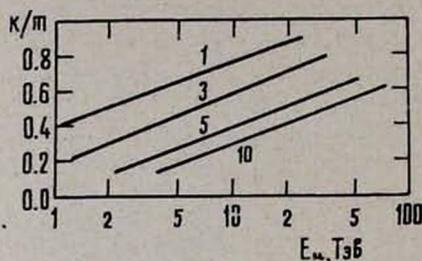


Рис. 4.

Рис. 4. Зависимость среднего числа сработавших рядов от энергии мюона (цифры указывают пороговые значения числа частиц n_e в сработавшем ряду).

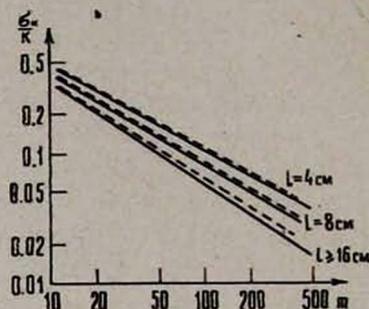


Рис. 5.

Рис. 5. Относительная ошибка в определении числа сработавших рядов для детектора из m рядов с различной толщиной свинца l ; энергия мюона — 10^3 ГэВ, порог $n_e = 1$. Пунктирные кривые изображают то же с учетом флуктуаций в числе частиц n_e .

щиной слоя l свинца между рядами и для энергии мюона $E_\mu = 10^3$ ГэВ (порог по числу частиц $n_e = 1$). Видно, что дисперсия в определении среднего числа срабатывающих рядов падает с ростом числа рядов. С увеличением слоя свинца дисперсия также падает и стремится к предельному значению для «идеального» спектрометра со слоями, исключаяющими проникновение каскада из ряда в ряд.

В случае «идеального» спектрометра вероятность срабатывания k рядов из общего числа m рядов равна

$$W(k, m) = c_m^k W_1^k (1 - W_1)^{m-k}, \quad (3)$$

где $W_1(E_\mu, \geq n_e)$ — вероятность появления ливня с порогом n_e в одном ряду для энергии мюона E_μ , представленная на рис. 2. Для $l = 16$ см значения дисперсии $\sqrt{D(k)}/k$ уже совпадают с ожидаемыми значениями для «идеального» спектрометра.

Применение сравнительно тонких слоев свинца при заданном числе рядов детектора значительно облегчает конструкцию детектора. Как видно из рис. 5, переход от толстых слоев «идеального» спектрометра к слоям с толщиной до 4 см свинца не снимает возможности использования детектора для измерения энергии. Возможен выбор компромиссного значения толщины слоя в соответствии с условиями эксперимента.

Учет флуктуаций в числе каскадных частиц не сильно изменяет значений дисперсии $\sqrt{D(k)}/k$ (рис. 5). Это показывает, что бо́льший вклад в погрешность измерений k и соответственно энергии мюона вносят флуктуации в точках взаимодействия мюона и в передаче энергии электронам и γ -квантам.

Расчеты показывают, что детектор из искровых камер с числом рядов $m \approx 100$ ($l = 4$ см, $n_e = 1$) может обеспечить приемлемую для эксперимента ошибку в измерении энергии мюона. Так, для детектора из $m = 110$ рядов ($l = 4$ см, $n_e = 1$) распределение по энергии мюонов для событий с заданным числом сработавших рядов k становится узким: $\sqrt{D(E_\mu)}/E_\mu = 0,2$. На рис. 3б представлены результаты расчета этих распределений.

Другой подход к анализу данных многорядного детектора был применен в работе [2]: там подсчитывалось суммарное число частиц во всех рядах детектора как функция энергии мюона. Сравним ошибку в определении энергии мюона по методу счета суммарного числа частиц в рядах детектора с ошибкой по методу счета «сработавших» рядов. Для детектора из 110 рядов при $l = 4$ см, $n_e = 2$ настоящий расчет дает по методу счета сработавших рядов ошибку $\sqrt{D(E_\mu)}/E_\mu = 0,1$ при энергии мюона $E_\mu = 10^4$ Гэв, а по методу счета суммарного числа частиц — значение $\sqrt{D(E_\mu)}/E_\mu = 0,5$ при той же энергии мюона. Как видим, метод счета сработавших рядов дает значительно лучшую точность.

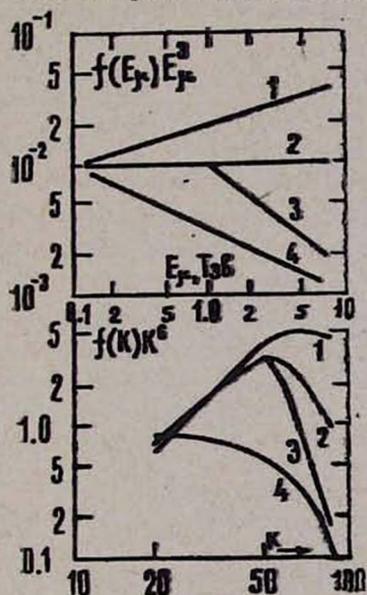


Рис. 6. Переход от энергетических спектров мюонов (а) к распределению по числу сработавших рядов (б): 1—3 — спектры «одиночных» мюонов, обсуждаемые в литературе; 4 — спектр мюонов в составе ШАА.

Наиболее последовательный подход [2] к измерению энергии мюона методом «парного» спектрометра — вычисление вероятности появления заданной комбинации ливней в многорядном детекторе (как по числу рядов, так и по числу частиц в каждом ряду) как функции энергии мюона — является весьма трудоемким как с точки зрения вычислений, так и с точки зрения съема информации с многорядного детектора (в каждом ряду необходимо определить точное число частиц). Нам представляется, что метод счета сработавших рядов при заданном пороге по числу частиц в ряду является простым и достаточно точным способом использования информации многорядного детектора.

В качестве иллюстрации эффективности этого метода проведем сопоставление известных энергетиче-

ских спектров мюонов с распределением по числу сработавших рядов для детектора из 110 рядов. В качестве исходных энергетических спектров выбраны спектры «одиночных» мюонов, обсуждаемые в литературе (спектры 1, 2 и 3 на рис. 6), и спектр мюонов в составе широких атмосферных ливней (4 на рис. 6). Как видим, 110-рядный детектор позволяет различить обсуждаемые спектры в диапазоне энергий 1—10 ТэВ.

В проведенном анализе не учитывалась возможность генерации мюонами ядерных ливней. Предполагается, что использование искровых камер в многорядном детекторе позволит разделить случаи ядерного и электромагнитного взаимодействий мюонов.

3. Заключение

Анализ прохождения электромагнитных каскадов, генерируемых мюонами, через реальный многорядный детектор показал следующее.

1. Измерение энергии мюона в установках с большим числом рядов можно осуществить способом счета «сработавших» рядов. Сработавшим рядом является ряд, в котором наблюдается число электронов, превышающих заданный порог. При одном значении порога динамический диапазон измеряемых энергий составляет ≈ 50 . Изменением порога по числу вторичных электронов можно осуществлять сдвиг диапазона измеряемых энергий мюонов. Работа с порогом по числу электронов упрощает техническую сторону создания многорядных детекторов.

2. В области энергий $E_{\mu} \approx 10^{11} - 10^{12}$ эВ можно осуществить абсолютную калибровку метода «парного», многорядного спектрометра в измерениях совместно с магнитным спектрометром. Такого типа калибровку предполагается осуществить на установке НИИЯФ МГУ [7].

3. Работа на установках со сравнительно тонкими слоями свинца между рядами детекторов вторичных ливней приводит к потере точности в измерении энергии мюона, но не закрывает возможности измерения энергии. При конструировании многорядных установок возможно компромиссное решение вопроса о толщине свинца между рядами.

В заключение авторы выражают благодарность Е. Вдовчику и Г. Б. Христиансену за обсуждение результатов.

НИИЯФ МГУ

Институт физики Лодзинского
университета

Поступила 9.VI.1980

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Алексеев, Г. Т. Зацепин. Труды Межд. конф. по космическим лучам, т. 1, Изд. АН СССР, М., 1960.
2. О. В. Веденев, В. А. Дмитриев, Г. Б. Христиансен. ЖЭТФ, 44, 556 (1963).
3. Н. П. Ильина, Б. А. Хренов, Э. В. Ярочкина. ЯФ, 18, 854 (1973).
4. Н. П. Ильина, Б. А. Хренов, Г. Б. Христиансен. Изв. АН СССР, сер. физ., 27, 1478 (1973).
5. М. Ф. Библашвили. Докторская диссертация, ТГУ, Тбилиси, 1971.
6. А. Д. Ерлыкин. Препринт ФИАН № 67, М., 1967.

7. Ju. N. Bazutov et al. Intern. Cos. Ray Conf., Plovdiv, 1977, v. 6, p. 167.
 8. H. B. Bhaba. Proc. Roy. Soc., A 164, 257 (1938).
 9. A. A. Petrukhin, V. V. Schestakov. Canad. J. Phys., 46, 377 (1968).
 10. R. P. Kokoulin, A. A. Petrukhin. Acad. Sci. Hung., 4, 277 (1970).
 11. С. Р. Кельнер, Ю. Д. Котов. ЯФ, 7, 360 (1968).
 12. А. И. Никитов. ЯФ, 27, 1281 (1978).
 13. I. P. Ivanenko, A. A. Kirillov. Intern. Cos. Ray Conf., Plovdiv, 1977, v 8, p. 432.
 14. А. А. Беллев, В. В. Гужавин, И. П. Иваненко. Препринт ФИАН № 34, 1975.
 15. Н. М. Герасимова. Труды ФИАН, 1964.
- J. N. Vardanyan, N. M. Gerastimova, I. P. Ivanenko. Intern. Cos. Ray Conf., Plovdiv, 1977, v. 7, p. 478.

**ԷԼԵԿՏՐՈՄԱԳՆԵՒՍԱԿԱՆ Հեղեղների ԲԱԶՄԱՇԱՐՔ ԴԵՏԵԿՏՈՐ
ՄՅՈՒՈՆՆԵՐԻ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ՉԱՓՄԱՆ ՀԱՄԱՐ
(Հեղեղների զարգացման հաշվարկ)**

Վ. Ա. ԱՍՏԱՖԵՎ, Ա. Ն. ԳՐՈՒՇԻՆՍԿԻ, ՅՈՒ. Գ. ԼՅՈՒՏՈՎ,
Բ. Ա. ԽՐԵՆՈՎ, ՅԱ. ՕԼԵՆԻՉՈՎ

Աշխատանքում դիտարկվում է $E_{\mu} \gtrsim 10^{12}$ էՎ տիրույթում մյուոնի էներգիայի չափման հնարավորությունը բազմաշարք դետեկտորների օգնությամբ, որտեղ օգտագործվում է մյուոնների γ -դույզերի ուղղակի ծնման էֆեկտը: Հաշվարկված է տարրեր էներգիաների մյուոնների էլեկտրոն-ֆոտոնային հեղեղների առաջացումը դետեկտորում, որը բազմապատ է բազմաշարք կայծային խցերից, շերտավորված արճիճով: Ցույց է տրվում, որ մյուոնի էներգիան կարելի է որոշել հաշվելով այն կայծային խցերի թիվը, որտեղ զրանցվում են որոշակի շեմից բարձր թվով երկրորդային էլեկտրոններ: Բերվում են մյուոնի էներգիայի չափման սպասվող ճշտությունները տարրեր թվով շարքերի և կայծային խցերի միջև արճիճի տարրեր հաստությունների համար:

**MULTI-ARRAY DETECTOR FOR MUON ENERGY MEASUREMENT
(CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC CASCADE DEVELOPMENT)**

V. A. ASTAF'EV, A. N. GRUSHINSKY, Yu. G. LYUTOV,
B. A. KHRENOV, J. OLEJNICHAK

The possibility of muon energy measurements for energies $E_{\mu} \gtrsim 10^{12}$ eV with the help of multi-array detector utilizing the effect of direct e^+e^- -pair production by muons is considered. The electron-photon cascades generated by muons of various energies are calculated for detectors comprising spark chamber arrays interleaved with lead. It is shown that one can easily measure the muon energy by counting the number of those spark chamber arrays where the secondary shower is above the threshold. The expected accuracy of the energy measurements for various numbers of arrays and various thicknesses of layers is presented.