*1974 г. Июнь* *Том 113, вып. 2*

*УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК*

## БИБЛИОГРАФИЯ

537.591.2(049.3)

# О ПУТЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

**Н. Л. Григоров, И. Д. Рапопорт, В. Я. Шестоперов.** Частицы высоких энергий в космических лучах. М., «Наука» (Главная редакция физико-математической литературы), 1973, 303 с.

В монографии подводятся итоги исследований свойств адронов высоких энергий в космических лучах. В предисловии к книге авторы справедливо отмечают, что в условиях жесткой конкуренции с ускорителями особую актуальность приобретает правильный выбор путей развития исследований частиц высоких энергий в космических лучах. В этой связи авторы ставят перед собой задачу: «...Оглянуться на пройденный путь, подвести некоторые итоги изучения частиц высокой энергии в космических лучах, выявить результаты принципиального значения, которые были получены при изучении частиц с энергиями $10^{11}$—$10^{12}$ *эв*» (стр. 8). Вследствие известных особенностей (малая величина потока и неопределенности состава и энергии адронов) космические лучи совершенно неконкурентноспособны с ускорителями в области энергий, достижимых на машинах. По этой причине сформулированные в книге задачи представляются чрезвычайно актуальными.

Монографию можно разбить на три части. В гл. I—III излагается методика исследования космических лучей, основанная на использовании ионизационного калориметра, разработанного Н. Л. Григоровым, В. С. Мурзиным и И. Д. Рапопортом. В гл. IV—VIII рассматриваются некоторые физические результаты, полученные в космических лучах. В гл. IX сопоставляются различные пути исследования частиц в космических лучах.

В первой части (гл. I—III) в основном рассматриваются принципы работы ионизационного калориметра и описываются некоторые новые установки, в которых используется ионизационный калориметр в сочетании с другими методами (например, фотоэмульсиями). Необходимо отметить, что ионизационный калориметр сейчас является одним из основных методов исследования космических лучей.

Физические результаты содержатся во второй части (гл. IV—VIII). Основываясь на исследовании спектров космических лучей на различных глубинах атмосферы (в том числе и за ее пределами), авторы формулируют два основных вывода, имеющих выход в физику высоких энергий: 1) «Экспериментальные данные хорошо согласуются с предположением о росте $\sigma^{in}$ до энергий $3\cdot10^{11}$—$10^{12}$ *эв* и не согласуются с предположением о неограниченном росте $\sigma$» (стр. 148). В книге утверждается, что «на встречных пучках в ЦЕРНе было получено подтверждение роста $\sigma^{in}$ с ростом $E_0$ в интервале 20—1500 *Гэв*» (стр. 142). 2) «По всей толще атмосферы генерация $\gamma$-квантов высокой энергии происходит в результате взаимодействия нуклонов с энергией $E_0 \geqslant 10^{12}$ *эв* с легкими ядрами атмосферы. При этом большая часть энергии нуклона ($\sim$60%) переходит к малому числу (2—4) $\pi^0$-мезонов» (стр. 176).

В последней части (гл. IX) авторы приходят к заключению, что «сложность состава и большое сопровождение адронов высокой энергии другими частицами резко снижают эффективность и однозначность изучения индивидуальных взаимодействий адронов с энергией $\sim10^{13}$ *эв* на высотах гор. Область более высоких энергий порядка $10^{14}$ *эв* представляется совершенно недоступной для исследований... на высотах гор в установке, в которой регистрируется энергия частицы» (стр. 274).

К аналогичному пессимистическому заключению приходят авторы относительно перспектив исследований взаимодействия адронов на основе изучения ливней из атмосферы. Однако противоположный оптимистический прогноз делается для изучения космических лучей высоких энергий на больших высотах (§ 9.3).

© «Успехи физических наук», 1974.

Подчеркнем, что последние выводы имеют большую практическую важность, поскольку они предрешают бесперспективность многочисленных и дорогостоящих исследований элементарных взаимодействий в горных условиях и оставляют лишь возможность таких исследований вблизи границы атмосферы.

И здесь возникает вопрос: насколько объективны сформулированные выше выводы? Прежде чем ответить на этот вопрос, приведем сделанный нами любопытный подсчет: из 199 ссылок к книге свыше пятидесяти — это ссылки на работы авторов и их сотрудников, свыше 40 — ссылки на работы других авторов, результаты которых объявляются неверными и критикуются. Оставшаяся половина ссылок в подавляющем большинстве либо доказывает правоту выводов, сделанных авторами, либо подкрепляет утверждение об ошибочности работ их оппонентов. Поэтому в книге практически отсутствует «нейтральная» информация о взаимодействии адронов, не связанная с подтверждением правильности работ авторов либо с критикой результатов, полученных другими исследователями.

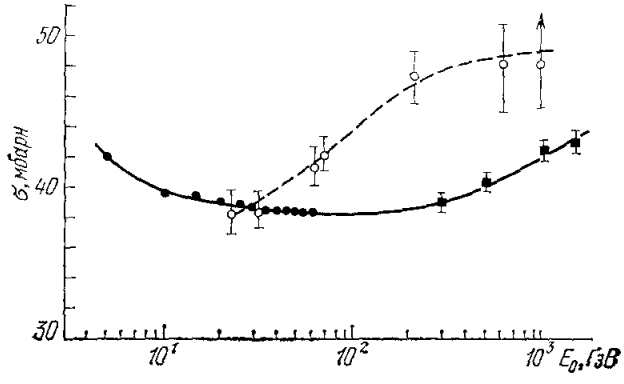


Рис. 1.

Посмотрим, насколько объективно подобный подход отражает ситуацию, сложившуюся в области исследования космических лучей.

На рис. 1 сплошной кривой представлены данные, полученные на ускорителях (см. годовой отчет ЦЕРНа за 1972 г.), о зависимости полного сечения $\sigma^T(E_0)$. Упругое сечение составляет менее 20% и имеет ту же форму зависимости, что и $\sigma^T$. Поэтому в относительных единицах сплошная кривая аппроксимирует и ход сечения $pp$-соударений. В книге приводятся данные по $p$C-столкновениям; здесь возникает вопрос о методах сопоставления $pp$- и $p$C-соударений. Если принять простейшее допущение, что относительный ход функции $\sigma^{in}(E_0)$ не зависит от атомного номера ядра-мишени, то функции $\sigma^{in}(E_0)$, полученные на ускорителях и определенные в космических лучах (штриховая кривая), имеют различный характер *).

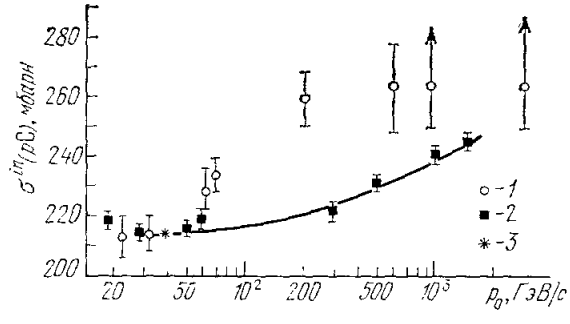


Рис. 2.

*1* — данные, полученные в космических лучах; *2* — данные от ускорителей; $E_0 < 60$ *Гэв* — прямые измерения сечения $p$C-соударений, $E_0 > 300$ *Гэв* — пересчитанные данные ISR (пересчет проводился при допущении тождественности относительной зависимости $pp$- и $p$C-соударений); *3* — точка нормировки.

Пересчет от $p$C- к $pp$-соударениям не вполне однозначен; однако если внести некоторые поправки (учет квазиупругих столкновений) или применить хорошо зарекомендовавшую себя модель пересчета, предложенную Глаубером, то расхождение между данными, полученными на ускорителях и в космических лучах, сохранится.

Ввиду важности этого пункта мы приведем результаты обратного пересчета от $pp$- к $p$C-столкновениям. На рис. 2 приведены данные о $\sigma^{in}$, полученные в космических лучах (светлые кружки) и на ускорителях (сплошная линия). Точки до $E_0 \sim 60$ *Гэв* получены прямыми измерениями $p$C-соударения [1]; данные при $E_0 \sim 300$ *Гэв* получены путем пересчета результатов ISR.

---

*) Обе кривые нормированы к значению $E_0 \sim 20$ *Гэв*. Уже на стадии корректуры автору рецензии стали известны новые данные об измерении сечения на ускорителях при энергии $> 100$ *Гэв*; эти данные оставляют в силе вопрос о различии между результатами измерения сечений в космических лучах и на ускорителях (см., например,[10] и доклад Ю. Д. Прокошкина на научной сессии ОЯФ АН СССР (февраль, 1974 г.)).

Не обсуждая этих принципиальных вопросов, авторы ограничиваются лишь кратким замечанием о подтверждении их данных данными ISR.

Не вполне ясны причины, по которым отсутствуют в книге результаты измерений сечений $pp$-соударений, проведенных авторами за пределами атмосферы [2]. Здесь, без учета экспериментальных ошибок, был обнаружен рост сечения при изменении энергии от $E_0 \sim 20$ *Гэв* до $E_0 \sim 600$ *Гэв* примерно на 40%. Однако если учесть большие экспериментальные ошибки (~20—25%), то нельзя сказать ничего определенного о ходе сечения $pp$-соударения, полученного в цитированной работе.

Перейдем далее к анализу второго вывода о передаче значительной доли энергии одной вторичной частице. В книге приводится несколько различных цифр, характеризующих среднюю энергию вторичной частицы (не бариона), уносящей наибольшую энергию. На стр. 176 утверждается, что наиболее быстрый $\pi^0$-мезон уносит $\sim 0{,}4\,E_0$. Из табл. 5.6 (стр. 163) следует, что доля энергии самого «энергетичного» вторичного $\gamma$-кванта равна $(0{,}51 \pm 0{,}03)\,E_0$. Доля случаев, когда появляются $\gamma$-кванты столь больших энергий, равна $(8 \pm 3)$ % (стр. 166).

Далее утверждается, что данные ISR [3] согласуются с результатами авторов. Однако в работе Нейхофера и др. регистрировались вторичные $\gamma$-кванты с энергией меньше $0{,}15\,E_0$. Поэтому без существенной экстраполяции нельзя сравнивать данные авторов и результаты ISR. Если же экстраполировать данные ISR к значениям $E_\gamma \sim 0{,}5E_0$, то получается, что относительная вероятность появления одного $\gamma$-кванта с $E_\gamma = 0{,}51E_0$ приблизительно равна 0,001. Полагая, что среднее число $\pi^0$-мезонов при $E_0 \sim 10^{12}$ *эв* равно 5 и, следовательно, число $\gamma$-квантов $\sim 10$, получаем, что доля событий с появлением $\gamma$-квантов с энергией $E_\gamma = 0{,}51E_0$ равна 0.01, что примерно на порядок меньше цифры, приведенной в книге.

Однако главный дефект анализа появления быстрых вторичных частиц в другом. Помимо упомянутой работы Нейхофера и др., на ускорителях получен богатый материал о быстрых вторичных частицах (см., например, [4]). Анализ этого материала в книге отсутствует.

В обзорном докладе Д. Моррисона (Оксфорд, апрель 1972 г.) [5] приводятся энергетические распределения вторичных $\pi^\pm$-мезонов, вплоть до энергий $E_\pi \sim 0{,}5E_0$ при значении $E_0 \sim 10^{12}$ *эв*. Из соображения изотопической инвариантности следует, что и $\pi^0$-мезоны имеют распределения, сходные с распределениями $\pi^\pm$-мезонов. Эти данные также не нашли своего отражения в книге.

Сейчас содержащиеся в книге косвенные и очень сложные методы определения некоторых усредненных характеристик спектра в области энергий, достигнутых на ускорителях, имеют лишь историческое значение.

Здесь мы подходим к наиболее слабой стороне монографии — практически полному отсутствию связи результатов, полученных в космических лучах, с современными проблемами физики высоких энергий. В книге всего три ссылки на работы ISR (из которых две обсуждаются, как мы видели, неточно) и *полностью* отсутствуют ссылки на результаты, полученные с помощью Серпуховского ускорителя, который успешно функционирует уже шесть лет. То обстоятельство, что энергия, достижимая на Серпуховском ускорителе, примерно в два раза меньше минимальных энергий, обсуждаемых в монографии (в книге анализируются энергии, начиная с $E_0 = 100-200$ *Гэв*), не может служить оправданием игнорирования очень большого экспериментального материала, полученного на этом ускорителе. Во-первых, известно, что характеристики взаимодействий адронов медленно изменяются с энергией $E_0$, поэтому увеличение $E_0$ в 2—3 раза практически не изменяет характеристики множественных процессов. Во-вторых, следует всегда оставаться последовательными в оценке экстраполированных данных. В книге полагается правомерным обсуждение некоторых характеристик (калибровка ионизационного калориметра (стр. 30), измерение сечения (стр. 142)) при энергии 20 *Гэв* (т. е. на порядок меньше, чем обсуждаемые в книге минимальные значения энергии $E_0$ космических частиц). Авторы считают также возможным экстраполировать свои грубые, усредненные результаты в сторону больших энергий. Например, усредненные характеристики экстраполируются более чем на порядок (для $E_0 \gtrsim 10^{13}$ *эв*) (стр. 208). И в-третьих, на Серпуховском ускорителе получены данные, имеющие прямое отношение к рассматриваемым в книге вопросам: минимум в энергетической зависимости $\sigma(E_0)$ (так называемый Серпуховской эффект); проведение калибровки искрового калориметра во многих работах (см., например, [6]); упомянутое измерение спектра вторичных частиц и др.

Уже давно представляется невозможным обсуждение путей развития физики частиц высоких энергий в космических лучах без тщательного сопоставления результатов, полученных в космических лучах и с помощью ускорителей. Практически, кроме зависимости $\sigma^{in}(E_0)$ (которая, как мы видели в книге, анализируется неполно), ни один из сколько-нибудь существенных аспектов физики частиц высоких энергий не нашел своего отражения в рецензируемой монографии. В тех же крайне немногочисленных случаях, когда кратко затрагиваются современные аспекты физики высоких энергий, эти вопросы излагаются неточно. Так, на стр. 208 взаимодействия делятся

на катастрофические (когда «частица теряет всю свою энергию») и процесс пионизации («обычные взаимодействия», т. е. нуклон сохраняет часть своей энергии). Однако известно, что, по крайней мере при энергии $E_0 \sim 10^{12}$ *эв*, случаи, когда нуклон теряет *всю* энергию, практически отсутствуют (см. уже упомянутый доклад Моррисона). И, во-вторых, сейчас процессом пионизации называют появление вторичных частиц с энергией много меньше первичной. Поэтому «катастрофические» взаимодействия (даже если бы они существовали) нельзя противопоставлять процессу пионизации, поскольку и в «катастрофических» взаимодействиях процесс пионизации должен иметь место.

На стр. 287 утверждается: «... При справедливости теории скейлинга $dN/d\lambda$ будет иметь плато тем более широкое, чем выше энергия частиц $E_0$». Однако принцип или гипотеза (но не теория!) масштабной инвариантности — скейлинга — не обязательно приводит к существованию плато. Например, в рамках широко обсуждаемой гипотезы предельной фрагментации скейлинг выполняется, а плато отсутствует. Плато может существовать и в рамках моделей, не обладающих скейлинговыми свойствами (гидродинамическая теория множественных процессов) *).

Далее возникает очень важный вопрос: насколько объективно и на каком уровне критикуется большая группа исследований сильного взаимодействия в космических лучах?

Подчеркну, что в рамках рецензии невозможно представить обоснованное суждение по всем дискуссионным вопросам, затронутым в книге. Невозможно и изложить *все* неточные или односторонние заключения, сделанные в монографии. Для изложения этих вопросов нужно написать новую книгу. Чтобы не быть голословным, приведем некоторые примеры.

Критикуя полученное С. А. Славатинским значение коэффициента неупругости $K$, авторы используют соотношения

$$«L_n = \frac{\lambda_{вз}}{1-(1-\overline{K})^{1,6}} = \frac{\lambda_{вз}}{1-0,6^{1,6}}, \text{ т. е. } L_n = 1,55\,\lambda»;$$

$\overline{K}$ — среднее значение $K$ (стр. 234). Однако, во-первых, соотношение $L_n = \lambda_{вз}/[1-(1-\overline{K})^{1,6}]$ получено при нереалистическом допущении

$$(1-\overline{K})^{1,6} = \overline{(1-K)^{1,6}}$$

(см. стр. 88, вывод соотношения (4.4)). И во-вторых, здесь содержится арифметическая ошибка: $\lambda_{вз}/(1-0,6^{1,6})$ приводит к равенству $L_n = 1,82\lambda$ вместо $L_n = 1,55\lambda$.

И еще один пример. На стр. 244 утверждается, что увеличение степени асимметрии с уменьшением множественности является методическим эффектом. Однако помимо работы ФИАНа, которая здесь критикуется, имеется большое количество работ, выполненных различными методами, где наблюдается подобная корреляция (см. [7] и др. работы). Было бы правильным при критике проанализировать также и другие статьи, где получен результат, совпадающий с критикуемой работой.

Наконец, последнее замечание. В книге утверждается, что исследования взаимодействия космических частиц за пределами атмосферы имеют хорошие перспективы. Однако вместо количественного анализа соответствия прогнозов подобных перспектив, сделанных до запусков соответствующих ИСЗ, и уже полученных результатов в монографии представлено лишь описание возможных установок будущего.

С точки зрения прогнозирования очень важно понять причины того, что до измерения сечений за пределами атмосферы достижимая точность в $pp$-соударениях при $E_0 = 10^{12}$ *эв* оценивалась в 3,6% [8] или 6% [9], а на практике авторам удалось лишь при энергии $E_0 \sim 6 \cdot 10^{11}$ *эв* добиться точности хуже 20%. Этот важнейший для выбора оптимального направления вопрос в монографии не обсуждается.

Таким образом, авторы рецензируемой монографии вольно или невольно пытаются обосновать существование особой «космической» физики высоких энергий, практически не связанной с ускорителями. В этом свете парадоксальным выглядит притязание на прогнозирование путей исследования космических лучей.

Но даже в рамках «космической физики высоких энергий» авторы монографии поверхностно и не всегда обоснованно противопоставляют свои результаты достижениям своих коллег в этой области. Значительная часть книги имеет сейчас лишь исторический интерес.

По всем этим причинам монография Н. Л. Григорова и др. недостаточно объективно отражает современное состояние физики частиц высоких энергий, даже в той части, где центр тяжести относится к исследованиям космических лучей.

*И. Л. Розенталь*

---

*) Строго говоря, даже в рамках модельных представлений, плато проявляется не в логарифмических координатах $\lambda$, а в распределении по быстротам $dN/dy$.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Горин и др., ЯФ 18, 336 (1973).
2. Н. Л. Григоров и др., Изв. АН СССР, сер. физ. 33, 1469 (1969).
3. G. Neuhofer et al., Phys. Lett. B38, 51 (1972).
4. Yu. Bushnin, S. Denisov, ibid. B29, 48 (1969).
5. D. Morrison, Review of Many Body Interactions at High Energy, CERN Preprint No. 7219, 30 June 1972.
6. А. В. Алакоз и др., Изв. АН СССР, сер. физ. 35, 2069, 2073, 2176 (1971).
7. В. С. Мурзин, Л. И. Сарычева, ibid. 34, 1899 (1970); Б. О. Абдрахманов и др., сборник «Физика высоких энергий и космических лучей», Алма-Ата, «Наука», 1971, стр. 120; N. N. Biswas et al., Phys. Rev. Lett. 27, 1589 (1971).
8. Н. Л. Григоров и др., Изв. АН СССР, сер. физ. 29, 1656 (1965).
9. Н. Л. Григоров, сборник «Вопросы физики элементарных частиц», Ереван, Изд. АН Арм. ССР, 1964, стр. 247.
10. H. R. Gustafson et al., Phys. Rev. Lett. 32, 441 (1974).