1967 г. Март *Том 91, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

ПРОБЛЕМА КВАРКОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ *)

Е. Л. Фейнберг

1. ПРОБЛЕМА КВАРКОВ

Вопрос о реальности кварков, о их существовании порознь, в свободном состоянии, является одним из интереснейших вопросов физики элементарных частиц.

Как возникла сама идея кварков? Поясним ее происхождение на грубом примере.

Предположим, что мы не знали бы о существовании электронов и начали изучение атомных оболочек не с простейшего атома с одним электроном, но что нам вначале были бы доступны только многоэлектронные атомы. Исследуя их свойства, мы бы заметили, что оболочка такого атома имеет определенные значения момента количества движения и его проекций, нашли бы некоторые закономерности в расположении уровней и т. п. и в конце концов узнали бы, например, что в смысле этих значений волновая функция оболочки атома с зарядом ядра Ze в разных состояниях возбуждения ведет себя как спинор высшего ранга (ранга Z) $\Psi^{\alpha_1\alpha_2\ldots\alpha_Z}$, где каждый из Z значков α_i может иметь два значения. Мы не знали бы, что аргументами функций могут быть координаты $\mathbf{r}_i$ частиц. Координаты в волновой функции оболочки, вообще говоря, не разделяются, но мы могли бы разложить эту функцию по произведениям обычных спиноров ранга единица (для простоты мы ограничиваемся состояниями с нулевым орбитальным моментом):

$$\Psi^{\alpha_1\ldots\alpha_Z}=\sum a_{\alpha_1\alpha_2\ldots\alpha_Z}\psi^{\alpha_1}\psi^{\alpha_2}\ldots\psi^{\alpha_Z},$$

а в самом грубом приближении, пренебрегая обменом, мы могли бы предположить, что сумма сводится только к одному члену $\psi^{\alpha_1}\ldots\psi^{\alpha_Z}$.

Тогда, несомненно, возникла бы мысль: а не состоит ли оболочка атома из Z отдельных частиц, каждая из которых описывается спинором первого ранга, т. е. из частиц со спином 1/2? Так мы пришли бы к идее об электронах, догадались бы о их индивидуальном существовании и затем уже на опыте обнаружили их по отдельности.

При систематизации свойств элементарных частиц было замечено, что многие закономерности можно объяснить с точки зрения $SU(3)$ симметрии, именно, предполагая, что в пространстве изотопспина и странности частицы можно группировать так, что некоторые группы частиц, например барионов, описываются волновой функцией, которая преобразуется при

*) Дополненный доклад на Всесоюзной конференции по космическим лучам, Алма-Ата, октябрь 1966 г.

преобразовании координат в этом пространстве, как спинор третьего ранга, $\Psi^{\alpha\beta\gamma}$, где каждый индекс α, β, γ пробегает два значения. Естественно, и здесь возникает вопрос: не является ли эта функция произведением трех спиноров, относящихся к разным субчастицам, образующим всю частицу так же, как электроны образуют атомную оболочку? Эта мысль (Гелл-Манн; Цвейг) подкрепляется тем, что и мезоны образуют системы подобной же структуры симметрии, и их волновые функции выражены через произведения пар функций тех же базисных спинорных частиц — кварков. Такие частицы должны иметь электрические заряды $\pm\frac{1}{3}e$ и $\pm\frac{2}{3}e$, хотя бы некоторые из них должны быть устойчивы (подробнее см. [1]).

Однако электроны в атомной оболочке взаимодействуют слабо, и мы можем думать, что электроны в оболочке и электрон свободный мало отличаются по своим свойствам, и даже что свойства совокупности электронов, описываемых отдельными функциями, близки к свойствам целой оболочки. В случае же сильно взаимодействующих частиц подобная замена может оказаться бессмысленной. Может случиться, что свойства бариона не могут быть сведены к свойствам трех образующих его частей — кварков, взятых порознь, с небольшими поправками к их свойствам, обусловленными их взаимодействием. Каждая из этих частей сама по себе, может быть, и не существует.

В самом деле, нам известна история попыток построить нейтринную теорию света. Исходя из того, что векторное поле, которое описывает электромагнитные кванты, с точки зрения трансформационных свойств эквивалентно совокупности двух спинорных полей, некоторые теоретики еще 30 лет назад пытались объяснить кванты света как совокупность двух нейтрино. Это вполне допустимо с точки зрения тензорной структуры функций электромагнитного поля, с одной стороны, и нейтрино — с другой. Однако такое сведéние невозможно из-за других, физических свойств этих полей.

Поэтому вполне возможно, что кварки и не существуют, даже если приближенная $SU(3)$ или другая подобная симметрия элементарных частиц является достоверным фактом.

Но проблема есть, и проблема интереснейшая. Поэтому нельзя уклониться от ее досконального исследования.

2. ПОИСКИ НА УСКОРИТЕЛЯХ

В течение последних нескольких лет было много серьезных попыток найти кварки среди продуктов столкновения нуклонов, ускоренных на ускорителях, т. е. имеющих энергии вплоть до 30 *Гэв*. Эти попытки оказались тщетными [2]. Будем исходить из того, что кварки все же существуют. Тогда отрицательный результат поисков на ускорителях может значить, что энергия ускорителей просто недостаточна из-за того, что кварки тяжелы, что их масса m_q превышает $5m_N$ — пять масс нуклонов, и для рождения пары кварков $q\tilde{q}$ энергии нуклона 30 *Гэв* недостаточно даже при учете движения нуклонов в ядре мишени. С другой стороны, результат этих опытов может значить только, что масса кварков не так уже велика, но сечение генерации почему-то очень малó.

Вопрос о сечении генерации пар кварков может быть исследован теоретически, однако только при том условии, что мы предположим нечто вполне конкретное о свойствах кварков. Оказывается, достаточно сделать такое предположение относительно их силы взаимодействия с пионами и нуклонами.

Кварки, группируясь по три, образуют нуклоны, а пара кварк-антикварк составляют мезон. Значит, между собой, по крайней мере на малых расстояниях — порядка размеров частицы, они взаимодействуют очень сильно, так, что дефект массы в мезонах превосходит $\sim m_q$, а $m_q > \frac{1}{3} \cdot m_N$ (иначе три кварка не дали бы барион с массой m_N). Но как взаимодействует кварк с барионом, состоящим тоже из кварков? По-видимому, по порядку величины так же, как барион с барионом.

Это мы и примем за исходный пункт, т. е. будем считать, что кварк взаимодействует с пионами и барионами по порядку величины так же сильно, как обычная сильно взаимодействующая частица.

Заметим, что это не безусловный (хотя и очень естественный) вывод. Могло бы быть, что кварки взаимодействуют между собой сильно только на сверхмалых расстояниях — внутри протона или внутри мезона, когда их скорости чрезвычайно велики, а на расстояниях порядка $1/\mu$, где μ — масса пиона, при не очень большой кинетической энергии их взаимодействие мало́. Но это выглядит чрезвычайно экстравагантно, и мы будем пока опираться на первое заключение.

Тогда сечение генерации пар $q\tilde{q}$ массы m_q можно вывести, если мы найдем закономерность генерации других пар тяжелых сильно взаимодействующих частиц — протон-антипротон ($p\tilde{p}$) и дейтон-антидейтон ($d\tilde{d}$). Для них имеются экспериментальные данные (к сожалению, для пар более тяжелых частиц — тритий-антитритий ($t\tilde{t}$) данные очень неопределенны).

Если мы попробуем вычислить вероятность образования этих пар в NN-соударениях по статистической теории, то мы обнаружим превосходное согласие с экспериментом. Это не очень удивительно. Генерация таких пар возможна только в соударениях с очень большой передачей импульса, т. е. центральных. Для них же статистическая теория должна быть хороша. Подсчет показывает [3], что это сечение, или, лучше, отношение числа $n_{q\tilde{q}}$ генерированных тяжелых пар к числу одновременно генерированных в том же акте пионов, n_π, равно

$$\frac{n_{q\tilde{q}}}{n_\pi} = \frac{g_{q\tilde{q}}}{g_\pi^2} \frac{\pi}{2} n_\pi \frac{1}{[F_-(\mu/T_к)]^2} \left(\frac{m_q}{T_к}\right)^3 e^{-2m_q/T_к}. \qquad (1)$$

Здесь $g_{q\tilde{q}}$ — изотопный и спиновый вес пары $q\tilde{q}$ (для $p\tilde{p}$ это $2 \times 2 = 4$, для $d\tilde{d}$ $3 \times 3 = 9$, для кварков $g_{q\tilde{q}}$ $6 \times 6 = 36$); F_- — табулированная функция, $F_-(1) \approx 2$; $T_к$ — неопределенный параметр, имеющий смысл критической температуры системы (образованной в центральном NN-соударении), при которой система распадается на пионы и другие частицы *). Отсюда можно получить и сечение σ_q. На рисунке нанесены экспериментальные данные для генерации $p\tilde{p}$ и $d\tilde{d}$ и проведены интерполяционные кривые типа

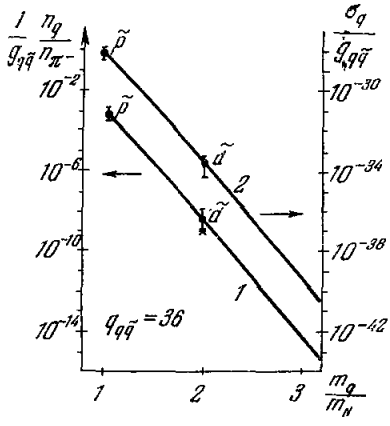
$$\sigma_{q\tilde{q}} = g_{q\tilde{q}} \cdot a \left(\frac{m_q}{T_к}\right)^3 e^{-2m_q/T_к}, \qquad a = 4 \cdot 10^{-25}\ см^2, \qquad T_к = 0{,}94\ \mu.$$

Видно, что они превосходно описывают экспериментальные данные. Значение $T_к$, определенное из такого сравнения теоретической формулы с экспериментом, вполне разумно с точки зрения статистической теории (ожидается $T_к \sim \mu$) *).

*) Эта формула учитывает, что $n_{q\tilde{q}} \ll 1$. При $n_{q\tilde{q}} \gg 1$ была бы верна более простая формула (использованная, в частности, в [5]), которая, однако, в нашем случае непригодна.

Мы видим, что при росте массы частиц на m_N сечение их генерации падает на $5 \div 5\frac{1}{2}$ порядков. Это подтверждается для $\tilde{p}$, $\tilde{d}$ и имеет простое объяснение: вместо генерации пары с общей массой $2\,m_q$ статистически гораздо выгоднее генерировать $\sim 13 \cdot m_q/m_N$ пионов. Этот конкурирующий процесс забивает генерацию тяжелых пар.

Если применить эту формулу к генерации пар кварков, то мы увидим, что уже при $m_q = 3m_N$ сечение падает до $\sim 10^{-38}$ *см*^{2} и лежит вне досягаемости производившихся пока на ускорителях экспериментов. Поэтому опыты на ускорителях не исключают того, что $m_q \sim (2{,}5 \div 3)\, m_N$. Вообще, отсюда следует, что генерировать пару $q\tilde{q}$ в процессе соударения нуклонов невероятно трудно. Но и в любом другом процессе, например, при электромагнитной генерации, генерация многих пионов будет забивать рождение кварков, так что этот вывод имеет общее значение.



В этом рассуждении остается одна возможная лазейка. Если $m_q \gtrsim 3m_N$, то сечение генерации становится столь малым, что могут начать сказываться побочные малые эффекты, не принятые во внимание в подсчете. Так, например, кварки, возникшие на первой стадии существования статистической системы (когда ее температура высока, $T \gg T_K$), могут ускользнуть из системы, имеющей небольшие размеры и вообще может не успевать устанавливаться их тепловое равновесие с системой. Тогда кривая на рис. 1 замедлит свое падение и, может быть, даже выйдет на плато.

Вообще, если наше исходное предположение о том, что кварки взаимодействуют с нуклонами и пионами столь же сильно, как обычные сильно взаимодействующие частицы, неверно, если они почему-либо взаимодействуют слабее, то они также могут ускользнуть из статистической системы на ранних стадиях расширения, при понижении температуры системы не аннигилируют с образованием многих пионов и, следовательно, их сечение генерации будет больше вычисленного. Конечно, парадоксально, что при более слабом взаимодействии частицы должны иметь большее сечение генерации, однако это следует из термодинамической картины.

Подсчеты сечения генерации кварков производились и другими способами, например, на основе рассмотрения некоторых периферических диаграмм с форм-факторами. Они представляются нам существенно менее достоверными[7]. Оценка в случае диаграмм, в которых происходит обмен кварком, дает также малое сечение, хотя экспоненциальная зависимость от m_q заменяется в них алгебраической (высокой степени, например, m_q^{-12}[7]). Иногда же рассматриваются диаграммы с обменом пионом[8,9]. Но тогда нужно учитывать форм-фактор в вершине, содержащей пару $q\tilde{q}$. Его либо вообще не учитывали, либо брали из экспериментов, в которых генерировалась пара $N\tilde{N}$ (вместо $q\tilde{q}$).

Между тем, именно этот фактор дает экспоненциальное падение с массой частицы, и потому результаты вычислений, в которых он учтен неправильно, оказались сильно завышенными, получались сечения порядка 10^{-30} *см*^{2}[8].

3. ИСТОЧНИКИ КВАРКОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Неудача попыток получить кварки на ускорителях повысила интерес к поискам кварков в космических лучах. При этом обычно исходили из того, что в космических лучах присутствуют частицы со столь высокой энергией, что порог $\sim 5m_N$ может быть преодолен. Однако в свете сказанного выше положение осложняется. Если сечение σ_q так мало́, как дает наша оценка, то надежда на генерацию кварков космическими лучами в атмосфере (или в специальных фильтрах) невелика. Только неполная достоверность формулы (1) и исходных для ее вывода положений позволяет рассчитывать на удачу в этом направлении.

Между тем, существует другой источник кварков, совсем иной природы.

В настоящее время можно считать почти достоверным, что наша Вселенная в процессе расширения в прошлом находилась в состоянии высокой плотности и температуры, когда в ней, в термодинамическом равновесии, присутствовало большое число пар сколь угодно тяжелых частиц и других квантов. По мере расширения и остывания системы их концентрация равновесно понижалась. Затем вследствие быстроты расширения наступила такая стадия, когда из-за малой концентрации пары уже не имели времени аннигилировать. Их число, сохранившееся к этой стадии, сохранялось и в будущем, относительная доля частиц каждого сорта «заморозилась» и при дальнейшем расширении в общем оставалась неизменной. Правильность этой концепции была доказана радиоастрономическими наблюдениями последних полутора лет, когда измерениями на длинах волн 20; 7; 3 и 0,25 *см* было обнаружено изотропное радиоизлучение. Интенсивность его хорошо согласуется с предположением, что оно является равновесным тепловым излучением, заполняющим пространство при температуре $\sim 3°$ К. Это не единственное, но наиболее прямое доказательство реальности описанной эволюции Вселенной за последние примерно 10^{10} *лет*. Но наряду с этими реликтовыми радиоволнами пространство должно быть заполнено и другими реликтовыми квантами, в частности, кварками и антикварками. Подсчет их точной концентрации в наше время чрезвычайно труден и опирается на не всегда достоверные оценки различных факторов, таких, как частота перехода материи из холодных областей в горячие (недра звезд) и обратно: в горячих областях скорость аннигиляции кварков резко возрастает, они «выгорают».

Подобный подсчет был произведен в известной работе Я. Б. Зельдовича, Л. Б. Окуня и С. Б. Пикельнера [10] и привел к оценке $Q \sim 10^{-9}$—10^{-18} кварков на нуклон в холодных областях Вселенной (оболочки звезд и т. п.).

Новые данные по реликтовому радиоизлучению позволяют уточнить исходную модель (выбрать так называемую «горячую модель» Вселенной), что приводит Я. Б. Зельдовича [11] к оценке числа кварков $Q \sim$ $\sim 10^{-10}$—10^{-13} на один стабильный нуклон. Эти реликтовые кварки должны быть очень медленными, соответственно их температуре $\sim 3°$ К. Поэтому прежде всего их ищут в различных средах методами масс-спектрометрии, в опытах типа Милликена и т. п.

Эти медленные кварки и могут дать кварковый поток в космических лучах. В самом деле, входя в небесные тела на равных правах с нуклонами и ядрами, кварки, в частности, благодаря их электрическому заряду, могут испытать такое же ускорение, как то, которое испытывали нуклоны и ядра, вошедшие в состав космических лучей. Поэтому они могут присутствовать в космических лучах в пропорции, которая определяется двумя факторами: во-первых, их начальной, реликтовой распространенностью

Q; во-вторых, отличием эффективности их ускорения от эффективности ускорения нуклонов и ядер [12].

Этот второй источник кварков в космических лучах может быть более существенным, чем их генерация в атмосфере.

4. ВОЗМОЖНЫЕ ПОТОКИ УСКОРЕННЫХ РЕЛИКТОВЫХ КВАРКОВ

Перейдем к вопросу о возможных механизмах ускорения реликтовых кварков.

Прежде всего нужно учесть, что интерес могут представлять лишь те механизмы ускорения, которые функционируют в холодных областях Вселенной — в межзвездном газе, в неконвективных оболочках холодных звезд. Ускорение во вспышках новых и сверхновых может представлять ценность в интересующем нас аспекте только в том случае, если оно осуществляется в их холодных наружных слоях.

Однако, с другой стороны, нужно иметь в виду, что те многочисленные механизмы ускорения, которые для обычных космических лучей считаются неэффективными, могут быть существенны для кварков. Приведем пример.

Статистический механизм Ферми (второго порядка) дает частицы энергии $E = E_0 e^{\alpha t_0}$, где E — их начальная энергия, $E_0 \approx m_q$; α — коэффициент ускорения в формуле $\frac{dE}{dt} = \alpha \frac{v}{c} E$. Для межзвездной среды, если, как принято, считать размеры облаков $l \sim 3 \cdot 10^{19}$ *см*, их скорость $u \sim 10^{-1} c$, имеем $\alpha = u^2/cl \sim 10^{-17}$ *сек*$^{-1}$. Даже за время жизни Вселенной, $t_0 \sim 3 \cdot 10^{17}$ *сек*, мы получаем ускорение лишь до энергии $E \sim e^3 E_0 \sim 20 m_q$. Для объяснения наблюдаемого потока космических лучей, при $m_q = m_N \approx 1$ *Гэв*, этого, конечно, совершенно недостаточно. В нашем же случае это только значит, что кварки могут иметь сравнительно небольшую энергию. Важно лишь, чтобы существовал эффективный механизм инжекции. Положение облегчается тем, что пороговая кинетическая энергия инжекции для кварков ниже, чем для протонов и ядер:

$$E_{\text{кин. инж}} \sim 7 \cdot 10^{-9} \frac{Z^2 n}{c\alpha}$$

(n — концентрация атомов в среде).

Так как для кварков заряда $\frac{1}{3} e$ $Z^2 = \left(\frac{1}{3}\right)^2 \sim \frac{1}{10}$, то кварки находятся в лучших условиях, чем протоны и ядра. Даже если переброс в надинжекционную область происходит таким простым механизмом, как кулоновское соударение с космическими лучами, оценка дает для доли, которую составляет поток I_q кварков в потоке космических лучей $I_{\text{к. л}}$:

$$\xi = \frac{I_q}{I_{\text{к. л}}} \sim 10^{-4} \frac{m_N}{m_q} Q,$$

где Q — равновесная концентрация холодных кварков, $Q \sim 10^{-10}$—10^{-13}. Конечно, могут существовать и другие, более эффективные механизмы инжекции, а также холодные области со значениями α, превосходящими значение 10^{-17} *сек*$^{-1}$.

В случае безинжекционного механизма ускорения [13], возможность которого находит поддержку в факте повышенного содержания тяжелых ядер в первичных космических лучах (в момент их генерации в источнике), важную роль играет параметр Z^2/m, где Ze и m — заряд и масса ускоряемой частицы. Для кварков с $Z = 1/3$ он в $\sim 10 \frac{m_q}{m_N}$ раз меньше, чем даже для протона, и потому и здесь условия для их ускорения более благоприятны, чем для их обычных космических лучей.

Космические лучи, генерируемые в неконвективных оболочках Солнца (и других стационарных звезд), составляют малую долю ($\sim 10^{-3}$—10^{-5}) всех космических лучей и, кроме того, имеют малую энергию. Однако механизм ускорения существует и, значит, кварки с энергией $E_{\text{кин}} \lesssim m_q$ могут иметь и это происхождение, составляя $\xi \gtrsim (10^{-3}$—$10^{-5})\ Q$ от потока космических лучей.

Аналогичные рассуждения можно привести и для механизма ускорения плазменными волнами.

Таким образом, ускоренные реликтовые кварки в потоке космических лучей могут составлять такую же долю, как в холодном состоянии, $\xi \sim Q$, либо быть меньше на несколько порядков (уже указанный выше механизм Ферми с кулоновской инжекцией, т. е. вполне обеспеченный механизм, дает нижнюю границу $\xi \sim 10^{-4} \frac{m_N}{m_q} Q$), но возможно, что ξ даже превосходит Q.

Следовательно, возможность присутствия измеримого количества кварков в космических лучах определяется прежде всего стационарной концентрацией Q холодных кварков в источниках.

Известно, что на Земле проведенные до сих пор поиски холодных кварков не увенчались успехом. Даже старые опыты Милликена дают Q существенно ниже указанной выше цифры $Q \sim 10^{-10}$—10^{-13}. Недавнее повторение этих опытов для железных метеоритов, воздуха и воды дали соответственно верхние границы: $Q_{\text{метеор}} < 10^{-17}$, $Q_{\text{возд}} < 5 \cdot 10^{-27}$ и $Q_{\text{воды}} < 3 \cdot 10^{-29}$ [14]. (При этом вода испарялась и в таком виде вводилась в установку.) Однако это можно рассматривать прежде всего как результат неудачной судьбы Земли: быть может, она в своей истории прошла через такую стадию, когда все ее вещество было горячим и все кварки выгорели.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКОВ КВАРКОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Все выполненные до сих пор исследования были нацелены на поиски космических лучей с пониженным зарядом. Приведем таблицу результатов.

Таблица

Критерий отбора по заряду	Высота над уровнем моря, *м*	Верхняя граница потока кварков, *см*$^{-2}$ × *стер*$^{-1}$ × *сек*$^{-1}$	Авторы
$\frac{1}{3}e$	0	$20 \cdot 10^{-8}$	Sunyar et al. [15]
$\frac{1}{3}e$	2500	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$	Bowen et al. [16]
$\frac{2}{3}e$	500	$5 \cdot 10^{-8}$	Massam et al. [2]
$\frac{1}{3}e$	2500	$8{,}7 \cdot 10^{-9}$	De Lise et al. [17]
$\frac{2}{3}e$	2500	$18{,}0 \cdot 10^{-9}$	» » » » [17]
$\frac{1}{3}e$	500	$1{,}5 \cdot 10^{-9}$	Bühler-Broglin et al. [18]
$\frac{2}{3}e$	500	$1{,}4 \cdot 10^{-9}$	» » » [18]

Все данные приведены для уровня достоверности 90%. Кроме того, в работе Аргонской группы [19] при уровне достоверности 80% получено $I_q < 4{,}5 \cdot 10^{-10}$. После приведения к тому же уровню достоверности эта цифра практически совпадает с данными [18].

Упомянем, далее, сообщенную на Всесоюзной конференции по космическим лучам (Алма-Ата, 1966) работу А. В. Хримяна, В. В. Авакяна и Г. В. Хримян, в которой определялась масса частиц в космических лучах. На 10^5 μ-мезонов была найдена одна частица массы более 7 *Гэв*. Вероятность ее имитации альфа-частицей оценивается цифрой $< 10^{-4}$.

Особняком стоит работа американских физиков Лейпунера, Каша и Адэйра [20], в которой сообщен сенсационный результат: производя наблюдения в космических лучах, эти авторы обнаружили на фоне большого числа частиц с обычной ионизующей способностью частицы с зарядами $\frac{1}{3}e$ и $\frac{2}{3}e$:

$$I_q\left(\frac{1}{3}e\right) = (2{,}6^{+2{,}1}_{-1{,}3}) \cdot 10^{-9};$$

$$I_q\left(\frac{2}{3}e\right) = (2{,}1^{+1{,}8}_{-1{,}5}) \cdot 10^{-9}.$$

Однако эта работа, направленная в печать в мае 1966 г., не обсуждалась на XIII Международной конференции по физике элементарных частиц в Беркли (сентябрь 1966). Видно, что цифры для потока не выходят за пределы двукратной ошибки и пока преждевременно придавать им большое значение.

Итак, задача поисков кварков в потоке космических лучей остается нерешенной и актуальной.

Следует подчеркнуть особую целесообразность поисков нерелятивистских или слабо релятивистских кварков.

Оценивая перспективность этих поисков, следует иметь в виду два существенных замечания, высказанных на конференции в Алма-Ате в октябре 1966 г.

Первое замечание принадлежит С. Н. Вернову, отметившему, что поиски кварков в космических лучах на небольших высотах могут рассчитывать на успех только, если кварки не являются сильно взаимодействующими частицами. Только в этом случае первичные кварки, падающие на границу атмосферы, могут остаться в потоке космических лучей, прошедшем до уровня наблюдения много ядерных пробегов в веществе. С другой стороны, только в этом случае, как подчеркивалось выше, они могут и генерироваться в атмосфере обычными частицами космических лучей. Поэтому отрицательный результат поисков, отраженных в таблице, может только значить, что кварки взаимодействуют сильно и искать их нужно на гораздо бо́льших высотах.

Второе замечание, высказанное Н. Л. Григоровым, подчеркивает, что отрицательный результат поисков медленных кварков в воде и воздухе [11], если даваемые в этой работе верхние пределы содержания кварков верны, означает также и ничтожную малость потока быстрых кварков в первичных космических лучах. В самом деле, замедляясь, стабильные кварки не исчезают, а сохраняются в почве и в атмосфере. За время существования земной коры, $T \sim 10^9$ *лет* $\sim 3 \cdot 10^{16}$ *сек*, при потоке $2\pi I_q$ кварков в секунду на 1 *см*^{2}, на каждый квадратный сантиметр земной поверхности должно было упасть $2\pi I_q \cdot T \sim 2 \cdot 10^{17} I_q$ кварков. Перемешиваясь в почве или в воде океана, они должны были бы дать, например, в море, если принять

среднюю глубину равной 1 *км* = 10^5 *см*, около

$$\frac{2\cdot 10^{17} I_q}{10^5\cdot 6\cdot 10^{23}\cdot \frac{1}{18}\cdot 18} \sim 3\cdot 10^{-12} I_q$$

кварков на один стабильный барион. Согласно измерениям [14] это число не превышает $3\cdot 10^{-29}$. Следовательно,

$$I_q < 10^{-17}\ см^{-2} сек^{-1}\ стер^{-1}.$$

Если же кварки замедляются в атмосфере и остаются в ней, аналогичные рассуждения дают подобную же цифру. Однако эти цифры отнюдь не являются безусловными. При обработке результатов измерений в упомянутой работе [11] были использованы многочисленные предположения, которые могут привести к занижению Q и, следовательно, приведенной только что оценки для I_q на неопределенное число порядков. Не говоря уже о том, что сами физико-химические методы отбора материала (например, испарение морской воды) могут приводить к понижению концентрации кварков в испытанных образцах, в других пунктах также можно указать возможные источники подобных ошибок (подробнее см. [21]). Сами авторы этой статьи говорят о том, что работа продолжается. Заметим, что более фундаментальные исследования, в котором были предприняты поиски кварков в крупинках угля [22], дают пока гораздо более высокие пределы для Q. Выводимый из них верхний предел для I_q столь еще велик, что в интересующем нас аспекте может не приниматься во внимание.

Таким образом, по мере развития исследований накапливаются отрицательные свидетельства. Они усиливают точку зрения, согласно которой кварки — лишь математический вспомогательный образ, а не реальные частицы, способные существовать независимо. Но проблема столь фундаментально важна, что она должна быть экспериментально исследована до конца.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, УФН **86**, 303 (1965).
2. T. Massam, Th. Muller, A. Zichichi, Nuovo Cimento **40**, 589 (1965).
3. В. М. Максименко, И. Н. Сисакян, Е. Л. Фейнберг, Д. С. Чернавский, Письма, ЖЭТФ **3**, 340 (1966).
4. С. З. Беленький, Л. Д. Ландау, УФН **56**, 309 (1955).
5. G. Domokos, T. Fulton, Phys. Letts **20**, 546 (1966).
6. R. Hagedorn, Nuovo Cimento **35**, 216 (1965).
7. И. Н. Сисакян, Е. Л. Фейнберг, Д. С. Чернавский, Доклад, представленный на Международную конференцию по физике элементарных частиц в Беркли (сентябрь 1966 г.); Препринт ФИАН, № 101; ЖЭТФ **52**, 545 (1967).
8. F. Chilton, D. Horn, R. J. Jabbur, Preprint Argonne National Laboratory, май 1966.
9. A. N. Maheshwari, E. Schonberg, Препринт EFINS 66—63, июнь 1966.
10. Я. Б. Зельдович, Л. Б. Окунь, С. Б. Пикельнер, УФН **87**, 113 (1965).
11. Я. Б. Зельдович, УФН **89**, 647 (1966).
12. Е. Л. Фейнберг, Письма, ЖЭТФ **3**, 497 (1966).
13. В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский, Происхождение космических лучей, М., Изд-во АН СССР, 1962.
14. W. A. Chupka, J. P. Schiffer, C. M. Stevens, Phys. Rev. Letts **17**, 60 (1966).

15. A. W. Sunyar, A. Z. Schwarzschild, P. I. Connors, Phys. Rev. **136B**, 1157 (1964).
16. T. Bowen et al., Phys. Rev. Letts **13**, 728 (1964).
17. D. A. De Lise, T. Bowen, Phys. Rev. **140**, 458 (1965).
18. A. Bühler-Broglin, G. Fortunato, T. Massam, Th. Muller, A. Zichichi, Preprint CERN, август 1966.
19. R. C. Lamb, R. A. Lundy, T. B. Novey, D. D. Yovanovitch, Preprint, июль 1966.
20. H. Kasha, L. B. Leipuner, R. K. Adair, Phys. Rev. **150**, 1140 (1966).
21. В. И. Манько, УФН **91**, 551 (1967).
22. В. Б. Брагинский, Я. Б. Зельдович, В. К. Мартынов, В. В. Мигулин, ЖЭТФ, в печати.