

## ФИЗИКА

Х. П. Бабаян, Н. Л. Григоров, Э. А. Мамиджян и В. Я. Шестоперов

Взаимодействия ядерно-активных частиц высокой энергии  
с легкими атомными ядрами, характеризуемые  
большой степенью неупругости

(Представлено чл.-корр. АН Армянской ССР Г. М. Гарибяном 23/IX 1963)

Изучение так называемых молодых электронно-фотонных атмосферных ливней, основная энергия которых сконцентрирована в круге радиусом несколько десятков сантиметров, показало, что такие ливни образуются в результате взаимодействия ядерно-активной частицы в сравнительно тонком слое атмосферы над установкой (<sup>1</sup>).

Для согласования экспериментально полученной частоты м. а. л. с измеренным потоком ядерно-активных частиц нам пришлось предположить, что молодые ливни генерируются во взаимодействиях, в которых небольшому числу  $\pi^0$ -мезонов ( $\leq 4$ ) передается большая часть энергии „первичной“ ядерно-активной частицы.

Классификация м. а. л. и их регистрация основаны на отборе специфических электронно-фотонных каскадов, образуемых рождающимися  $\pi^0$ -мезонами (отбор по энергии каскада  $E_{э.-ф.}$  и ее пространственной концентрации).

Поскольку вторичные  $\pi^\pm$ -мезоны, образовавшиеся в том же взаимодействии, практически не участвуют в формировании электронно-фотонных молодых ливней, их угловое и энергетическое распределение является тем параметром, на который не действуют требования отбора м. а. л. Поэтому измерение ядерно-активной компоненты позволяет получить весьма существенную информацию о характеристиках тех взаимодействий, которые лежат в основе образования м. а. л.

Исследование м. а. л. проводилось нами на высоте 3200 м над уровнем моря на установке с рабочей площадью 10 м<sup>2</sup>, схематическое изображение и подробное описание которой приведено в ряде работ (напр. (<sup>2</sup>)). Установка состояла из шести рядов ионизационных камер, разделенных фильтрами из свинца и графита. Два верхних ряда камер (V—VI) служили для измерения энергии электронно-фотонной компоненты м. а. л. (<sup>1</sup>). Камеры остальных четырех рядов (I—IV),

находившиеся под комбинированным фильтром из графита и свинца, служили для измерения энергии, переданной  $\pi^0$ -мезонам в фильтрах установки ядерно-активными частицами, входящими в состав м. а. л.

Изучались такие ливни, в которых в небольшом числе  $m$  камер ( $m \leq 6$ ) ряда под 3 см Рb (V или VI ряд) находилось  $\geq 60\%$  всей ионизации, регистрируемой камерами данного ряда. При этом отбирались только те м. а. л., оси которых падали не ближе 50 см от краев установки.

Энергия  $E_{э.-ф.}$  электронно-фотонной компоненты м. а. л. нами определялась по формуле  $E_{э.-ф.} = 1,4 \cdot 10^8 I_{5,6}$ , где  $I_{5,6}$  — наибольшее из двух значений ионизации во всем ряду (V или VI), выраженной в числе релятивистских частиц, прошедших по диаметру камер.

При определении энергии  $\pi^0$ -мезонов, генерированных я.-а. частицами в фильтре над I—II и III—IV рядами камер, мы в каждом индивидуальном случае брали наибольшее значение ионизаций в I или II ряду —  $I_{1,2}$  и в III или IV ряду —  $I_{3,4}$ , т. е.  $E_{\pi_1^0} = k I_{1,2}$  и  $E_{\pi_2^0} = k I_{3,4}$  (коэффициент  $k$  одинаков для всех I—VI рядов камер [3]).

$$\text{Так как } E_{э.-ф.} = k I_{5,6}, \text{ то } \frac{E_{\pi_1^0}}{E_{э.-ф.}} = \frac{I_{1,2}}{I_{5,6}} \text{ и } \frac{E_{\pi_2^0}}{E_{э.-ф.}} = \frac{I_{3,4}}{I_{5,6}}. \quad (1)$$

Зная  $E_{\pi_1^0} + E_{\pi_2^0}$  (экспериментально определив  $I_{1,2} + I_{3,4}$ ), мы можем оценить полную энергию я.-а. компоненты м. а. л. (усредненную по многим ливням).

Нами было отобрано 194 м. а. л. с  $m = 1-6$  и энергией электронно-фотонной компоненты  $1,7 \cdot 10^{12} \text{ эв.} \leq E_{э.-ф.} < 5,1 \cdot 10^{13} \text{ эв.}$

При определении энергии я.-а. частиц молодых ливней по величине ионизации, зарегистрированной нижними рядами камер, мы вводили следующие поправки в экспериментальные данные.

1. Поправка в величину  $\frac{I_{1,2}}{I_{5,6}}$ , связанная с возможным выходом я.-а. частиц через боковые поверхности установки.

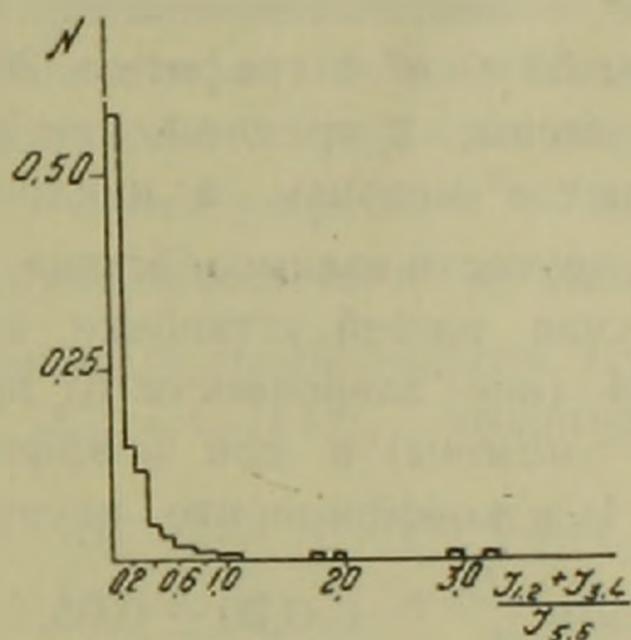
2. Поправка в величину  $\frac{I_{3,4}}{I_{5,6}}$ , связанная с проникновением э.-ф. компоненты м. а. л. из атмосферы через фильтры установки.

Таким образом, если  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}_{\text{экс.}} = 0,144 \pm 0,030$ , то с учетом обеих поправок  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}_{\text{испр.}} = 0,135 \pm 0,025$ .

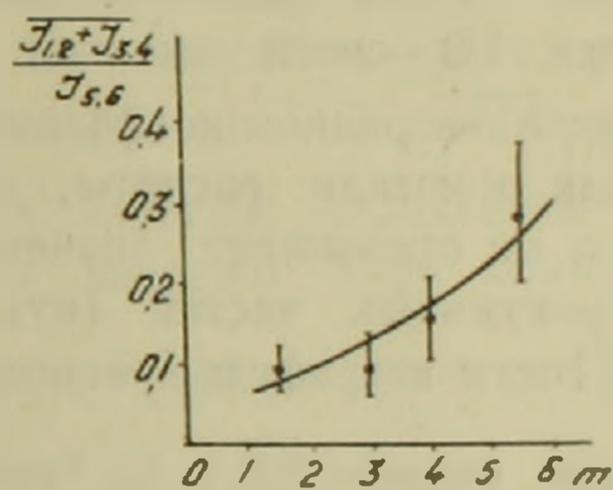
Для выяснения механизма генерации м. а. л. важно знать не только соотношение между энергией я.-а. частиц  $\overline{E_{я.-а.}}$  и э.-ф. компоненты  $\overline{E_{э.-ф.}}$  в м. а. л., но и распределение величины  $\frac{\overline{E_{я.-а.}}}{\overline{E_{э.-ф.}}}$  по всем ливням. Поэтому нами было построено экспериментально наблюдае-

мое распределение м. а. л. по величине  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}$  (фиг. 1). Следует подчеркнуть, что у  $(42 \pm 5,5)\%$  молодых ливней  $I_{1,2} + I_{3,4} = 0$ , а у  $85\%$  всех м. а. л.  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}} < 0,3$  и для них  $\left(\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}\right)_{\text{испр.}} = 0,056 \pm \pm 0,008$ .

Для того чтобы выяснить не является ли малая доля энергии, заключенная в я.-а. компоненте м. а. л., результатом того, что часть я.-а. частиц проходит мимо установки, была построена зависимость среднего значения  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}$  от „возраста“ ливней (от пара-



Фиг. 1. Распределение м. а. л. с энергией  $E_{\text{я.-а.}} \geq 1,7 \cdot 10^{12}$  эв по величине  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}$ . По оси абсцисс—величина  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}$ , по оси ординат—число ливней с соответствующими значениями величины  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}$  (в относительных единицах).



Фиг. 2. Зависимость среднего значения величины  $\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}}$  от величины  $m$ .

метра  $m$ ) (фиг. 2). Чем меньше  $m$ , тем меньше эффективный слой атмосферы, в котором генерируются м. а. л. <sup>(1)</sup>, т. е. тем меньше должны расходиться я.-а. частицы, тем больший поток энергии я.-а. компоненты должен падать на установку. Фиг. 2 показывает, что в я.-а. частицах, проходящих мимо установки, заключена малая доля энергии от той, которая регистрируется установкой.

В ряде случаев ионизация в рядах I—II и III—IV вызывалась не одной, а несколькими я.-а. частицами. Это было видно из распределения ионизации по камерам—оно имело несколько четких максимумов. Поэтому мы подсчитали, какой вклад в суммарную ионизацию вносит одна наиболее энергичная частица (которую мы отождествляли с наибольшим максимумом при нескольких максимумах и со всей ионизацией при одном максимуме). Оказалось, что  $\leq 60\%$  ионизации

(подсчет велся по II ряду) создается, в среднем, одиночной я.-а. частицей.

Как было отмечено выше, 
$$\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}} = \frac{E_{\pi}(210\text{г/см}^2) + E_{\pi}(60\text{г/см}^2)}{E_{\text{э.-ф.}}}$$

Но, вообще говоря, я.-а. частицы с энергией  $E_{\text{я.-а.}}$  в фильтрах установки передают  $\pi^0$ -мезонам лишь часть своей энергии. Поэтому

$$\frac{E_{\text{я.-а.}}}{E_{\text{э.-ф.}}} = a \frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}},$$
 где  $a$  — некоторый коэффициент, больший 1.

Чтобы вычислить коэффициент  $a$ , необходимо сделать определенные предположения о средних характеристиках взаимодействия я.-а. частиц с атомными ядрами фильтров установки (углеродом и свинцом). Мы считали, что пробеги для взаимодействия я.-а. частиц, вне зависимости от их природы, равны  $85 \text{ г/см}^2$  в графите и  $300 \text{ г/см}^2$  в свинце. Также предполагалось, что пионы, в среднем, при взаимодействии  $1/3$  своей энергии передают  $\pi^0$ -мезонам, а нуклоны —  $1/3 \overline{K}_n$ , где  $\overline{K}_n$  — средний коэффициент неупругости взаимодействия нуклонов. Как показали расчеты, для случая нашей установки, коэффициент  $a$  не превышает значения 2,24 (вне зависимости от природы ядерно-активных частиц (нуклоны,  $\pi^\pm$ -мезоны) и при коэффициенте неупругости в графите, равном 0,5 и 1; и коэффициенте неупругости в свинце, равном 0,5 и 1). Таким образом, 
$$\frac{E_{\text{я.-а.}}}{E_{\text{э.-ф.}}} \leq 0,30 \pm 0,05.$$

Однако возможно, что эта величина нуждается в введении еще одной поправки на поглощение э.-ф. компоненты в толстом слое графита в  $210 \text{ г/см}^2$ . Как показывают расчеты, учет этого эффекта

приводит к тому, что 
$$\frac{I_{1,2} + I_{3,4}}{I_{5,6}} \leq 0,205 \pm 0,038 \text{ и } \frac{E_{\text{я.-а.}}}{E_{\text{э.-ф.}}} \leq 0,45 \pm 0,08.$$

Иными словами, я.-а. частицы, входящие в состав м. а. л., в среднем, имеют энергию не более  $(31 \pm 6)\%$  от энергии  $E_0$  той „первичной“ частицы, взаимодействие которой в атмосфере привело к образованию м. а. л. Так как наиболее энергичная я.-а. частица имеет энергию, в среднем, не более  $0,6 \overline{E}_{\text{я.-а.}}$ , то, отождествляя ее с нуклоном, мы можем утверждать, что средняя энергия нуклонов в регистрируемых м. а. л. не превышает  $(0,19 \pm 0,03) E_0$ .

Как показывают расчеты, вышеприведенное экспериментально полученное значение  $\frac{E_{\text{я.-а.}}}{E_{\text{э.-ф.}}}$  никаким образом нельзя объяснить, предположив, что в основе образования м. а. л. лежат стандартные взаимодействия, характеризуемые средним коэффициентом неупругости  $\overline{K} = 0,5$ .

Как мы показали, 
$$\frac{E_{\text{нукл.}}}{E_0} \leq 0,19 \pm 0,3.$$
 Следовательно, нуклон в пределах эффективного слоя при генерации м. а. л. теряет, в среднем, не менее  $(81 \pm 3)\%$  своей энергии.

Из этого факта следует, что в генерации м. а. л. процессы распада гиперонов или изобар на  $\pi^0$ -мезон высокой энергии и нуклон не играют сколько-нибудь значительной роли, так как, согласно расчетам, при распаде гиперонов или изобар, нуклон, в среднем, уносит  $\approx 70\%$  энергии „первичной“ частицы. (Как показывают расчеты, роль процессов распада гиперонов и изобар не превышает  $10\%$ ).

Возникает весьма важный вопрос, в какой мере средняя потеря энергии ( $\sim 80\%$ ) может быть отнесена к одному акту взаимодействия и какую роль играют последовательные взаимодействия в пределах эффективного слоя  $X_{эфф.}$  генерации м. а. л. (по нашим оценкам  $X_{эфф.} \leq 120 \text{ г/см}^2$ ).

Рассмотрим следующую модель генерации.

В пределах слоя  $X_{эфф.}$  нуклон („первичная“ я.-а. частица, генерирующая м. а. л.) может испытать  $n$  взаимодействий. При каждом взаимодействии с вероятностью  $\omega$  он может передать  $\pi^0$ -мезонам долю  $\bar{K}_{\pi^0}$  своей энергии, а  $\pi^\pm$ -мезонам — долю своей энергии, равную  $\bar{K}_{\pi^\pm}$ . Образовавшиеся  $\pi^\pm$ -мезоны в каждом взаимодействии передают  $\pi^0$ -мезонам  $1/3$  своей энергии. Суммарная энергия, переданная  $\pi^0$ -мезонам,  $E_{\pi^0} = \alpha_{\pi^0}(n) E_0$  принималась за энергию э.-ф. компоненты

м. а. л. По этой модели были рассчитаны средние значения  $\frac{\overline{E_{\text{укл.}}}}{E_0}$  и

$\frac{\overline{E_{\text{я.-а.}}}}{E_0}$  для разных значений  $\bar{K}_{\pi^0}$ ,  $\bar{K}_{\pi^\pm}$  и  $\omega$ . Результаты расчета приведены на фиг. 3 и 4. Из фиг. 3 видно, что для того, чтобы после образования молодого атмосферного ливня у нуклона оставалась, в

среднем, доля энергии  $\frac{\overline{E_{\text{нукл.}}}}{E_0} \leq 0,19 \pm 0,03$ , необходимо, чтобы взаимодействие, лежащее в основе генерации м. а. л., обладало коэффициентом неупругости  $\bar{K} = \bar{K}_{\pi^0} + \bar{K}_{\pi^\pm} \geq 0,78 \pm 0,04$ . Как видно из

фиг. 4, чтобы при заданном  $\bar{K} \geq 0,78 \pm 0,04$ ,  $\frac{\overline{E_{\text{я.-а.}}}}{E_0} \leq 0,31 \pm 0,06$ , необходимо, чтобы уже  $\bar{K}_{\pi^0} > 0,6$ .

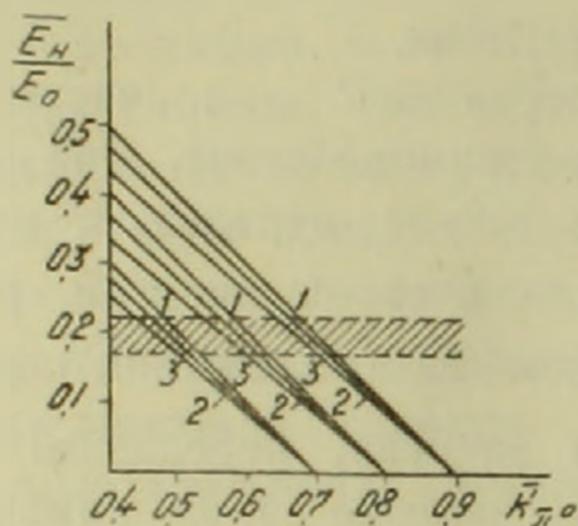
Непосредственные расчеты показывают, что при  $\bar{K}_{\pi^0} = 0,6$ ,  $\omega = 0,3$  и  $\bar{K}_{\pi^\pm} = 0,3 \sim 80\%$  м. а. л. образуются в результате одного взаимодействия генерирующей частицы в слое  $X_{эфф.} = 120 \text{ г/см}^2$ . В действительности,  $\omega < 0,3$ , так как  $\omega \bar{K}_{\pi^0} < 0,19$ . Поэтому доля м. а. л., генерируемых в одном взаимодействии, будет больше  $80\%$ . Следовательно,

полученное ранее значение  $\frac{\overline{E_{\text{я.-а.}}}}{E_0} \leq 0,31 \pm 0,06$  относится, в среднем, к

одному акту взаимодействия, т. е.  $\bar{K}_{\pi^0} \geq 0,69 \pm 0,06$ . Эта оценка средней доли энергии, передаваемой  $\pi^0$ -мезонам во взаимодействиях, ответственных за образование м. а. л., полученная из среднего потока энергии я.-а. компоненты м. а. л., хорошо согласуется с оценкой

величины  $\overline{K_{\pi^{\pm}}} \geq 0,63$ , полученной из анализа характеристик э.-ф. компоненты м. а. л., проведенного нами.

Можно оценить вклад процессов, ответственных за образование м. а. л., в общие потери энергии нуклонов на образование  $\pi^0$ -мезонов. Считая, что при взаимодействии с легкими ядрами пионы, в среднем,  $1/3$  своей энергии передают  $\pi^0$ -мезонам, мы получили, что при  $L_n = 109 \text{ г/см}^2$ ,  $L_v = 85 \text{ г/см}^2$ ,  $\pi^0$ -мезоны получают в слое  $X_{\text{эфф.}} = 120 \text{ г/см}^2$  энергию  $1,37 \cdot 10^4 \text{ эв см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ . Сравнив эту величину с  $E_{\text{э.-ф. м. а. л. эксп.}} = (6,3 \pm 0,9) \cdot 10^3 \text{ эв см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ , мы видим, что в процессах, ответственных за образование м. а. л., теряется на



Фиг. 3. Расчет величины  $\frac{E_n}{E_0}$ .

По оси абсцисс—величина  $\overline{K_{\pi^0}}$ , по

оси ординат—величина  $\frac{E_n}{E_0}$ . Ниж-

нее семейство прямых— $\overline{K_{\pi^{\pm}}} = 0,3$ .

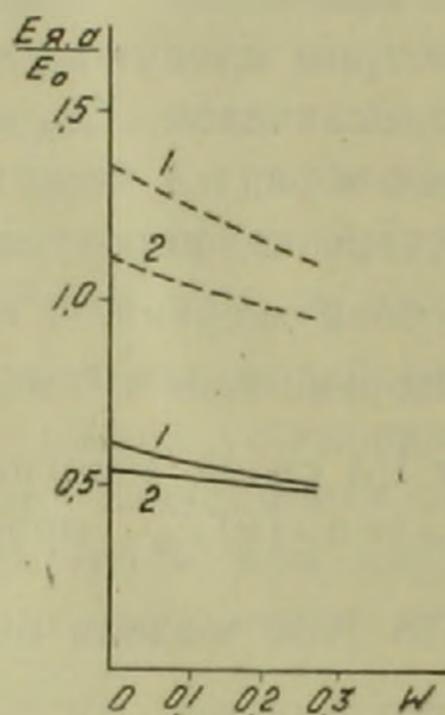
Среднее семейство прямых—

$\overline{K_{\pi^{\pm}}} = 0,2$ . Верхнее семейство

прямых— $\overline{K_{\pi^{\pm}}} = 0,1$ . Индекс

1— $w = 0,01$ ; 2— $w = 0,1$ ; 3— $w = 0,2$ .

Заштрихованная полоса—эксперимент.



Фиг. 4. Расчет величины  $\frac{E_{\text{я.а.}}}{E_0}$ .

По оси абсцисс—величина  $w$ ; по

оси ординат—величина  $\frac{E_{\text{я.а.}}}{E_0}$ .

Пунктирные линии— $\overline{K_{\pi^0}} = 0,4$ ;

сплошные линии— $\overline{K_{\pi^0}} = 0,6$ . Ин-

декс 1— $\overline{K_{\pi^{\pm}}} = 0,1$ ; 2— $\overline{K_{\pi^{\pm}}} = 0,4$ .

энергию  $\pi^0$ -мезонов около  $45\%$  всей энергии, теряемой на образование  $\pi^0$ -мезонов во всех взаимодействиях. Если средние потери энергии нуклонов при взаимодействии с ядрами атомов воздуха равны  $\overline{K_n}$ , то на образование  $\pi^0$ -мезонов, в среднем, нуклоны теряют долю своей энергии, равную  $1/3 \overline{K_n}$ . В процессах, подобных генерации м. а. л., в среднем, в одном акте нуклоны теряют на образование  $\pi^0$ -мезонов долю своей энергии  $\overline{K_{\pi^0}}$ , а такие взаимодействия происходят с вероятностью  $w$ . Так как вклад этих процессов в общие потери энергии на образование  $\pi^0$ -мезонов  $\geq 45\%$ , то  $w \overline{K_{\pi^0}} \geq 0,45 \cdot 1/3 \overline{K_n} \approx 0,15 \overline{K_n}$ . Так как  $\overline{K_{\pi^0}} \approx 0,7$ , то при  $\overline{K_n} = 0,5 \div 0,6$  [4],  $w \geq 0,11 \div 0,13$ . Из частоты генерации м. а. л. мы нашли, что  $w \leq 0,27$ , следовательно,  $0,09 \leq w \leq 0,27$ .

Таким образом, изучение я.-а. компоненты молодых атмосферных ливней показывает, что при энергии я.-а. частиц  $E_0 > 1,7 \cdot 10^{12}$  эв. существуют и реализуются с вероятностью  $0,11 \leq w \leq 0,27$  взаимодействия с почти полной неупругостью ( $\bar{k} \approx 1$ ) и передачей в одном акте  $\pi^0$ -мезонам  $\sim 70\%$  энергии „первичной“ частицы. Эти взаимодействия вносят существенный вклад,  $\geq 45\%$ , в общие потери энергии на образование  $\pi^0$ -мезонов.

Более подробный анализ характеристик взаимодействий с большой степенью неупругости приведен в двух статьях, находящихся в печати (ЖЭТФ).

Ереванский институт физики ГКАЭ,  
НИИЯФ МГУ, Ереванский государственный университет

Խ. Պ. ԲԱԲԱՅԱՆ, Ն. Լ. ԳՐԻԳՈՐՈՎ, Է. Ա. ՄԱՍԻՋԱՆՅԱՆ ԵՎ Վ. Յ. ՇԵՍՏՈՊԵՐՈՎ

**Բարձր էներգիայով օժտված միջուկային ակտիվ մասնիկների գրեթե լրիվ ոչ առաձգական փոխազդեցությունները բերևատու մասնիկների հետ**

Երիտասարդ մթնոլորտային հեղեղների միջուկային ակտիվ կոմպոնենտի ուսումնասիրությունը ծովի մակերևույթից 3200 մ. բարձրության վրա, հնարավորություն է տալիս որոշելու, որ բարձր էներգիայով օժտված ( $> 2 \cdot 10^{12}$  է. վ.) միջուկային ակտիվ մասնիկների և օդի ատոմների միջուկների միջև տեղի է ունենում գրեթե լրիվ ոչ առաձգական փոխազդեցություններ ( $\bar{k} \sim 1$ ): Չնահատված է այդպիսի փոխազդեցությունների հավանականությունը:

#### ЛИТЕРАТУРА — ՊՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

<sup>1</sup> Н. Л. Григоров, М. А. Кондратьева, А. И. Савельева, В. А. Собиняков, А. В. Подгурская, В. А. Шестоперов, Труды Международной конференции по космическим лучам, М., 1960, 1, стр. 122. <sup>2</sup> Х. П. Бабаян, Я. С. Бабецки, Н. Г. Бояджян, З. А. Буя, Н. Л. Григоров, Е. С. Лоскевич, Э. А. Мамиджаниян, Е. И. Массальский, А. А. Олесь, Г. А. Третьякова и В. Я. Шестоперов, Изв. АН СССР, сер. физ. 26, 558, 1962. <sup>3</sup> Я. С. Бабецки, З. А. Буя, Н. Л. Григоров, Е. С. Лоскевич, Е. И. Массальский, А. А. Олесь, В. Я. Шестоперов, ЖЭТФ, 40, 6, 1551, 1961. <sup>4</sup> М. Шайн, Д. М. Хаскин, Е. Лорман, М. В. Тойхер, Труды Международной конференции по космическим лучам, М., 1960, 1, стр. 7.