

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-33

P2-99-33

П.С.Исаев

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ  
СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1999

Некоторые проблемы физики космических лучей  
сверхвысоких энергий

Ближайшие 15–20 лет будут годами подлинного расцвета экспериментальных исследований в области энергий космических лучей  $\geq 10^{15}$  эВ и открытия новых явлений в физике элементарных частиц сверхвысоких энергий. В предлагаемой работе рассматриваются нерешенные проблемы современной физики космических лучей сверхвысоких энергий, примыкающие к проблемам физики элементарных частиц.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Перевод автора

Some Problems of Physics of Ultrahigh Energy Cosmic Rays

Nearest 15–20 years will be years of flourishing of experimental researches into the energy of cosmic rays at  $\geq 10^{15}$  eV and of new discoveries in the physics of elementary particles of ultrahigh energies. Unsolved problems of modern physics of ultrahigh energy cosmic rays, which are relevant to the problems of elementary particles physics, are reviewed.

The investigation has been performed at the Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

Назовем энергии космических лучей, недостижимые на современных ускорителях, сверхвысокими. Сегодня наивысшая энергия частицы, получаемая на встречных пучках ускорителя ФНАЛ, равна 900 ГэВ ( $9 \cdot 10^{11}$  эВ). В лабораторной системе координат она эквивалентна энергии налетающего протона на покоящуюся мишень\*:

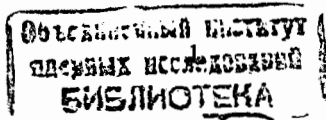
$$E_{\text{лаб}} \approx \frac{2E_c^2}{MC^2} = \frac{2 \cdot 81 \cdot 10^{22} (\text{эВ})^2}{0,94 \cdot 10^9 (\text{эВ})} \approx 1,72 \cdot 10^{15} \text{ эВ} = 1,72 \text{ ПэВ}.$$

После планируемого в 2006 г. запуска ЛНС (ЦЕРН) на энергии встречных пучков протонов 7 ТэВ эквивалентная энергия в лабораторной системе будет равна  $\leq 10^{17}$  эВ. Граница определения сверхвысоких энергий отодвигается примерно на два порядка ( $E_{\text{лаб}} > 10^{17}$  эВ). Вся современная физика элементарных частиц выросла из физики космических лучей. Исследования в космических лучах, проведенные в течение двадцатилетия (1932–1952), сыграли фундаментальную роль в становлении физики элементарных частиц. В 1932 г. К.Андерсон открыл позитрон [1], в 1937 г. С.Неддермейер и К.Андерсон [2] и Дж.Стрит и Е.Стивенсон [3] открыли  $\mu$ -мезон, в 1947 г. Ч.Латгес, Дж.Оккиалини и С.Пауэлл [4] обнаружили распад положительного  $\pi$ -мезона на положительный  $\mu$ -мезон. Распады нейтральной и заряженной  $V$ -частиц были обнаружены также в 1947 г. [5].  $\tau$ -мезон ( $K$ -мезон, распадающийся на 3  $\pi$ -мезона) был обнаружен в 1949 г. [6].  $K_{\mu 3}$ -распад зафиксирован в 1951 г. [7]. Существование нейтральной  $\Lambda$ -частицы было доказано в 1951 г. [8]. Распад каскадного  $\Sigma^-$ -гиперона обнаружен в 1952 г. [9], существование  $\Sigma^+$ -гиперона было доказано в 1953 г. [10, 11]. Эти работы в области космических лучей (и ряд других) послужили основанием для введения квантового числа "странность" и закона сохранения странности в сильных взаимодействиях (Гелл-Манн, Нишиджима, 1953 г.).

На мощных ускорителях в СССР и США в начале 50-х годов научились делать пучки  $\pi$ -мезонов, после чего физика элементарных частиц получила мощный импульс развития благодаря огромной статистике событий, получаемых в столкновениях  $\pi$ -мезонных пучков с мишенями, недостижимой в космических лучах. С тех пор физика элементарных частиц превратилась в

---

\* В физике космических лучей сверхвысоких энергий используются обозначения  $10^{15}$  эВ = 1 ПэВ;  $10^{18}$  эВ = 1 ЭэВ;  $10^{21}$  эВ = 1 ЗэВ.



самостоятельную и дорогостоящую ветвь науки. Правительства ведущих стран мира не жалели на нее денег — после взрывов атомных бомб финансировались практически все проекты в этой области науки.

Теперь, на пороге второго тысячелетия, физики, кажется, подошли к пределу достижимых на ускорителях энергий элементарных частиц ( $10^{15}$  эВ) и вынуждены снова обратить внимание на космические лучи сверхвысоких энергий ( $E > 10^{15}$  эВ). К сожалению, интенсивность космических лучей резко уменьшается с ростом их энергии. При энергии  $E = 10^{15}$  эВ на Землю (на уровне моря) приходит 1 частица/км<sup>2</sup> · с · ср, или 1 частица на 1 м<sup>2</sup> в 1 ср за 10 суток. При энергии  $E = 10^{16}$  эВ на Землю приходит 0,1 частиц/км<sup>2</sup> · с · ср, т.е. в 10 раз меньше. При энергии  $E = 10^{17}$  эВ на Землю приходит 0,01 частиц/км<sup>2</sup> · с · ср, т.е. еще в 10 раз меньше. За последние 35 лет космических наблюдений видели около десятка частиц с энергией  $\sim 10^{20}$  эВ, т.е. примерно один случай на квадратный километр в столетие.

Несколько лет назад были зарегистрированы два случая с наивысшей энергией космических лучей. В мае 1989 г. в Якутске [12] зарегистрирована частица с энергией  $(1,2 - 2,3) \cdot 10^{20}$  эВ. Ее регистрация эквивалентна потоку  $1,9 \cdot 10^{-26}$  км<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> · ср<sup>-1</sup>. В октябре 1991 г. на установке "Fly's Eye" ("Глаз мухи") зарегистрирована частица с энергией  $(3_{-0,54}^{+0,36}) \cdot 10^{20}$  эВ [13]. Ее регистрация эквивалентна потоку  $7,4 \cdot 10^{-34}$  км<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> · ср<sup>-1</sup>. Наиболее примечательной особенностью этих двух случаев является то, что частицы пришли примерно с одного и того же небесного направления. Анализ показывает, что рассматриваемые два случая сверхвысоких энергий связаны наиболее вероятно с первичным протоном, нейтроном или нейтрино, т.е. с фермионом [14].

Космические частицы с наивысшей энергией с теоретической точки зрения должны были бы иметь порог по энергии, равный  $5 \cdot 10^{19}$  эВ. Как известно, в 1965 г. было обнаружено реликтовое излучение, равномерно распределенное в космическом пространстве и по интенсивности соответствующее тепловому излучению абсолютно черного тела при температуре  $\sim 2,7$  К. Через год Грейзен (США), Зацепин и Кузьмин (СССР) указали на то, что этот вездесущий фон реликтового излучения может налагать сильное ограничение на верхний предел высокоэнергетического спектра космических лучей.

Протон высокой энергии, прокладывая путь в космическом пространстве, будет сталкиваться с фотонами реликтового излучения и рождать  $\pi$ -мезоны (или  $e^+e^-$ -пары). Порог рождения  $\pi$ -мезонов по энергии равен  $5 \cdot 10^{19}$  эВ. Выше энергии  $5 \cdot 10^{19}$  эВ протон, проходящий через фон реликтового излучения, будет терять такую энергию на рождение  $\pi$ -мезонов (и  $e^+e^-$ -пар), что он не сможет поддерживать свою энергию выше пороговой на расстоянии нескольких десятков мегапарсек. Единственными вероятными астрофизическими источниками протонов с ультравысокими энергиями могут быть

радиоквезары и активные галактические ядра, но они находятся на расстояниях далее 100 мегапарсек ( $1 \text{ Мпк} \sim 3 \cdot 10^6$  световых лет). Обрыв спектра космических лучей, равный  $\approx 5 \cdot 10^{19}$  эВ, в области сверхвысоких энергий называется обрезанием Грейзена–Зацепина–Кузьмина (GZK-cut off). Два случая вышеупомянутых космических частиц с энергиями  $> 10^{20}$  эВ выходят за пределы GZK-модели. Однако около года назад были опубликованы дополнительные результаты наблюдения частиц, и эту ситуацию мы будем обсуждать ниже еще раз.

В области энергий космических лучей  $> 10^{15}$  эВ с помощью больших экспериментальных установок физики надеются получить достаточно большую статистику или наблюдать экзотические события, представляющие интерес и значимость для теоретических обобщений. Действительно, на планируемых установках с площадью, превышающей 1000 км<sup>2</sup>, будет регистрироваться  $\sim 10^7$  частиц в сутки с энергией  $10^{15}$  эВ,  $\sim 10^5$  частиц в сутки с энергией  $10^{17}$  эВ.

"...Планируемый в настоящее время Оже-проект (AIP)...грандиозен по своим масштабам. В коллаборации "Проект Пьера Оже" будут принимать участие ученые из 40 институтов 19 стран... Полный проект Оже — это 3200 черенковских счетчиков, расположенных на площади 6000 км<sup>2</sup>, каждый из которых содержит 12 т воды. В лучшем случае будет регистрироваться в год около 30 частиц с энергией выше  $10^{20}$  эВ. Полная стоимость проекта равна 100 млн. долларов"\*.

Таким образом, космические лучи сверхвысоких энергий остаются сегодня весьма притягательной областью исследований для физики элементарных частиц (особенно если иметь в виду, что мир элементарных частиц был открыт в период до 1953 г.).

Исследованиям в области космических лучей посвящается большое число международных конференций и симпозиумов. Так, начиная с 1968 г. проведено 14 европейских симпозиумов: Берн и Лодзь — 1968 г.; Амстердам и Лидс — 1970 г.; Геттинген и Париж — 1972 г.; Фраскати и Лодзь — 1974 г.; Лидс — 1976 г.; Киль — 1978 г.; Ленинград — 1980 г.; Рим — 1982 г.; Кошице — 1984 г.; Бордо — 1986 г.; Балатон — 1988 г.; Ноттингем — 1990, 1992 гг.; Балатонфюред — 1994 г. Начиная с 1980 г. проведено 8 международных симпозиумов: Находка — 1980 г., Рио-де-Жанейро — 1982 г., Токио — 1984 г., Пекин — 1986 г., Лодзь — 1988 г., Тарбе — 1990 г., Мичиган — 1992 г., Токио — 1994 г. В частности, последний токийский симпозиум — VIII Международный симпозиум по взаимодействиям космиче-

\*Зрелов В.П., Исаев П.С. "У ОИЯИ есть возможность включиться в исследования космических лучей сверхвысоких энергий" — См. "Дубна. Наука. Содружество. Прогресс", 19 ноября 1997 г., № 45 (3384).

ских лучей очень высоких энергий (24—30 июня 1994 г.) — был посвящен, помимо теоретических вопросов, экспериментальным исследованиям адронных взаимодействий космических лучей с энергиями, превышающими ускорительные (т.е.  $> 10^{15}$  эВ), проведенным с помощью эмульсионных камер на следующих высотах:

Камбала (Тибет)	—	5400 м,
Чакалтая (Боливия)	—	5200 м,
Памир (Таджикистан)	—	4300 м,
Фуджи (Япония)	—	3700 м,
Тянь-Шань (Казахстан)	—	3400 м.

Каждые два года (по нечетным годам) проводятся международные конференции по космическим лучам. В 1995 г. с 28 августа по 8 сентября в Риме проходила 24-я международная конференция. В ней участвовало около 800 человек и было представлено примерно 1100 докладов. 25-я Международная конференция по космическим лучам должна была состояться в Южной Африке в 1997 г. О ней у меня нет сведений.

Тематика симпозиумов и конференций весьма широка, а в части, касающейся проблем физики элементарных частиц, максимально приближена к проверке стандартной модели в области сверхвысоких энергий, как мы увидим из последующего изложения.

Из всего многообразия проблем остановимся на следующих:

- 1) энергетический спектр космических лучей и их химический (массовый) состав;
- 2) адронная компонента в широких атмосферных ливнях;
- 3) новые характеристики взаимодействия адронов сверхвысоких энергий (выстроенность; кентавры и мини-кентавры; нарушение конфайнмента;  $\gamma$ -семейства с двойными стволами и др.);
- 4) проблема "колена" в космических лучах;
- 5) некоторые сведения о сверхвысоких энергиях космических лучей ( $> 10^{20}$  эВ);
- 6) "ливни"  $\gamma$ -лучей ( $\gamma$ -семейства).

Это, конечно, далеко не полный перечень проблем физики космических лучей.

## 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ИХ ХИМИЧЕСКИЙ (МАССОВЫЙ) СОСТАВ

Интегральный спектр (интенсивность) всех космических лучей в интервале энергий  $10^{10}$  эВ  $< E < 3 \cdot 10^{15}$  эВ на поверхности Земли неплохо описывается выражением [15, 16]:

$$I(> E) = \left[ \frac{1}{E(\text{ГэВ})} \right]^{1,7} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}} \quad (1)$$

Для энергий  $E > 3 \cdot 10^{15}$  эВ спектр имеет форму

$$I(> E) = \left[ \frac{1}{E(\text{ГэВ})} \right]^2 \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}} \quad (2)$$

Спектр (2) справедлив до энергий  $\sim 3 \cdot 10^{17} - 10^{18}$  эВ. Мы видим, что при энергии  $3 \cdot 10^{15}$  эВ наблюдается излом ("колена") спектра: показатель степени меняется скачком от значения 1,7 до значения 2; его мы будем подробно обсуждать ниже. "Знание состава первичных космических лучей в области энергий  $10^{14} - 10^{15}$  эВ, знание полного сечения неупругого взаимодействия адронов  $\sigma_{\text{неупр}}$  и знание коэффициента неупругости  $K_{\text{неупр}}$  при этих энергиях позволяет создать количественную теорию прохождения через вещество частиц сверхвысоких энергий, базирующуюся на твердом экспериментальном фундаменте..." [16, с.286—287].

Японо-американский совместный эмульсионный эксперимент (JACEE) (13 полетов баллонов) был проведен для изучения спектра первичных протонов в области энергий более  $6 \cdot 10^{12}$  эВ, спектра гелия для энергий более  $2 \cdot 10^{12}$  эВ и для ядер с  $Z > 2$  в интервале энергий от  $0,5 \cdot 10^{12}$  эВ/нуклон до  $93 \cdot 10^{14}$  эВ/нуклон [17]. Оказалось, что протонный спектр имеет некоторый излом в районе  $(4 - 5) \cdot 10^{13}$  эВ. Максимально правдоподобный протонный спектр имеет вид

$$\frac{dN}{dE} = (7,49 \pm 0,20) \cdot 10^{-2} \cdot E^{-2,64 \pm 0,12} \frac{1}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ТэВ}} (E \leq 4 \cdot 10^{13} \text{ эВ}),$$

$$\frac{dN}{dE} = (6,17 \pm 0,80) \cdot 10^{-2} \cdot E^{-3,22 \pm 0,28} \frac{1}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ТэВ}} (E > 4 \cdot 10^{13} \text{ эВ}).$$

Гелиевый спектр описывается одной степенной функцией

$$\frac{dN}{dE} = (7,76 \pm 1,43) \cdot 10^{-3} \cdot E^{-2,67 \pm 0,08} \frac{1}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ТэВ/нуклон}}.$$

Меняется отношение числа протонов к числу ядер гелия с увеличением энергии:

Энергия, $10^{12}$ эВ/нуклон	10	23	32	45	75
Отношение $\text{He}/p$	$0,083 \pm 0,025$	$0,107 \pm 0,04$	$0,065 \pm 0,026$	$0,089 \pm 0,048$	$0,154 \pm 0,070$

Спектр всех ядер с энергиями более  $5,10^{13}$  эВ/ядро с зарядом  $Z > 6$  значительно более пологий по сравнению с протонным. Относительный состав протонов, гелия, групп элементов (C—O), (Ne—S) и группы ядер с  $Z \geq 17$  при энергии  $3,7 \cdot 10^{14}$  эВ выражается соответственно цифрами:  $14 \pm 9\%$ ,  $23 \pm 10\%$ ,  $28 \pm 11\%$ ,  $13 \pm 7\%$ ,  $24 \pm 10\%$ . При энергии  $4,5 \cdot 10^{13}$  эВ/нуклон

тот же состав выражается следующими цифрами:  $35 \pm 8\%$ ,  $30 \pm 6\%$ ,  $16 \pm 4\%$ ,  $9 \pm 1\%$ ,  $10 \pm 1\%$ , т.е. относительный состав тяжелой компоненты с уменьшением энергии уменьшается. В расчетах часто используют "нормальный" состав космических лучей (см. табл.1).

Таблица 1

$E$ , эВ	$p$ , (%)	He (%)	CNO (%)	Тяжелые (%)	Очень тяжелые (%)
$10^{10} - 10^{12}$	90	8	0,6	$\leftarrow 0,08$	$\rightarrow [17a]$
$10^{15}$	42	17	14	14	13
$10^{16}$	42	13	14	15	16

При энергиях  $E > 10^{18}$  эВ спектр имеет сложную форму и не может быть описан степенным законом с одним показателем степени. По данным Института космофизических исследований и аэронавтики (Якутск) [18] из наблюдений по развитию широких атмосферных ливней, этот спектр имеет форму

$$\frac{dN}{dE}(E) = K \cdot E^{-\lambda} dE, \quad (3)$$

где индекс  $\lambda$  принимает значения:

в области $\Delta E_1 = 5 \cdot 10^{16} - 10^{18}$ эВ	$2,98 \pm 0,06$ ,
в области $\Delta E_2 = 10^{18} - 7 \cdot 10^{18}$ эВ	$3,25 \pm 0,08$ ,
в области $\Delta E_3 = 7 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{19}$ эВ	$2,65 \pm 0,10$ ,
в области $\Delta E_4 = 2 \cdot 10^{19} - 10^{20}$ эВ	$3,50 \pm 0,18$ .

Чтобы объяснить такое поведение спектра, нужны новые модели развития широких атмосферных ливней, включающие как проблему источников космических лучей, так и проблему взаимодействия элементарных частиц в области сверхвысоких энергий.

Энергетический спектр космических лучей с энергий  $E > 10^{18,5}$  эВ измерялся на установке AGASA (Akeno Giant Air Shower Array). За период с февраля 1990 г. по ноябрь 1997 г. [19] было наблюде-

3847 случаев с  $E > 10^{18,5}$  эВ;

461 случай с  $E > 10^{19}$  эВ;

6 случаев с  $E > 10^{20}$  эВ.

На рис.1 спектр  $dJ/dE$  умножен на  $E^3$ , чтобы подчеркнуть детали быстро спадающего спектра. Спектр описывается формулой

$$dJ/dE = \begin{cases} K \cdot \left(\frac{E}{E_a}\right)^{-\gamma_0} & 10^{18,5} \text{ эВ} \leq E < e_a \\ K \cdot \left(\frac{E}{E_a}\right)^{-\gamma_2} & E_a < E, \end{cases} \quad (4)$$

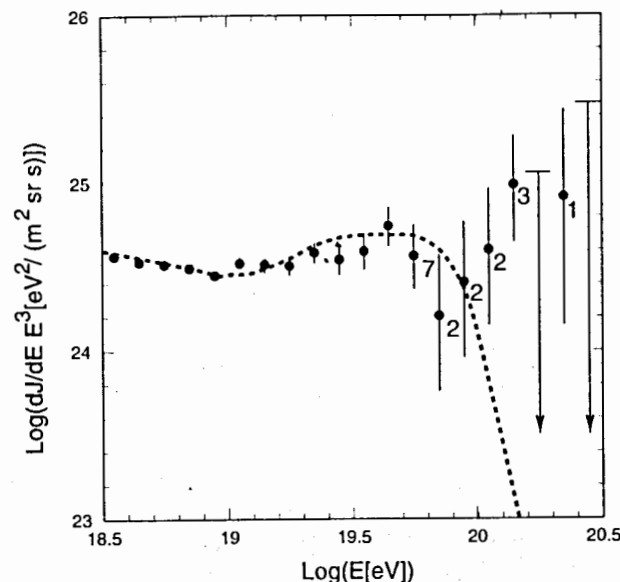


Рис. 1. Энергетический спектр, наблюдаемый на установке AGASA [19]. Ось ординат умножена на  $E^3$ . Ошибки, обозначенные черточками, представляют пуассоновский верхний и нижний пределы на уровне 62%, а стрелками указан верхний предел — 90% С.Л. Пунктирная кривая представляет спектр, ожидаемый от внегалактических источников, равномерно распределенных во Вселенной (аналог GZK-модели, см. ссылку [11] из работы [19])

где  $\gamma_0$  и  $\gamma_2$  — показатели степени соответственно ниже и выше некоторой условной энергии  $E_a$ , характерной для данного интервала энергий.

Параметр  $\gamma_0$  определялся из условия согласия со спектром при  $E < 10^{18,5}$  эВ,  $\gamma_0 = 3,16$ .

Определено наиболее вероятное значение параметров: при  $E_a = 10^{19,01}$  величина  $\gamma_2 = 2,87_{-0,33}^{+0,25}$ . Эти результаты согласуются с ранее опубликованными той же группой AGASA [20].

Как видно на рис.1, наблюдаемый спектр выходит за границу GZK-обрезания. Если предположить, что спектр космических лучей должен соответствовать пунктирной линии, изображенной на рис.1, то ожидаемое число случаев с энергией  $10^{20}$  эВ должно быть менее одного. Однако реальный энергетический спектр (6 случаев с  $E > 10^{20}$  эВ) расширяется за пределы GZK-обрезания, и, следовательно, можно предположить, что источники наиболее энергетических космических частиц лежат за пределами нашей Галактики на расстоянии десятков мегапарсек от нее.

На рис.2 показаны небесные направления, с которых пришли 6 космических частиц сверхвысоких энергий ( $E > 10^{20}$  эВ). Выше энергии  $4 \cdot 10^{19}$  эВ

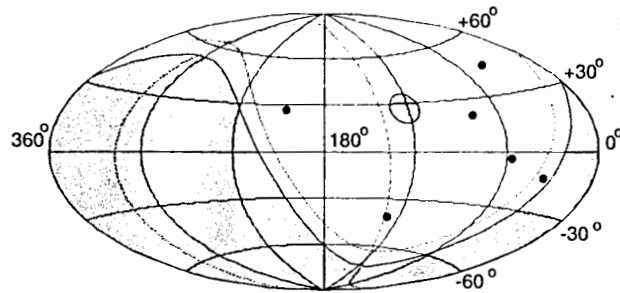


Рис. 2. Небесные направления в галактической системе координат для 6 случаев с  $E \geq 10^{20}$  эВ. Заштрихованная площадь указывает ненаблюдаемую небесную область (обрезание по зенитному углу  $\leq 45^\circ$ ). Указана экваториальная и супергалактическая плоскости

точность определения небесных координат составляла  $1,6^\circ$ . На направлениях, с которых пришли 6 частиц, не видно возможных внегалактических источников космических лучей высоких энергий, и это одна из наиболее возбуждающих загадок происхождения космических лучей.

Сейчас близок к завершению проект "High Resolution Fey's Eye Detector" (HiRes), возглавляемый П.Сокольским (Университет Юта, США). Если статистика данных группы AGASA верна, то группа HiRes через год после начала наблюдения будет иметь около 16 случаев космических частиц с  $E > 10^{20}$  эВ. Тогда спектр высокоэнергетических частиц ( $E > 10^{20}$  эВ) будет известен с еще большей достоверностью.

Но уже сейчас теоретики, не ожидая увеличения статистики, ищут сценарии "новой физики" для объяснения происхождения космических лучей с  $E > 10^{20}$  эВ. Так, Т.Уилер допускает гипотезу\*, что нейтрино с массой  $\sim 1$  эВ образует компактную область темной материи в пределах  $\sim 50$  Мпк от нашей Галактики. Высокоэнергетические нейтрино, рожденные в далеких активных галактических ядрах, сталкиваясь с гало компактной области темной материи, могли бы родить протоны с  $E \geq 10^{20}$  эВ. Сечение аннигиляции  $\nu\bar{\nu} \rightarrow p\bar{p}$  мало, но, как предполагает Уилер, в области масс  $Z^0$ -бозона оно будет испытывать большое резонансное увеличение. По расчетам автора, резонансная нейтринная аннигиляция может воспроизвести достаточное количество протонов и фотонов, чтобы обеспечить нужный поток космических лучей выше GZK-порога. Различие в количестве ливней, образованных протонами и фотонами, может обеспечить достаточно строгую проверку гипотезы Уилера.

\*См. Physics Today, October 1998, p.19-21.

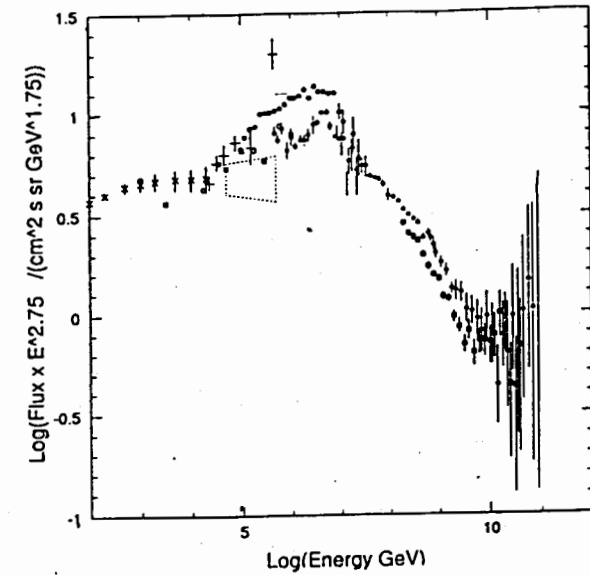


Рис. 3. Дифференциальный энергетический спектр космических лучей [22]

Две особенности спектра космических лучей в интервале  $10^{15}$  эВ  $< E < 10^{20}$  эВ привлекают особое внимание:

- а) "колени" — в области энергий  $3 \cdot 10^{15}$  эВ;
- б) "лодыжка" — в области энергий  $\sim 10^{19}$  эВ.

Колени в области энергий  $3 \cdot 10^{15}$  эВ было обнаружено Куликовым и Христиансенем (МГУ) около 40 лет назад [21], лодыжка обнаружена около трех лет назад [18, 20]. В "Заключении" авторы статьи [20] писали: "...выполаживание спектра вокруг энергии  $10^{19}$  эВ (ankle — "лодыжка") наблюдается со значением  $2,9\sigma$  ...".

В этих двух энергетических областях особенно тщательно проводится измерение спектра космических частиц и их химического (массового) состава. Оба явления ("колени" и "лодыжка") выглядят довольно впечатляюще на рис.3, на котором изображен спектр первичных космических лучей, представленный группой Акено (около 130 км западнее Токио).

Быстрота измерения кривой спектра вблизи колена определяется второй производной. Конечно, форма колена будет проверяться и уточняться и далее. Но уже сейчас очевидно, что любая модель спектра космических лучей должна удовлетворять поведению второй производной. В докладе А.Д.Ерлыкина [22] приведен рисунок, демонстрирующий индекс дифференциального наклона электронной, мюонной и адронной компонент спектра, полученного из измерений в широких атмосферных ливнях (ШАЛ), — рис.4.



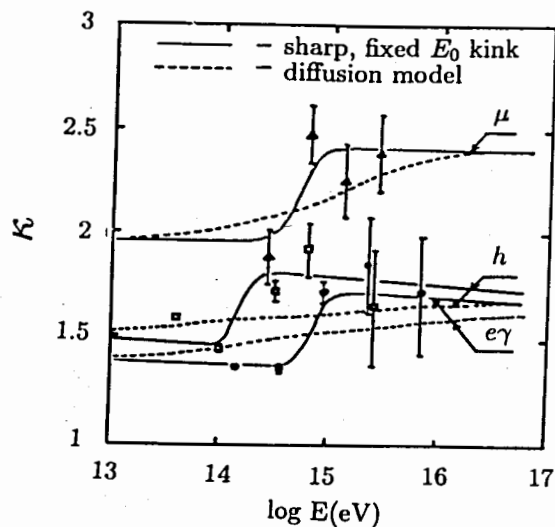


Рис. 4. Дифференциальный индекс наклона электромагнитного ( $e\gamma$ ), мюонного ( $\mu$ ) и адронного спектров в широких атмосферных ливнях [22]

Источники возникновения колена дискутируются до сих пор, и во всех моделях видят следующие возможные причины его возникновения [22]:

- а) источники космических лучей;
- б) механизм ускорения космических лучей;
- в) распространение космических лучей в межзвездном пространстве;
- г) изменение характеристик взаимодействия космических лучей с ростом их энергии.

Соответственно, есть несколько моделей для объяснения возникновения колена:

- а) диффузионная модель [21, 23, 24];
- б) модель компактного источника [25];
- в) трехсторонняя (three sites) модель [26];
- г) модели взаимодействия космических лучей, в частности, модель С.И.Никольского [27], которую мы сейчас обсудим относительно более подробно.

...Проблемы класса моделей типа [27] состоят в следующем: если энергетический спектр первичных космических лучей имеет постоянный наклон без какого-либо колена, но в атмосфере наблюдается неожиданное уменьшение интенсивности широких атмосферных ливней (ШАЛ), то это можно объяснить недостатком энергии, переданной ШАЛ, и необходимостью восстановления постоянного наклона спектра, вызывающего ШАЛ. Защитники гипотезы обычно прячут "недостаток" энергии в некоторые ненаблюдаемые частицы. Чтобы сделать эту трудность менее очевидной, С.И.Никольский заменяет колено в первичном энергетическом спектре модельным изменением

массового состава спектра подобно диффузионной модели. Модель, таким образом, предполагает постепенный переход массового (химического) состава космических лучей вперед к более тяжелым элементам.

Эта модель демонстрирует связь химического состава первичной компоненты КЛ с общей проблемой источников КЛ, что обеспечивает будущий интерес к изучению этих вопросов... " [23].

Есть работы [29,30], в которых утверждается, что колена не существует, и объясняют это явление "большой ролью нестабильных частиц", которые дают большой вклад в число ливней. Дифференциальный спектр, построенный автором работы [30] (по измерению черенковского излучения), дает наклон  $\gamma = 2,660 \pm 0,097$  в области  $E \sim (3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16})$  эВ. Это означает, что колена нет. Однако в конце работы автор добавляет, что для твердого доказательства отсутствия "колена" "необходимо существенное увеличение статистики".

Если относительно формы энергетического спектра первичной компоненты космических лучей есть приблизительное согласие мировых данных, то относительно химического ее состава такого согласия пока не наблюдается.

Существуют некоторые закономерности развития широких атмосферных ливней, которые дают возможность определять массовый (химический) состав первичной компоненты космических лучей.

Ливни, вызванные ядрами той же энергии, что и отдельно взятые протоны, развиваются и затухают быстрее, чем вызванные протонами, поскольку имеют меньшую энергию на нуклон. Нуклоны более низкой энергии порождают пионы и каоны также более низкой энергии, распады нестабильных мезонов ведут к низкоэнергетическим компонентам мюонов, электронов и фотонов, атмосферный ливень получается менее широким и затухает быстрее, т.е. средняя глубина максимума ливней, форма их распределения зависят от химического состава первичной компоненты космических лучей (и, естественно, от теоретической модели развития ливня!).

Химический состав космических лучей в интервале энергий  $10^{10} - 10^{12}$  эВ измерен прямыми методами и хорошо известен [31]: водород — 90%, гелий — 8%, средние ядра (C, Np) — 0,6%, тяжелые элементы — 0,08% (см. табл. 1).

По наблюдениям, выполненным космическими группами МГУ и Баксан, спектр масс первичных космических лучей с ростом их энергии (в области  $10^{15} - 10^{16}$  эВ) утяжеляется. Этот вывод подтверждается наблюдениями других групп.

В области энергий  $\geq 10^{16}$  эВ важные результаты по определению массового состава космических лучей были получены на установке "Глаз мухи" (Fly's Eye) и установках, расположенных на Акено (Япония) и Тянь-Шане.

Так, группа "Глаз мухи" утверждает, что средняя глубина максимума ливня и форма его распределения согласуются с моделью, в которой отно-



сительно тяжелая составляющая космических лучей при энергии  $\sim 10^{17}$  эВ начинает уменьшаться, а для протонов при энергии  $\sim 10^{19}$  эВ снова достигает больших значений —  $\sim 70\%$ .

Японская группа AGASA (установка на уровне моря, площадь установки  $\approx 100 \text{ км}^2$ ) и Тянь-шаньская группа не столь однозначно утверждают о таком изменении массового состава первичной компоненты.

Измерения, выполненные на протонном спутнике [32], показали, что протонная интенсивность быстро спадает с ростом энергии, а полная интенсивность лучей спадает медленнее, что указывает на "утяжеление" первичной компоненты космических лучей.

Авторы работы [33] дают следующие цифры:

Энергии (на нуклон), эВ	Протоны, %	Гелий, %	Группа CNO, %	Группа тяжелых ядер, %
$2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15}$	$53 \pm 28$	$24 \pm 11$	$5 \pm 4$	$15 \pm 10$
$2 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16}$	$27 \pm 10$	$45 \pm 15$	$8 \pm 5$	$24 \pm 11$

Измерения массового состава первичной компоненты в области энергий от  $10^{13}$  до  $10^{16}$  эВ проводились многими группами [34—39]. Результаты всех измерений указывают на то, что имеет место переход от доминантности легкой компоненты к доминантности тяжелой компоненты, например, протоны и железо соотносятся как  $15\% - 40\%$  и  $20\% - 40\%$  соответственно между  $10^{15}$  и  $10^{16}$  эВ/ядро. Относительно заметный разброс данных в разных работах указывает на то, что ясности в химическом составе первичной компоненты в районе "колена" и выше нет до сих пор.

В связи с проблемой "колена" и химическим составом спектра вблизи "колена" в докладах С.И.Никольского [40, 41] обсуждалась проблема нарушения конфайнмента при  $E \geq 10^{16}$  эВ. Исторически, около 40 лет назад, было обнаружено, что число электронов в ШАЛ имеет скачок при энергиях первичных частиц в области  $10^{15} - 10^{16}$  эВ [21]. Тогда же для объяснения результата было выдвинуто два предположения:

- 1) либо происходит изменение спектра первичного космического излучения с ростом энергии частиц;
- 2) либо происходит нарушение в природе неупругих взаимодействий космических частиц с атомными ядрами атмосферы Земли.

Первое могло происходить из-за интенсификации проникновения внегалактического космического излучения. Второе предположение казалось невероятным в те далекие годы из-за отсутствия каких-либо указаний. Поэтому анализировалось в основном первое предположение. Но оно не привело к решению проблемы "колена".

Эксперимент "Адрон" (на Тянь-Шане, 3300 м) имел целью исследование второго предположения. При анализе электронно-фотонной компоненты

в ШАЛ в связи с изменением первичной компоненты космических лучей в области энергий  $10^{16} \geq E > 2 \cdot 10^{16}$  эВ следовало бы предположить, что массовый состав первичной компоненты скачком меняется от значений  $A \geq 4$  до  $A \geq 20$  [42]. Поскольку такое предположение невероятно, Никольский пытается объяснить уменьшение относительного числа электронов и  $\gamma$ -квантов в ШАЛ за счет изменения характера неупругого нуклон-нуклонного взаимодействия в области  $E \geq 2 \cdot 10^{16}$  эВ. Он предположил, что происходит нарушение конфайнмента кварков-спектаторов, их освобождение из области конфайнмента ведет к рождению тяжелых бозонов с вероятностью  $(1 - K_{\text{неупр}})$ , где  $K_{\text{неупр}}$  — коэффициент неупругости. Рождение бозонов с массой  $(4 - 5) \cdot 10^{14}$  эВ/ $c^2$  и их последующий распад на  $W$ -,  $Z$ -бозоны и адроны увеличивает множественность вторичных адронов после первого взаимодействия частиц с энергией более  $2 \cdot 10^{16}$  эВ и ведет к рождению адронов и мюонов с большим перпендикулярным импульсом, чем в обычных процессах множественного рождения, генерируемых протонами с той же энергией. В этом случае распределение энергии вторичных частиц в адрон-электронном ливне будет соответствовать характеристикам, наблюдаемым в эксперименте "Адрон" [41].

Итак, необходимо, по мнению Никольского, исследовать структуру "стволов" ШАЛ с  $E \geq 2 \cdot 10^{16}$  эВ с помощью  $X$ -лучевых эмульсионных камер на расстоянии от центра  $\gamma$ -семейств более 30 см. Эта проблема будет изучаться в проектах АНИ [43] и "Бозон", но их реализация задерживается.

Тем не менее именно изучение стволов ШАЛ предусматривается в предлагаемом В.П.Зреловым проекте создания в Дубне, в ОИЯИ, своеобразной малозатратной "черенковской обсерватории ливневой космического излучения сверхвысоких энергий (ЧОЛКИ СВЭ)", которая позволила бы вести непрерывные систематические и длительные (годами) исследования этой характеристики ливней, а также частоты их появления на уровне моря, их энергии, направленности, пространственной структуры ("ствольность", бинокулярность, выстроенность) и регистрировать всякого рода экзотические явления. Правда, энергии  $\geq 2 \cdot 10^{16}$  эВ будут находиться на пределе возможностей набора хорошей статистики. Таким образом, проблема изучения энергетического спектра космических лучей является не только проблемой астрофизической, но и проблемой изучения взаимодействия элементарных частиц сверхвысоких энергий. Другая проблема — это связь химического состава космических лучей с проблемой источников космических лучей. Исследования, которые могли бы проводиться в ОИЯИ в рамках проекта ЧОЛКИ СВЭ в области энергий  $10^{15} - 10^{17}$  эВ, и в этой части приобретают актуальное значение.

В сентябре 1997 г. в журнале "CERN Courier" появилась заметка "Космические лучи" [44], в которой сообщалось, что "...Толя Ерлыкин (ФИАН) и Арнольд Вольфендайл (Дарем, Великобритания) обнаружили вблизи "ко-

лена” два слегка увеличенных приращения в двух ядерных интервалах, соответствующих кислороду и железу. Эти ядра являются характеристическими ”ароматами кухни” суперновых звезд... Рассматривая суперновые звезды как источник космических лучей высоких энергий и ускорение заряженных частиц как разлет остатков суперновой звезды в процессе ее сжатия, Ерлыкин и Вольфендайл предположили, что более тщательный анализ химической компоненты космических лучей в районе колена даст более полную характеристику ”окружения” суперновой звезды, частицы которой разлетаются в межзвездном пространстве как отголоски мощных ударных волн...”.

К сожалению, идентификация расположения суперновых звезд на звездном небе исключительно сложна, поскольку космические лучи от суперновых звезд распространяются в сплетении спиральных межгалактических магнитных полей и вынуждены следовать весьма извилистым путем.

Итак, энергетический спектр космических лучей и их химический состав лежат в основе различных моделей источников космических лучей, механизмов ускорения космических лучей и их распространения в межзвездном пространстве.

Около 30 лет назад [45, 46] предполагалось, что космические лучи ускоряются в некоторых звездах как естественных ускорителях. Ферми [47] и некоторые другие авторы [48, 49] предположили, что космические лучи ускоряются ударными волнами во взрывах сверхновых звезд. Но в таких моделях можно получать энергии  $\leq 10^{15}$  эВ, а ускорение до энергий  $\leq 10^{20}$  эВ остается непонятным.

Ускорение космических лучей в процессе эволюции суперновых звезд (остатками суперновой — supernova remnants (SNR)) рассматривалось во многих работах (список некоторых работ, в частности, можно найти в докладе [50]). Например, авторы работы [50] решали газодинамическое уравнение диффузионного переноса для функции распределения космических лучей  $f(r, p, t)$  в виде

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \nabla(k\nabla f) - (\vec{w}\nabla f) + \frac{\nabla\vec{w}}{3} \cdot p \cdot \frac{\partial f}{\partial t} + Q,$$

где  $k$  — коэффициент диффузии космических лучей,  $w$  — скорость межзвездной среды,  $Q$  — функция источника, инжектирующего частицы в процесс ускорения ударными волнами,  $p$  — импульс инжектируемых частиц,  $r$  — положение частицы. Уравнение решалось численными методами при определенных начальных и граничных условиях.

Исследование кинетики ускорения космических лучей в SNR воспроизводит новые важные особенности процесса ускорения. В частности, было показано, что ускорение частиц сферическими ударными волнами сильно отличается от предсказаний ускорения плоскими волнами. Сильные ударные

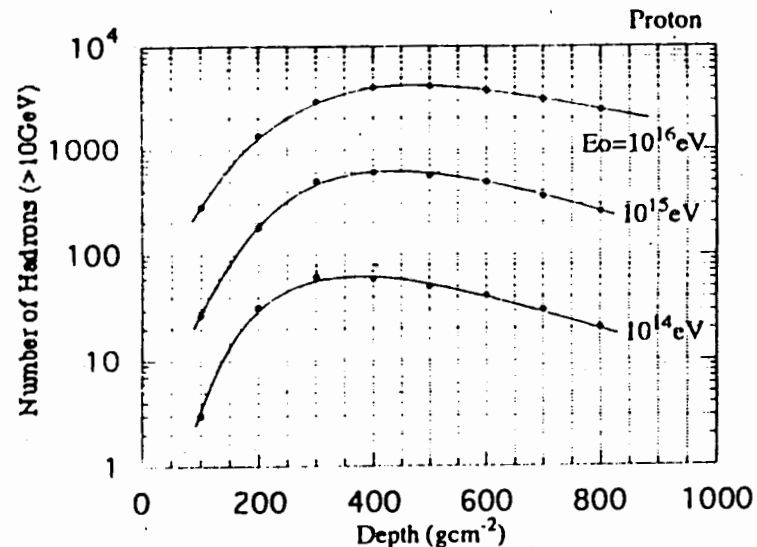


Рис. 5. Изменение числа адронов с  $E > 10$  ГэВ в ливнях, вызванных первичными потоками с энергиями  $10^{14}$ ,  $10^{15}$ ,  $10^{16}$  эВ при прохождении слоя атмосферы, выраженного в  $г \cdot см^2$

волны SNR вызывают очень жесткий спектр космических лучей, так что космические лучи с очень высокой энергией играют превалирующую роль.

Наблюдение потока  $\gamma$ -лучей высоких энергий и мягких X-лучей от SNR и более точные измерения химического состава космических лучей, излученных SNR, особенно в области  $10^{14} - 10^{16}$  эВ, помогут воссоздать более полную картину возникновения, ускорения и распространения космических лучей в межзвездном пространстве. Развитие методики в процессе наблюдений покажет, какой вклад в измерение химического состава космических лучей сможет внести проект ЧОЛКИ СВЭ, ориентированный на наблюдение космических лучей в области энергий  $10^{15} - 10^{17}$  эВ.

Проблема ”колена” исследовалась по разным параметрам: степень развития ливней, рожденных частицами с энергией в области колена, потоки энергий разных компонент, мюонная компонента ливней и т.д. Поскольку до сих пор считаются не вполне установленными первичный спектр космических лучей и характер взаимодействия в области энергий  $10^{15} - 10^{16}$  эВ, а также в силу флуктуации явлений, технических погрешностей экспериментов, на многие вопросы, связанные с проблемой ”колена”, пока нет однозначных ответов.

В этом смысле наблюдения в области энергий ”колена” на больших высотах дают более реальные ответы на часть вопросов. В качестве примера приведем результаты недавно выполненных на высоте Чакалтая (5200 м) из-

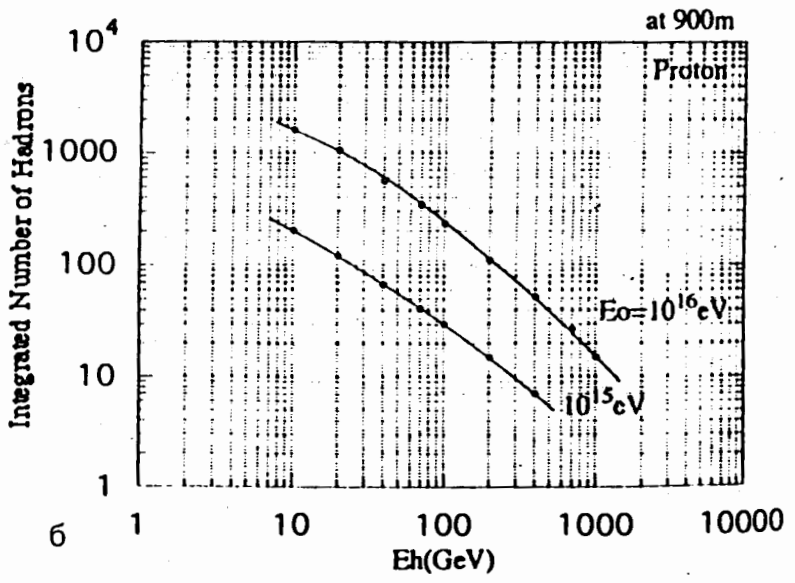
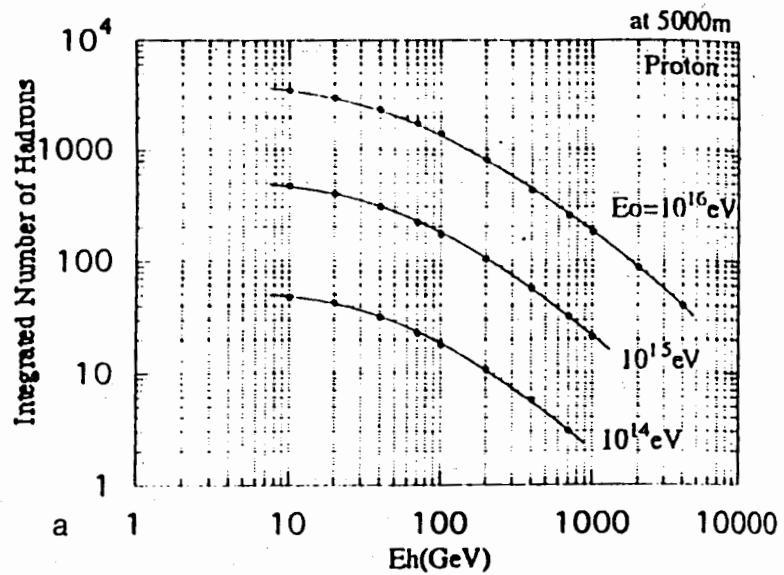


Рис. 6. Энергетический спектр адронов на высоте 5000 м (а), на высоте 900 м (б)

мерений адронной компоненты широких атмосферных ливней [51]. Число адронов с  $E > 10$  ГэВ в ливнях (при условии, что они возникли от соударения первичных протонов) показано на рис.5. Развитие адронной компоненты идет намного быстрее, чем электронной. Максимум развития ливня обнаружен в интервале прохождения слоя атмосферы 300–500 г/см<sup>2</sup>.

Рис.6,а иллюстрирует энергетический спектр адронов на высоте 5200 м по вертикали развития ливня для трех различных энергий первичных космических лучей.

На рис.6,б показан тот же спектр, но на уровне 900 м. Преимущества наблюдения адронного спектра на большой (5200 м) высоте очевидны. Естественно, что результаты наблюдений используются при построении различных моделей взаимодействия и развития ливней в атмосфере.

## 2. НАИВЫСШИЕ ЭНЕРГИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Мы уже обсуждали два первых случая космических лучей с наивысшей энергией. Их характеристики приведены в табл.2.

Таблица 2

Случай	Энергия, $10^{20}$ эВ	Поток, $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr})^{-1}$	$\alpha^*$	$\delta^*$
Якутск (май 1989)	1,2 — 2,3	$1,9 \cdot 10^{-36}$	$75^\circ \pm 10^\circ$	$44^\circ$
Fly's Eye (октябрь 1991)	$3,0^{+0,36}_{-0,54}$	$7,4 \cdot 10^{-41}$	$86^\circ \pm 9^\circ$	$45^\circ \pm 4^\circ$

\* $\alpha, \delta$  — направления в небесных координатах.

Энергия  $\sim 2 \cdot 10^{20}$  эВ эквивалентна энергии в системе центра масс порядка 700 ТэВ, примерно в 100 раз больше той, которую ожидают получить на LHC. Предполагается, что источники этих случаев внегалактические.

Развитие ливня в случае "Fly's Eye" и плотность мюонов в якутском случае поддерживают заключение, что первичными частицами, вызвавшими эти события, могут быть либо протоны, либо ядра, либо нейтрино, но не фотоны. В работе [14] проведен расчет расстояния, которое может пройти частица или ядро в межзвездном пространстве, заполненном микроволновым электромагнитным полем и радиофоном при температуре около 3 К, в зависимости от ее энергии (см. рис.7).

Космический протон в одном акте взаимодействия теряет в среднем 20% своей энергии. Чтобы дойти до Земли с наблюдаемой энергией, он должен был бы иметь энергию, скажем,  $\sim 3 \cdot 10^{22}$  эВ и пройти расстояние в 100 Мпк

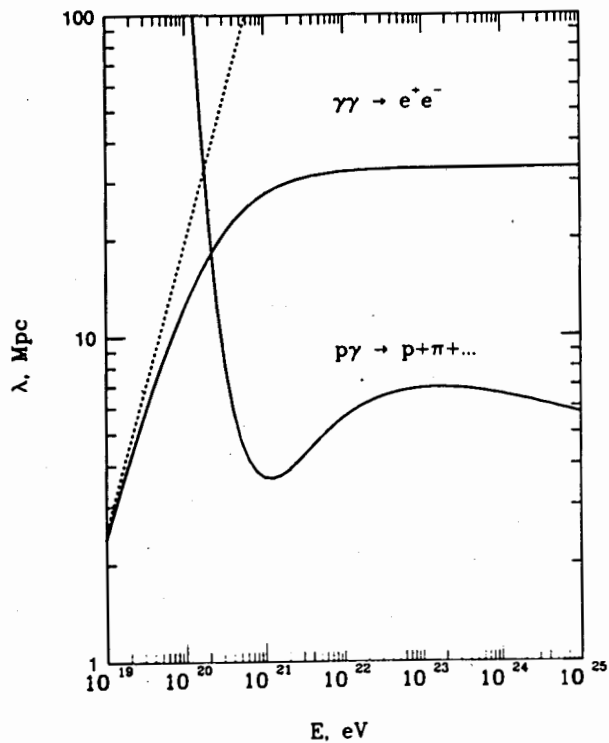


Рис. 7. Средний свободный пробег (в мегапарсеках) для взаимодействующих протонов и  $\gamma$ -лучей на изотропном фотонном фоне как функция энергии в электронвольтах. Фон включает микроволновый и радиочастотный фоны. Длина пробега  $\gamma$ -лучей в отсутствие радифона показана пунктирной линией

от источника (1 пк =  $3,08 \cdot 10^{13}$  км, 1 Мпк =  $3,08 \cdot 10^{19}$  км, 100 Мпк  $\approx 3 \cdot 10^{21}$  км). Если бы первичная энергия протона равнялась  $\sim 10^{25}$  эВ, то его среднее расстояние от Земли составляло бы 276 Мпк. В этом случае протон испытал бы 47 столкновений на микроволновом фоне. Или, в качестве альтернативы, вероятность протону пройти 100 Мпк без взаимодействия равна  $1,16 \cdot 10^{-5}$ , а вероятность пройти 276 Мпк без взаимодействия уменьшается до  $2,4 \cdot 10^{-14}$ .

На направлениях, откуда прибыли две космические частицы (см. табл.2), нет кандидатов в источники. Заряженная частица с энергией  $\sim 10^{20}$  эВ не может существенно отклониться в межгалактическом, весьма малом, магнитном поле. Ее гирорадиус превышает размеры Галактики.

Напомним, что наша Галактика — обширная звездная система, к которой принадлежат Солнце и наша Земля. Большая часть звезд Галактики зани-

мает объем линзообразной формы: поперечник — около 30 кпк ( $\sim 10^{15}$  км), толщина  $\sim 4$  кпк ( $10^{14}$  км). Земному наблюдателю наша Галактика представляется в виде Млечного Пути — отсюда греческое название "Галактика". Полная масса Галактики, включая все звезды и межзвездное вещество,  $\sim 10^{11}$  масс Солнца, т.е. около  $10^{44}$  г.

Гигантские галактики содержат более  $10^{11}$  звезд, число галактик в Метагалактике  $\geq 10^8$ . Таким образом, общее число звезд во Вселенной более  $10^{19}$ . Отсюда, в частности, возникает вопрос о частоте встречаемости органической жизни на других планетах, поиск внеземных цивилизаций, систем, умеющих создавать информацию, хранить ее, передавать на расстояние.

Размеры звезд с планетными системами (типа Солнца)  $\sim 10^8$  км.

Размеры галактики ( $< 10^{13}$  звезд)  $\sim 3 \cdot 10^4$  световых лет = 10 кпк.

Размеры скопления галактик (содержат до 50 ярких галактик)  $\sim 1 - 10$  Мпк  $\sim 10^7$  световых лет.

Сверхскопления галактик  $\sim 300$  Мпк ( $\geq 10^9$  световых лет).

Среди небесных тел обнаружены "квazarы" (quasi stellar radiossorce — квазизвездные мощные внегалактические источники электромагнитного излучения — активные ядра далеких галактик — открыты в 1960 г.).

Возвращаясь к двум случаям космических частиц сверхвысоких энергий, отметим, что, пройдя расстояние в 30 Мпк в магнитном межгалактическом поле, частица отклоняется не более чем на  $10^\circ$  (при расчете пользуются хорошо известным выражением:  $pc = 300B\rho$ , где  $pc$  измеряется в электронвольтах,  $B$  — в гауссах,  $\rho$  — в сантиметрах). В направлении, откуда прибыли обе частицы, есть квазар 3C147, но он находится на расстоянии 1000 Мпк и исключается как источник протонов. Таким образом, очень возможно, что в обоих случаях космической частицей было нейтрино.

Кстати, напомним, что выше, при обсуждении результатов наблюдений, полученных на установке AGASA (см. рис.1, 2), мы упоминали гипотезу Т.Уилера, в соответствии с которой источниками ультравысоких по энергии космических частиц могли бы быть аннигиляционные нейтринные процессы.

Если все же предположить, что первичной частицей были протоны внутригалактического происхождения, то из анализа следовало бы, что ускорение протонов до энергий  $\geq 10^{20}$  эВ возможно в галактическом магнитном поле в "крыльях" Галактики размером более 50 кпк:

$$E_{\max} = [10^{20} \text{ эВ}] \cdot \left[ \frac{B}{3 \cdot 10^{-6} \cdot G} \right] \cdot \frac{R}{50 \text{ кпк}}$$

Но такие "крылья" превышают размеры Галактики почти на порядок, и это бросает вызов современным гипотезам строения Галактики. Можно предположить, что существует какой-то коллективный эффект ускорения, например, в суперновой звезде спиральное ускорение с очень тесными орбитами, чтобы достичь столь высоких энергий [52].

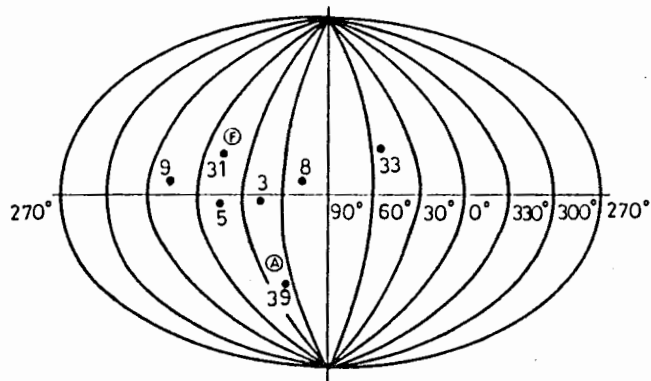


Рис. 8. Наилучшие оценки направлений источников космических частиц с энергией более  $10^{19}$  эВ, полученные из анализа широких атмосферных ливней по данным до 1992 г. Случай FH — "Fly's Eye"; случай A39 — Акено

Природа действительных источников космических лучей очень высоких энергий пока не ясна, но предпочтение отдается остаткам суперновых звезд.

В докладе [53] приведена карта небесных направлений, с которых на Землю пришли космические частицы очень высоких энергий (более  $10^{19}$  эВ) — рис.8. Было замечено, что все направления расположены вблизи небесного "экватора". Однако небесные направления шести частиц, обнаруженных на установке AGASA (см. рис.2), не совпадают с заключением Вольфендайла [53].

Как правило, массы первичных частиц неизвестны, что вызывает дополнительные трудности с определением их источников. Анализ последних экспериментальных данных указывает на значительный поток тяжелых ядер (вероятнее всего, железа) в области  $\sim 10^{18}$  эВ. Проблема их источника "стучится в дверь". Ядер железа более чем в 20 раз больше протонов.

Как уже неоднократно подчеркивалось выше, для частиц с энергией более  $10^{19}$  эВ предполагаются внегалактические источники. Их можно назвать несколько, и на них должны быть наложены некоторые ограничения.

Во-первых, в них должны быть заложены очень высокие энергии.

Во-вторых, потери энергии на взаимодействие с космическим микроволновым фоном при энергиях более  $5 \cdot 10^{19}$  эВ и при космических расстояниях должны быть очень большими.

В-третьих, частицы с большой энергией будут испускать  $\gamma$ -лучи, которые, каскадируя, будут существенно размножаться во Вселенной. Однако их внегалактический поток в области энергий  $10^8 - 10^9$  эВ хорошо известен. Здесь возможны существенные разногласия.

Вольфендайл [53] называет следующий список кандидатов в качестве внегалактических источников космических частиц сверхвысоких энергий:

- 1) столкновение галактик (специальные галактики), в которых магнитные поля могут испытывать дополнительные увеличения;
- 2) галактическое-метегалактическое пространственное столкновение (подобно столкновению Земли с межпланетной средой);
- 3) активно-галактические ядра.

Что касается струнных моделей, способных обеспечить ускорение частиц до энергий  $\sim 10^{24}$  эВ, то есть теоретические указания, что подобный поток будет слишком мал — на несколько порядков меньше наблюдаемого даже для наиболее благоприятного варианта струн.

Таким образом, "охота" за источником ультравысоких по энергиям космических частиц продолжается.

### 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АДРОНОВ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Вернемся к энергиям частиц  $\geq 10^{15}$  эВ. Есть несколько особенностей взаимодействия адронов в области ультравысоких энергий:

- 1) "выстроенность" событий;
- 2) существование кентавров;
- 3)  $\gamma$ -семейства

и некоторые другие.

При благоприятном стечении обстоятельств на высоте 3—5 км над установкой в результате распада  $\pi^0$ -мезона рождаются два фотона с энергией  $\geq 10^{15}$  эВ. В атмосфере возникают два узких, очень плотных потока частиц, которые после прохождения, например, свинцовой камеры над рентгеновской пленкой "размножаются" и на пленке создают пятно сплошного потемнения диаметром порядка 1 см. Такого рода пятна получили название "гало" и тщательно анализировались в эксперименте "Памир" с целью исследования взаимодействия частиц в области энергий от  $10^{14}$  до  $10^{17}$  эВ [54].

Анализ размеров гало и их структурных особенностей показал, что в некоторых случаях, правда довольно редких, свойства гало оказываются такими, что приходится предположить его происхождение от первичного тяжелого ядра, в частности, от ядра железа, что дает дополнительную возможность изучения ядерного состава первичной компоненты сверхвысоких энергий. Но еще одна удивительная особенность явления гало "...состоит в необычном характере структуры сложных гало, состоящих из нескольких "стволов". Как правило, такие стволы почти строго "выстроены" вдоль некоторой прямой линии. Еще более удивительно, что и отдельные, самые энергичные частицы того же семейства имеют тенденцию выстраиваться в тех же направлениях. В чем же здесь дело?..." [54, с.80]. Кстати, этот вопрос до сих пор остается

без ответа. Исследование происхождения стволов и их выстроенности будет также одной из целей проекта ЧОЛКИ СВЭ.

Наиболее острый интерес, связанный с исследованием адронной компоненты, вызывает проблема существования "кентавров" — особого класса ядерных взаимодействий большой множественности, в которых не рождаются  $\pi$ -мезоны. "...Проблема возникла в 1973 году, когда японо-бразильская группа сообщила о наблюдении первого уникального случая такого типа [55]. В дальнейшем этой же группой было обнаружено еще четыре случая кентавров, а также ряд событий несколько иного типа, названных авторами "мини-кентаврами" [56, 57]. Отличительными свойствами кентавров были характер размножения частиц в ливне и очень большой поперечный импульс разлетающихся частиц ( $\langle P_{\perp} \rangle \approx 1-2$  ГэВ/с, что в три раза больше наблюдаемых случаев множественного рождения мезонов). В связи с проблемой существования кентавров и мини-кентавров возникает несколько вопросов: не могут ли кентавры имитироваться флюктуациями в развитии ядерно-электронной компоненты в атмосфере? Наблюдаются ли аналогичные события на других высотах (4370 м — Памир, 3800 м — Фудзияма)? Не теряются ли события типа кентавров в других экспериментах из-за особенностей конструкции рентгеноэмульсионных камер?..." [58].

Авторы работы [58] согласны с тем, что кентавры существуют, наблюдали мини-кентавров в эксперименте "Памир" с той же примерно частотой, как и японо-бразильская группа, но отметили, что мини-кентавры могут имитироваться флюктуациями.

В табл.3 приведены данные об известных семи кандидатах в кентавры (в том числе два обнаружены на Памире).

Таблица 3

Номер случая	I	II	III	IV	V	VI	VII
Точка взаимодействия над камерой, м	50	80	230	500	400	800	700
Полное число наблюдаемых адронов	49	32	37	38	31	30	22
Полная энергия адронов, эВ · 10 <sup>14</sup>	2,22	1,79	1,69	1,44	1,67	4,86	4,44
N <sub>h</sub> , оцененное при взаимодействии	74	71	76	40	63	80	77
ΣE <sub>h</sub> , эВ · 10 <sup>14</sup>	3,33	3,7	3,5	3,4	3,5	15	10
Число γе-взаимодействий (оценка)	0	0	0	4	0	?	?

Анализируя данные, приведенные в табл.3, задаешься вопросами:

а) можно ли извлечь из ускорительных данных какие-то указания на существование кентавров? Есть ли какой-то последовательный переход от ускорительных данных к кентаврам или это совершенно новое явление, наблюдаемое в космических лучах сверхвысоких энергий?

б) можно ли в рамках стандартной модели в пределе сверхвысоких энергий объяснить появление кентавров?

Чтобы ответить на эти и другие вопросы, необходима еще большая статистика, необходимо убедиться в реальном существовании кентавров.

Выводы, которые делают физики из анализа адронных взаимодействий при очень высоких энергиях, состоят в следующем.

Глобальные характеристики адронного взаимодействия при очень высоких энергиях космических лучей "драматически" изменяются и отличаются от ускорительных данных: пионы более не доминируют. Появляются мини-кластеры и гигантские кластеры. Данные, полученные на Чакалтая и Памире, ведут к общему заключению, что адроны, рожденные в высокоэнергетических взаимодействиях, не являются обычными адронами, которые мы уже знаем, и могут быть чем-то другим. В астрофизике им придумывают новые названия, например,  $\chi$ -частицы (хироны). Отсюда делается далеко идущий вывод: если существующая схема стандартной модели полна, то наблюдаемым "хиронам" в ней нет места и мы должны искать причину появления новых адронных состояний.

В то же время отрицательный результат поиска кентавров на ускорителях ЦЕРН и ФНАЛ ставит вопросы:

а) правильно ли понимаются космические события?

б) может быть, первичная частица в космических лучах не протон, а "кварковый шар", возникающий в результате взрыва некоторой "кварковой звезды" [59]?

Предполагается, что кентаврофайербол рождается в верхних слоях атмосферы тяжелыми космическими ядрами в центральных соударениях с ядрами воздуха. Тогда, чтобы из верхних слоев дойти до высоты Чакалтая, кентаврофайербол должен пройти слой  $\lambda \geq 190$  г/см<sup>2</sup> и иметь время жизни  $\sim 10^{-7}$  с, так чтобы адронизация произошла вблизи детектора. Ряд характеристик этой теоретической модели не сходится с экспериментальными данными.

Отметим попытку Бьеркена понять источник возникновения кентавров в рамках стандартной модели [60]. Он предлагает ввести концепцию "неориентированного кирального конденсата", суть которой состоит в следующем. В жестком кварк-кварковом соударении расширенный объем возбужденного вакуума может иметь изотопически спиновый "замороженный" вектор в изотопическом пространстве, так что когда вакуум материализуется в пионы, есть высокая вероятность, что получающиеся частицы будут либо все ней-



тральными, либо все заряженными. Отношение числа нейтральных мезонов к полному числу мезонов он определяет формулой

$$\frac{dN}{df} \sim f^{1/2}, \quad f = \frac{N(\pi^0)}{N(\pi) + N(\pi^\pm)}$$

Зарядовая независимость и простая статистика приводит к тому, что наиболее вероятное значение  $f = 1/3$ .

Это ведет к преимущественному рождению заряженных мезонов. В настоящее время во ФНАЛ готовится эксперимент по проверке ряда следствий, вытекающих из модели "неориентированного кирального конденсата".

Сегодня надежды возлагаются на новые эксперименты на ускорителях ФНАЛ и ЛНС, в которых либо подтвердится существование кентавров, либо будет опровергнуто.

Кроме кентавров, наблюдались антикентавры с доминированием  $\gamma$ -частиц (без заряженных частиц). Число  $\gamma$ -семейств, наблюдаемых на Чакалтая и Памире, велико — см. табл.4.

Таблица 4

Высота	Глубина атмосферы, г/см <sup>2</sup>	Экспозиция $\gamma$ -семейств м <sup>2</sup> , год	Число $\gamma$ -семейств $\Sigma E_\gamma > 10^{14}$ эВ	Поток, м <sup>2</sup> · год · ср
Чакалтая	540	300	121	0,350 ± 0,046
Памир (советско-японский эксперимент)	596	530	173	0,370 ± 0,032
Памир (отдельно)	596	400	135	0,300 ± 0,033

Не будем углубляться в характеристики  $\gamma$ -семейств. Остановимся на случаях  $\gamma$ -семейств с двойными стволами — как бы двумя струями, лежащими в очень малом телесном угле каждая. Частицы имеют видимую энергию, которая лежит выше порога чувствительности детектора ( $\geq 2 \cdot 10^{12}$  эВ). Два ствола  $\gamma$ -частиц получаются от взаимодействия космической частицы с ядром воздуха.

Таким образом, примеры экзотических случаев во взаимодействиях космических частиц, как видим, разнообразны: кентавры и мини-кентавры, копланарность (или кластерная выстроенность случаев), концентрические кольца или кольцеподобные случаи [61], случаи с двойными стволами (или бинокулярные случаи).

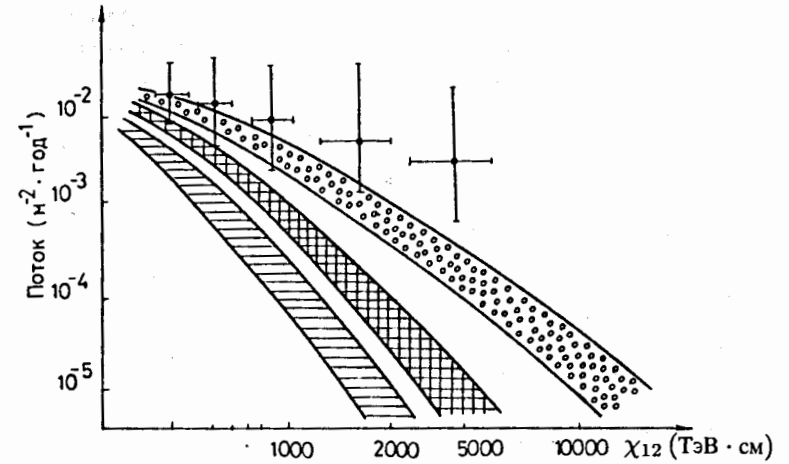


Рис. 9. Интегральный спектр для пяти случаев  $\gamma$ -семейств с двойным стволом

Интерес к случаям с двойными стволами вызван тем, что поперечный импульс "разлета" двойных стволов оказывается больше предсказываемого КХД, что указывает, возможно, на новую физику [62]. На рис.9 представлено сравнение экспериментальных данных по изучению  $\gamma$ -семейств с двойными стволами с теоретическими кривыми [62]. Видно, что экспериментальные точки со значительным превышением расположены над теоретическими кривыми, рассчитанными в рамках теории возмущений КХД. Величина  $\chi_{12}$  определяется следующим образом:

$$\chi_{12} \equiv \sqrt{E_1 \cdot E_2} \cdot R_{12} \geq 100 \text{ ТэВ} \cdot \text{см},$$

где  $E_1$  и  $E_2$  — полные энергии  $\gamma$ -кластеров в  $\gamma$ -семействах с двумя стволами,  $R_{12}$  — расстояние между энергетически взвешенными центрами двух кластеров  $\gamma$ -квантов. Центр  $\gamma$ -кластера определяется как энергетически взвешенный центр

$$\langle r_i \rangle = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} r_j E_j}{\sum_{j=1}^{n_i} E_j}.$$

Здесь  $r_j$  — расстояние между  $j$ -й частицей в кластере и ее энергетически взвешенным центром,  $n_i$  — число частиц в кластере,  $i = 1, 2$  (нас интересуют только 2-кластерные  $\gamma$ -семейства).

Не вдаваясь в теоретические детали рассматриваемой модели, отметим, что в ней параметр  $\Lambda_c$ , характеризующий возможную кварковую подструктуру, имеет тенденцию к уменьшению и наилучшая расчетная кривая получена для параметра  $\Lambda_c \approx 0,1$  ТэВ. Подобное же явление (рождение 2-кластерных



$\gamma$ -семейств) изучалось во ФНАЛ (CDF-коллораация, [63]) при  $\sqrt{s} = 1,8$  ТэВ в  $p\bar{p}$ -соударениях. Авторы работы [63] не декларировали присутствие новой физики, которая могла следовать из их эксперимента, наилучшая подгонка с помощью так называемой контактной модели составных кварков была получена при значении  $\Lambda_c \approx 1,6$  ТэВ (модель HMRS: Harriman, Martin, Roberts, Stirling).

Значение  $\Lambda_c$  в CDF-эксперименте существенно отличается от значения в вышерассмотренном подходе  $\Lambda_c \leq 0,1$  ТэВ (см. рис.9) и имеет явно противоположную тенденцию к увеличению. Напрашивается вывод, что в область космических лучей высоких энергий, видимо, следует включать новую физику, выходящую за рамки КХД.

Итак, изучение  $\gamma$ -семейств с двойными стволами дает важную информацию о взаимодействии адронов при больших передачах импульсов.

И здесь мы снова возвращаемся к проекту ЧОЛКИ СВЭ, в котором изучение стволов  $\gamma$ -семейств будет одной из основных задач экспериментального наблюдения.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мною было рассмотрено небольшое количество аспектов физики космических лучей сверхвысоких энергий, наиболее приближенных к возможностям их изучения в ОИЯИ в рамках проекта ЧОЛКИ СВЭ:

а) изучение проблемы "колена" (поведение энергетического спектра и химический состав спектра);

б) изучение "стволов" широких атмосферных ливней в интервале энергий космических лучей  $10^{14}$  эВ  $< E < 10^{17}$  эВ (характеристика "стволов", их частота, направленность, пространственная структура и другие характеристики);

в) поиск экзотических событий;

г) развитие методики ЧОЛКИ СВЭ позволит расширить спектр научных проблем для исследования природы космического излучения;

д) несомненно, было бы важно исследовать биологические аспекты влияния "стволов" на живые объекты.

Кроме этих задач я укажу на тематику нескольких недавно опубликованных статей в журнале "Astroparticle physics", которая близко примыкает к интересам научных сотрудников нашего института:

а) проблема нейтринных осцилляций;

б) проблема темной материи в межзвездном пространстве;

в) проблема распространения элементарных частиц (протонов,  $\gamma$ -квантов и др.) на большие космические расстояния;

г) анизотропия направлений, с которых приходит на Землю космическое излучение с энергиями  $> 10^{19}$  эВ;

д) модели взаимодействия космических лучей очень высоких энергий и другие.

Следует отметить, что ближайшие 15—20 лет будут годами подлинного расцвета исследований в области космических лучей с энергиями  $\geq 10^{15}$  эВ и открытия новых явлений в физике элементарных частиц сверхвысоких энергий.

В заключение я приношу глубокую благодарность В.П.Зрелову, привлечшему мое внимание к проблемам изучения космических лучей сверхвысоких энергий. Он ознакомился с содержанием моей работы, сделал ряд ценных замечаний и подготовил большую часть рисунков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. C.D. Anderson, Science, 76, 238 (1932); Phys. Rev., 43, 491 (1933).
2. S.H. Neddermeyer, C.D. Anderson, Phys. Rev., 51, 884 (1937).
3. J.C. Street, E.C. Stevenson, Phys. Rev., 52, 1003 (1937).
4. C.M. Lattes, G.P.S. Occialini, C.F.Powell, Nature, 160, 452, 486 (1947).
5. G.D. Rochester, C.C. Batler, Nature, 160, 855 (1949).
6. R. Brown, U. Camerini, P.H. Fowler, H. Muirhead, C.F. Powell, D. Ritson, Nature, 163, 82 (1949).
7. C. O'Ceallaigh, Phys. Mag., 42, 1032 (1951).
8. R. Armaneros, K.H. Barker, C.C. Batler, A. Cackon, A.H. Chapman, Nature, 167, 501 (1951).
9. R. Armenteros, K.H. Barker, C.C. Batler, A. Cachon, C. York, Phil. Mag., 43, 597 (1952).
10. A. Bonetti, R. Levi-Setti, M. Panetti, G. Tomassini, Nuovo Cim., 10, 345 (1953).
11. C.M. York, R.B. Leighton, E.K. Bjornerund, Phys. Rev., 90, 167 (1953).
12. N.N. Efimov et al. — In: ICRR Symposium on Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Ray, ed. by M. Nagano, F. Takaharo, World Scientific (1991).

13. D.J. Bird et al., Phys. Rev. Lett., 71, 3401 (1993).
14. F. Halzen, R.A. Vazquez, T. Stanev, H.P. Vankov, Astroparticle Physics, v.3, No.2, 151—156 (1995).
15. В.Л. Гинзбург, УФН, 166, 172 (1996).
16. Н.Л. Григоров и др. Частицы высоких энергий в космических лучах. — М: Наука, 1973.
17. The JACEE Collaboration. — In: Proceedings of VIII International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 24—30 July, 1994, Tokyo, Japan, p. 513.
18. B.N. Afanasiev, S.P. Knurenko, S.I. Nikolsky, I.Ye. Slepsov. — In: Proceedings of VIII International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 24—30 July, 1994, Tokyo, Japan, p.585.
19. M. Takeda et al., Phys. Rev. Lett., v.81, No.6, p.1163—1166 (1998).
20. S. Yoshida et al., Astroparticle Physics, 3, 105—123 (1995).
21. Г.В. Куликов, Г.Б. Христиансен, ЖЭТФ, т.35, с.635 (1958).
22. N. Hayashida, K. Honda, M. Honda et al. — In: Tokyo Workshop on large EAS, 1993.
23. A.D. Erlykin. — In: "Cosmic Ray 94", Proceedings of the 14th European Cosmic Ray Symposium, Balatonfüred, Hungary, 28 August—3 September 1994, p.215.
24. V. Peters. — In: 6 Int. Cosm. Ray Conf., Moscow, 3, p.157 (1959); Nuovo Cim. (Suppl.) 14, p.436 (1961).
25. С.И. Сыроватский, Ю.А. Фомин, Г.Б. Христиансен, ЖЭТФ, т.45, с.1595 (1963).
26. А.М. Hillas. — In: 16th Int. Cosmic Ray Conf., Kyoto, 1979, 8, p.7.
27. P.L. Biermann. — In: 23 Int. Cosmic Ray Conf., Calgary, Inv. Rap., High Papers, 1993, p.45.
28. С.И. Никольский. — Бюллетень Российской АН, т.57, с.595 (1991).
29. V. Yakovlev. — In: Proceedings of VIII International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 24—30 July, 1994, Tokyo, Japan, p.552.

30. V. Yakovlev, ibid., p.562.
31. См. напр., E. Juliusson, Astroparticle Phys., 191, 331 (1974), T.K. Gaisser and G.B. Yodh, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci, 30, 475 (1980).
32. N.L. Grigorov et al. — In: Proc. 12th Int. Cosmic Ray Conf., Hobart, v. 5, p. 1746 (1971).
33. S. Ahlen et al., Phys. Rev. D, 46, 895 (1992).
34. A.E. Chudakov et al. — In: Proc. 22th Int. Cosmic Ray Conf., Dublin, v. 2, p. 5 (1991).
35. D. Cebula et al., Astrophys. J., 358, 637 (1990).
36. G. Bologna et al., Nuovo Cim., C8, p. 76 (1985).
37. H. Adarkar et al., Phys. Lett., B267, p. 138 (1991).
38. K. Mitsui et al., Phys. Rev. D, 44, 661 (1991); Astroparticle Phys., 3, 125—136 (1995).
39. T.V. Danilova et al., Sov. J. Nucl. Phys., 54, 82 (1991); T.V. Danilova et al., J. Phys. G, Nucl. Phys., 19, 429 (1993).
40. S.I. Nicolsky. — In: Proc. of VIII Int. Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Tokyo, Japan, 1994, p. 267.
41. S.I. Nicolsky. — In: Proc. of 14th European Cosmic Ray Symposium, Balatonfüred, Hungary, 1994, p.228.
42. С.И.Никольский, Известия АН, 1993, т. 57, с.18.
43. A.Ts. Amatuni et al., Preprint E.Ph.I-358, Erevan, 1979.
44. CERN Courier, v.37, No.7, September 1997, p.26.
45. P. Goldreich, W.H. Tulian, Astrophys. J., 157, p.870 (1969).
46. J.P. Ostriher and J.E. Gunn, Astrophys. J., 157, p.1279 (1969).
47. E. Fermi, Phys. Rev., 75 (1949) 1729.
48. R.D. Blandford and J.P. Ostricher, Astrophys. J., 221 (1978) L29.
49. A.R. Bell, Mon. Not. R. Astron. Soc., 182, p. 147 (1978).

50. E. Berezko, L. Ksenofontov, V. Yelskin. — In: Proc. of the 14th European Cosmic Ray Symposium, Balatonfüred, Hungary, 28 August—3 September 1994, p.171.
51. N. Inone et al. — In: Proc. of VIII Int. Symp. on Very High Energy Cosmic Ray Interaction, Tokyo, Japan, 1994, p. 597—602.
52. W.I. Axford. — In: Proc. of 1990 Kofu Simposium on "Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Ray", 1991, p.1991.
53. A.W. Wolfendale. — In: Proc. of the 14th European Cosmic Ray Symposium, Balatonfüred, Hungary, 28 August—3 September 1994, p. 251—254.
54. Г.Б. Жданов, В.М. Максименко, С.А. Славатинский, Природа, 1986, №8, с.70—80.
55. C.M. Lattes et al. — In: Proc. 13th Int. Cosm. Ray Conf., Denver, 1973, v. 4, p. 2671—2675.
56. Brasil-Japan emulsion chamber collaboration, A new type of nuclear interaction of the  $\Sigma E_\gamma > 10^{14}$  eV Region. — In: Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf., Kyoto, 1979, v. 6, p. 356—361.
57. J.A. Chellato et al., Ceutauros, Tokyo, 1981, p. 64 (Prepr./waseda univ.).
58. Труды ФИАН, т. 154, с. 3—141 (1984).
59. J.D. Bjorken and L.D. McLerran, Phys. Rev., D20, 2353 (1979).
60. J.D. Bjorken, Int. J. Mod. Phys., A7, 4189 (1992); J.D. Bjorken. — In: Int. Symp. on Multiparticle Dynamics (Aspen, 1993).
61. J.R. Ren et al., Kanbaba collab — In: Proc. Int. Symp. on Superhigh Energy Cosmic Ray Interactions, Beijing, 1986, p.5—18.
62. Z. Cao, L.K. Ding, Q.Q. Zhu and Y. D.Me, Phys. Rev. Lett., 72, 1794 (1994).
63. F. Abe et al., CDF-Collab., "Inclusive jet cross section in  $p\bar{p}$ -collisions at  $\sqrt{s} = 1,8$  TeV", Fermilab-Pub-90/020-E (1996).

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 февраля 1999 года.