## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ (СОРОК ЛЕТ СПУСТЯ)

В.Л. Гинзбург

(Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва)

(Статья поступила 12.04.93 г.)

В 1953 г. в "УФН" была опубликована моя статья "Происхождение космических лучей и радиоастрономия" [1]. В ней был подведен известный итог деятельности, развернувшейся в СССР с 1951 г. (ссылки см. в [1]), посвященной нетепловому космическому радиоизлучению и в этой связи происхождению космических лучей. Последние были открыты задолго до этого — несколько условно в 1912 г. (см. [2]). Однако о выяснении происхождения космических лучей и развитии астрофизики космических лучей в целом до 1951—1953 гг. говорить не приходилось в силу практически полной изотропности первичных космических лучей у Земли (действие земного магнитного поля считается исключенным). В самом деле, изотропность приходящего излучения не дает возможности указать его источники и их пространственное распределение. Ситуация здесь аналогична той, которая имела бы место в оптической астрономии, если изучать лишь суммарный свет всех звезд и других небесных объектов. Поэтому-то установление связи между нетепловым космическим радиоизлучением и электронной компонентой космических лучей (речь идет о синхротронном излучении релятивистских электронов) в корне изменило дело стало ясно, где вдали от Земли находятся те или иные источники космических лучей. При этом, правда, приходится предполагать, что концентрация или плотность энергии основной протонно-ядерной компоненты космических лучей, скажем, пропорциональны соответствующим значениям для электронной компоненты. Нужно также, вообще говоря, знать напряженность магнитного поля в излучающей области. Это не помешало, тем не менее, далеко продвинуться на пути исследования космических лучей вдали от Земли, о чем подробно идет речь в обзорах [1—5]. Не будем здесь повторяться, ибо цель настоящей статьи иная — она написана в связи с тем, что только в начале 1993 г., через сорок лет после опубликования статьи [1], одно из основных сделанных в ней предположений было, наконец, доказано [6]. Имеется в виду предположение о галактическом, а не метагалактическом происхождении основной части космических лучей, наблюдаемых вблизи Земли (помимо этих космических лучей существует также весьма слабая солнечная компонента; кроме того, мы не касаемся относительно мало интенсивных космических лучей с очень высокой энергией, скажем, превышающей  $10^{15} - 10^{16}$  эВ). Статья [1] была написана в состоянии некоторой эйфории, связанной с прорывом в понимании всей проблемы, обусловленном привлечении радиоастрономических данных. Заканчивается статья [1] так:

"Таким образом, необходимо еще выяснить ряд существенных моментов, прежде чем проблема происхождения космических лучей сможет считаться ясной во всех ее аспектах. Но, как нам кажется, главное здесь уже сделано, и картина, нарисованная выше, не потерпит коренных изменений, подобно тому, как это имело место до недавнего времени, вплоть до использования для выяснения этого круга вопросов радиоастрономических методов.

С развитием радиоастрономии, а также космической электродинамики вопрос о происхождении космических лучей стал подлинно астрофизической проблемой и вышел из стадии по преимуществу гипотетических построений, которые нельзя было кон-

тролировать с помощью наблюдений. Поэтому, а также учитывая прогресс физики космических лучей, можно быть уверенным в том, что дальнейшее развитие теории происхождения космических лучей пойдет вперед быстрыми шагами".

В общем — все в этом заключении оказалось справедливым, кроме предсказания о быстром прогрессе. Точнее, нарисованная в [1] картина верна, но подлинных доказательств пришлось ждать долгие годы. Речь идет о трех ключевых положениях:

- 1. Справедлива галактическая, а не метагалактическая модель (теория).
- 2. Справедлива галактическая модель с большим гало или, во всяком случае, не дисковая модель, в которой космические лучи концентрируются в некотором диске с полутолщиной  $h_{\rm d} \sim 100$ —300 пк.
- 3. Основными источниками космических лучей в Галактике являются сверхновые звезды.

Эти вопросы, кроме последнего, в [1] были смазаны, но в дальнейшем активно обсуждались (см. [2—5] и указанную там литературу).

В отношении доминирующей роли сверхновых звезд (положение 3), по сравнению с [1], мало что изменилось. В самом деле, приводились два аргумента. Во-первых, энерговыделение в сверхновых велико и его вполне может хватать для ускорения нужного количества космических лучей. Конкретно, среднее энерговыделение при вспышке одной сверхновой равно  $W_{\rm sn} \sim 10^{19} - 10^{11}$  эрг без учета энергии, уносимой нейтрино (для сверхновой SN 1987A энерговыделение в нейтрино составляло величину порядка 10<sup>в</sup> эрг). Если, как считается, сверхновые в Галактике вспыхивают в среднем каждые  $t_{\rm sn} \sim 30$  лет, то средняя мощность (светимость) Галактики в космических лучах может составлять  $L_{ ext{G,cr}} \sim W_{ ext{SN}}/t_{ ext{SN}} \sim$  $\sim \! 10^{\!\!\!\! 40} - 10^{\!\!\!\! 42}$  эрг/с. Оценка же светимости  $L_{\scriptscriptstyle \mathrm{G,cr}}$  из соображений баланса (см., например, [5], гл. 1) приводит к значениям  $(1-5) \cdot 10^{40}$  эрг/с. Во-вторых, как ясно из радиоастрономических данных, в оболочках сверхновых, несомненно, имеются космические лучи, причем их полная энергия значительна (подробнее см, [3], табл. 7). Эти соображения полностью остаются в силе. Кроме того, энерговыделение для других классов звезд, вообще говоря, существенно меньше необходимого. Наконец, помимо сверхновых трудно, если не невозможно, ускорить частицы до энергий, скажем, порядка 10<sup>в</sup> эВ. Новый важный элемент, выяснившийся в 1977 г. и позже, это ускорение на фронтах ударных волн (см. [5], гл. 10). Такие волны, причем наиболее мощные, образуются как раз в результате вспышек сверхновых. Тем не менее, вопрос об ускорении космических лучей звездами разных типов, конечно, остается. Даже если

вклад этих звезд в общий энергетический баланс мал (или даже крайне мал), соответствующие космические лучи могут играть заметную роль вблизи звезды (именно такова ситуация в случае Солнца). Итак, проблема источников остается, но она лежит, можно сказать, в плоскости уточнения модели происхождения космических лучей, а не ее основ.

Перейдем к вопросу о гало, т.е. протяженной области, окружающей диск спиральной Галактики, в которой плотность энергии космических лучей и радиояркость более или менее значительны. В первом случае речь идет о гало космических лучей, а во втором — о радиогало. Это разные понятия, поскольку яркость радиогало, а тем самым и его эффективные размеры зависят как от концентрации релятивистских электронов, так и от напряженности магнитного поля. Поэтому мыслимы ситуации, когда радиогало невелико, а гало космических лучей весьма значительно. С физической точки зрения существование некоторого гало, или, как иногда говорят, короны, очевидно. В самом деле, как хорошо известно, хотя бы из практики термоядерных исследований, удержать заряженные частицы в ловушках (токамаках и других) весьма трудно. Что же говорить о естественных "ловушках", несравненно менее совершенных? Поэтому ясно, что магнитные поля и космические лучи выходят из диска галактик и, в частности, нашей Галактики. Выходит в каком-то количестве и межзвездная плазма. Непосредственно наблюдать мы можем в первую очередь лишь радиогало (впрочем, реальна и возможность наблюдения гамма-гало; см. [5], гл. 6). Но в случае Галактики наблюдения гало и, в частности, радиогало существенно осложнены в связи с тем, что мы (наблюдатели на Земле) находимся внутри "системы". В результате проблема радиогало Галактики оказалась противоречивой и вызвала яростные споры [7]. Вообще, можно сказать, что вопросу о гало не повезло (это дало мне основание назвать проблему гало многоликой и многострадальной [8]), в связи с чем долгие годы часто игнорировалась и модель происхождения космических лучей с большим гало. Положение изменилось лишь в 1977 г., когда были наблюдены ярко выраженные радиогало для видимых "с ребра" галактик NGC 4631 и NGC 891 [9, 10]. Кстати, радиогало галактики NGC 4631 пытались, по моему предположению, найти еще раньше [11], но безуспешно (этот результат казался обескураживающим; дело было, видимо, просто в недостаточной чувствительности аппаратуры). Конечно, существование радиогало по крайней мере у ряда галактик [9, 10, 12] еще ничего непосредственного не говорит о гало Галактики. Однако отпали общие сомнения, касающиеся радиогало, и в совокупности с данными для самой Галактики (см. [5], гл. 5) это привело, насколько знаю, к ликвидации споров о гало. По моему убеждению, восходящему еще к статье [1], только галактическая модель происхождения космических лучей с гало и даже достаточно большим гало (характерный размер  $R_{\rm h} \sim 10 \, {\rm km k}$ ) заслуживает внимания в качестве некоторой физической модели. Дисковые же модели (в частности, так называемая "leaky-box", или однородная модель) имеют лишь вспомогательное значение, так как позволяют легче проводить ряд расчетов (см. [5], гл. 3). Вместе с тем нужно заметить, что параметры гало Галактики известны плохо, их уточнение актуально. Пока же приходится упрощать задачу, делать предположения и только после этого развивать теорию происхождения космических лучей в модели с гало [5].

Теперь перейдем, наконец, к вопросу об опровержении метагалактических моделей, что автоматически означает необходимость использовать галактическую модель (альтернативы здесь нет, ибо обсуждавшаяся когда-то солнечная модель, в которой космические лучи сконцентрированы в некоторой околосолнечной области, давно опровергнуты; см., например, [3]. На первом этапе основное возражение против метагалактических моделей носило энергетический характер. Средняя характерная плотность энергии космических лучей в Галактике

$$w_{\rm G, cr} \sim 10^{-12} \, \rm spr/cm^3$$
. (1)

При радиусе гало  $R_{\rm h} \sim 10~{\rm kmk} \sim 3 \cdot 10^{22}~{\rm cm}$  объем "системы" (галокосмических лучей)  $V_{\rm h} \sim (4\pi/3)~R_{\rm h}^3 \sim 10^{68}~{\rm cm}^3$ , полная энергия космических лучей в Галактике  $W_{\rm G,cr} \sim 10^{56}~{\rm эрr} \sim 10^2 M_{\odot}~c^2$ . Отвечающая космическим лучам масса  $M_{\rm cr} \sim 10^2~M_{\odot} \sim 10^{35}~{\rm r}$  ничтожна по сравнению с массой Галактики  $M_{\rm g} \sim 10^{11}~{\rm x} \times M_{\odot} \sim 10^{44}~{\rm r}$ . Однако кинетическая энергия хаотического (пекулярного) движения всех звезд порядка  $K_{\rm g} \sim 10^{11} M_{\odot} v_0^2 \sim 10^{56}~{\rm эрr} \sim W_{\rm g,cr}$ , поскольку  $v_0 \sim 10^6~{\rm cm/c}$ . В метагалактической модели космические лучи более или менее равномерно заполняют всю Метагалактику, т.е. (по крайней мере, для параметра красного смещения z < 1)

$$w_{\rm Mg, \, cr} \approx w_{\rm G, \, cr} \approx 10^{-12} \, {\rm spr/cm}^3.$$
 (2)

Такой плотности отвечает огромная энергия (например, в объеме с радиусом всего в 1 Мпк  $W_{\rm Mg,cr} \sim 10^{62}$  эрг), ее трудно генерировать. Этот вопрос довольно подробно обсуждался в книге [3]. Здесь достаточно отметить, что в рамках эволюционной космологии, в которой сейчас нет сомнений, естественным представляется соблюдение неравенства

$$w_{\rm Mg, \, cr} << w_{\rm G, \, cr} \sim 10^{-12} \, {\rm spr/cm}^3,$$
 (3)

и конкретно, вероятно,  $w_{Mg, cr} \leq 10^{-15} - 10^{-16}$  эрг/см<sup>3</sup>. Но у метагалактических моделей имелись [13] и, возможно, имеются сторонники.

В любом случае желательно непосредственно доказать справедливость неравенства (3) и тем самым опровергнуть метагалактические модели.

Первый реальный успех на этом пути связан с открытием в 1965 г. метагалактического реликтового теплового излучения с температурой 2,7 К. Плотность энергии этого излучения  $w_{ph.T} \approx 4 \cdot 10^{-13}$ эрг/см<sup>3</sup>. Релятивистские электроны, движущиеся в поле излучения и магнитном поле с напряженностью Я, претерпевают потери энергии (соответственно на обратный эффект Комитета и синхротронное излучение), пропорциональные  $w_{ph,T} + (H^2/8\pi)$ . В результате, как легко показать (см. [5], гл. I), электроны с энергией  $E_{e} \ge 10^{10}$  эВ, а возможно, и  $E_e > 10^9$  эВ не смогут дойти до Галактики и, особенно, до солнечной системы, даже от ближайшей радиогалактики Центавр А (расстояние  $R \approx 4 \, \text{Мпк}$ ). При рассеянии на межгалактических фотонах реликтового излучения электроны генерируют рентгеновское и гамма-излучение. Интенсивность этого излучения, если бы электроны в Метагалактике присутствовали с такими же интенсивностью и спектром, как в Галактике, была бы значительно выше наблюдаемой [30]. Таким образом, электронная компонента космических лучей в Галактике, по крайней мере, при не слишком малых энергиях должна иметь галактическое происхождение. Отсюда, естественно, что то же относится и к протонно-ядерной компоненте [14].

Тем не менее особенно желательно непосредственно доказать справедливость неравенства (3). Сделать это можно двумя способами. Во-первых, речь идет об измерениях потока гамма-лучей от Магеллановых Облаков [15,16]. Во-вторых, — об измерениях также гамма-астрономическим методом градиента концентрации космических лучей в Галактике [17]. Действительно, в галактической модели плотность энергии к периферии Галактики должна убывать и переходить к значению  $w_{\text{Mg,cr}}$ . Такие измерения, или, точнее, соответствующая обработка гамма-данных, уже производились. Некоторые указания на наличие градиента интенсивности космических лучей получены, но в целом данные на этот счет еще недостаточно определенны ([5], гл. 1 и 6). Что же касается гамма-излучения от Магеллановых Облаков, то оно в самое последнее время измерено [6, 18, 19], что, собственно, и послужило поводом написать настоящую статью.

Соударения космических лучей — протонов и ядер с ядрами межзвездного газа — порождают  $\pi^0$ -мезо-

ны, которые практически мгновенно распадаются с образованием двух гамма-фотонов (канал  $\pi^0 \to 2\gamma$ ). Если  $\pi^0$ -мезон покоится, то энергия фотонов  $E_{\gamma} = (1/2) m_{\pi 0} c^2 = 67,5 \text{ МэВ. В случае } \pi^0$ -мезонов, образованных космическими лучами, генерируется, конечно, некоторый гамма-спектр. Очевидно, интенсивность гамма-лучей пропорциональна интенсивности космических лучей  $J_{\rm cr}$ . Поэтому, измеряя поток  $F_{\mathbf{v}}$  от некоторого источника, содержащего газ (молекулярное облако, галактика), мы получаем сведения о  $J_{\rm cr}$ . Конкретно, поток  $F_{\rm v}(>E_{\rm v})$  гамма-лучей с энергией больше  $E_{\gamma}$  от удаленного дискретного источника, находящегося на расстоянии R, равен (подробнее см. [20], гл. 18)

$$F_{\gamma} (> E_{\gamma}) = \frac{(\overline{\sigma J_{\rm cr}})N(V)}{R^2}, \tag{4}$$

$$\overline{q}_{\gamma} = \overline{(\sigma J_{\rm cr})} = \int_{E_{\gamma}}^{\infty} \sigma(E_{\gamma}, E) J_{\rm cr}(E) dE,$$

 $\sigma(E_{\gamma}, E)$  — сечение образования гамма-фотона с энергией  $E_{\mathbf{v}}$  от космических лучей с энергией E и N(V) — полное число частиц (ядер) газа в источнике. Из гамма-астрономических данных для космических лучей в Галактике

$$\overline{q}_{\gamma, G} = \overline{(\sigma J_{\text{cr, G}})} \approx 2 \cdot 10^{-26} \frac{1}{\text{c} \cdot \text{cp}},$$
 (5)

хотя в литературе встречаются и несколько иные значения [20]. В [16] мы принимали, что  $\bar{q}_{\nu_{\rm G}} =$ = 1 • 10<sup>-∞</sup> . Если справедлива метагалактическая модель, то в стационарной картине нужно считать, что в Магеллановых Облаках  $J_{\mbox{\tiny cr}} = J_{\mbox{\tiny cr},\mbox{\tiny G}}$  и таким образом мы можем предсказать значение  $F(>E_{\gamma})$  для Большого Магелланова Облака (LMC) и для Малого Облака (SMC). По расчетам [16] (с удвоением значения  $\overline{q}_{v}$   $_{\mathbf{G}}$ )

$$F_{\gamma, \text{ LMC}}(E_g > 100 \text{ M} \text{ BB}) \approx 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{фотонов}}{\text{см}^2 \text{ c}},$$
 (6a)

$$F_{\gamma, \text{ SMC}} (E_{\gamma} > 100 \text{ M} \text{ pB}) \approx 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{фотонов}}{\text{cm}^2 \text{ c}} \cdot (66)$$

В [21] принимаются несколько иные параметры для LMC, а именно, R = 52 кпк, масса нейтрального водорода  $M_{\rm HI}=5,1$  •  $10^8 M_{\odot}$  , масса молекул  ${
m H_2}$  положена равной  $\pmb{M}_{\mathbf{H_2}} = 1,0 \cdot 10^s \pmb{M}_{\odot}$  , что дает значение (определено из графика)

$$F_{\gamma, \text{ LMC}}(E_{\gamma} > 100M) \approx 5.5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{фотонов}}{\text{cm}^2 \text{ c}}$$
 (7)

ница, ибо в литературе чаще используют обозначение  $q_{\gamma}/4\pi$  вместо  $q_{\gamma}$ ; в [21] написано, что  $q_{\gamma}/4\pi = 2 \cdot 10^{-26}$  атом  $^{-1}$  с $^{-1}$ , но, видимо, опущена

размерность  $cp^{-1}$ .)

В [18] приводится без пояснений значение  $F_{\gamma, \text{ LMC}} (E_{\gamma} > 100 \text{ MэВ}) = (2.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-7}$ . Как можно понять из [21], такое значение отличается от (7) в силу использования величины  $\overline{q}_{\gamma, G} = 1,6 \cdot 10^{-26}$ и занижения (на фактор 1/3) количества газа в LMC. Согласно наблюдениям [18]

$$F_{\gamma, \text{ LMC}}(E_{\gamma} > 100 \text{ M} \ni \text{B}) = (1.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-7} \frac{\text{фотонов}}{\text{cm}^2 \text{ c}} \cdot (8)$$

Большое Магелланово Облако — активная Галактика, в ней вспыхивали сверхновые. Поэтому, как нужно думать, в LMC заведомо генерируются космические лучи. Тем самым возможный вклад метагалактической компоненты меньше (8). А само значение (8) и без того уже в 2—3 раза меньше потока (7).

Еще более разительна ситуация в случае SMC. По наблюдениям [6]:

$$F_{\gamma, \text{SMC}}(E_{\gamma} > 100\text{M} \ni \text{B}) < 0.5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{фотонов}}{\text{cm}^2 \text{ c}} \cdot$$
 (9)

Это, по крайней мере, в 4 раза меньше значения (6б) и в 5 раз меньше, чем расчетная величина, приводимая в [6],

$$F_{\gamma,\text{SMC}}(E_{\gamma} > 100\text{M} \ni \text{B}) = (2.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-7} \frac{\text{фотонов}}{\text{cm}^2 \text{c}} \cdot (10)$$

Упомянем о возможности уточнить сопоставление расчетов с наблюдениями, используя соотношение

$$\Delta = \frac{F_{\gamma, \text{ SMC}}(> E_{\gamma})}{F_{\gamma, \text{ LMC}}(> E_{\gamma})} = \frac{N_{\text{SMC}}/R_{\text{SMC}}^2}{N_{\text{LMC}}/R_{\text{LMC}}^2} =$$

$$= \frac{\Phi_{21}(\text{SMC})}{\Phi_{21}(\text{LMC})}.$$
(11)

Здесь предполагается, что, в согласии с метагалактической моделью, интенсивности космических лучей в SMC и LMC одинаковы, а  $\Phi_{\scriptscriptstyle 21}$  — наблюдаемые потоки радиоизлучения на волне 21 см. Точнее, потоки нужно скорректировать с учетом реабсорбции в самих облаках. Соответствующие данные [22] приводят к значению  $\Delta = 0.85$ , вместо ориентировочных значений  $\Delta = 0.56$  и  $\Delta = 0.68$ , приведенных в [16]. Ошибки при определении потоков  $\Phi_{_{21}}$  таковы, что предельные значения равны соответственно 0,54 и 1,36. По данным о гамма-лучах, согласно (8) и (9),  $\Delta < 0.25 - 0.33$ , и таким образом использование соотношения (11) также не находится в согласии с метагалактической моделью.

В общем, все приведенные результаты свидетельствуют о том, что в Магеллановых Облаках равенство (2) не соблюдается и тем самым метагалактическая модель не подтверждается. Равенство (2) могло

бы нарушаться в нестационарных условиях. Конкретно, если из Облака дует сильный ветер, то космические лучи будут частично "выдуваться" (на эту возможность обратил мое внимание В.С. Птускин). В случае SMC, которое считается нестационарным [6,23], такая возможность заслуживает анализа. Однако LMC стационарно [24], и здесь для предположения о "выдувании" совсем уж нет оснований. Разумеется, будут производиться уточнения как расчетов, так, возможно, и наблюдений. По наблюдениям GRO удастся, вероятно, определить и градиент интенсивности космических лучей в Галактике. Но, думаю, метагалактическую модель уже сейчас можно считать надежно опровергнутой.

Тем самым, завершается обоснование галактической модели происхождения космических лучей, принятой в [1]. Прошло 40 лет! Конечно, за эти годы сделано многое [4,5], но в целом мы имеем пример того, как долго нужно иногда ждать, чтобы стереть с физической картины белые пятна.

Обсуждение проблемы происхождения космических лучей, ее состояния, перспектив и задач развития не входит в задачу настоящей статьи (на этот счет см., в частности, [4,5]). Уместно, тем не менее, сделать на этот счет два заключительных замечания. Начиная с 1983 г. [25] появился ряд сообщений о наблюдении гамма-лучей  $E_{\nu} > 10^{14} - 10^{15}$  эВ от ряда источников и в первую очередь от источника Лебедь Х-3 (обзор см. [5], гл. 7). Эти сообщения вызвали некоторый энтузиазм, и указания на недостоверность имеющихся данных в известной мере игнорировались. Однако измерения последнего времени (см., например, [26, 27]) не подтверждают утверждений о наличии заметного гамма-излучения с энергией  $E_{\gamma} > 10^{14} \ \mathrm{эB} = 100 \ \mathrm{T}\mathrm{эB}. \ \mathrm{B}$ принципе, не исключено, что ранее наблюдались какие-то спорадические процессы, но, скорее всего, речь шла об ошибках. Сейчас строятся все большие установки для наблюдения ШАЛ (широких атмосферных ливней) с площадью, достигающей 5 • 10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>. С их помощью вопрос о потоке гамма-лучей с  $E_{\nu} > 10^{14}$  эВ будет, очевидно, прояснен. Но того драматизма в этой области, который намечался и был отражен, например, в [4,5], ожидать, по-видимому, не приходится.

Второе замечание касается космических лучей с энергией  $E > 10^{15} - 10^{16}$  эВ. При  $E \sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ в спектре наблюдается "излом". В неплохом приближении интенсивность  $J_{\rm cr}(E < 3 \cdot 10^{15}) \bowtie E^{-2.7}$  и  $J_{\rm cr}(E > 3 \cdot 10^{15}) \bowtie E^{-3}$  вплоть до энергии  $E \sim 10^{19}$  эВ. Затем спектр становится положе и продолжается без обрыва до энергии  $E \sim 10^{10}$  эВ. Заметим, что частиц с энергией большей  $10^{10}$  эВ крайне мало: согласно

[28]  $J_{cr}(E > 10^{20} \text{эВ}) = (3 \pm 2) \cdot 10^{-16} \text{частиц/м}^2 \text{с • ср},$  что отвечает попаданию за столетие одной частицы на площадь в 1 км² в телесном угле в 1 стерадиан.

Каковы природа "излома" и происхождение космическихлучей за "изломом", т.е. при  $E \ge 3 \cdot 10^{16}$  эВ? Вот главный неясный принципиальный вопрос в области астрофизики космических лучей. Здесь возможно как галактическое, так и метагалактическое происхождение. Недавно, например, обсуждена модель, в которой все космические лучи за "изломом" образуются в активных галактических ядрах [29]. Правда, при этом речь идет о протонах, между тем как химический состав космических лучей сверхвысоких энергий неясен. Ряд сведений о таких космических лучах и их возможных источниках проведен в [5] (гл. 4). На существенный прогресс в этой области можно надеяться только с запуском очень больших установок для регистрации ШАЛ с целью надежного определения спектра, химсостава и анизотропии первичных частиц со сверхвысокой энергией. Сколько для этого еще понадобится времени? Все же можно надеяться, что к столетнему юбилею (к 2012 г.) со времени открытия космических лучей задача будет в основном решена.

Пользуюсь возможностью поблагодарить В.С. Птускина за советы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Гинзбург В.Л.* УФН, 1953, 51, 343; нем. перевод: Fortschr. Phys. 1954, 1, 659; см. также: Nuovo Cimento. Suppl. 1956, 3, 38
- 2. Гинзбург В.Л. УФН. 1978, 124, 307.
- 3. *Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И.* Происхождение космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1963; дополн. англ. перевод: Origin of Cosmic *Rays*. Pergmnon Press, 1964.
- 4. Гинзбург В.Л. УФН. 1988, 155, 185.
- 5. Березинский В.С., Буланов С.В., Гинзбург В.Л., Догель В.А., Птускин В. С. Астрофизика космических лучей. М.: Наука, 1990; англ. перевод: Astrophysics of Cosmic Rays. Amsterdam: North-Holland, 1990.
- 6. Sreekumar P. et al. Phys. Rev. Lett. 1993, 70, 127.
- 7. Radio Astronomy *and* the Galactic System. IAU Symp. 31. London; New York: Academic Press, 1967.
- 8. *Ginzburg V.L.* Essays on Particles and Fields. (M.G.K. Menon Festschrift). Bengalore: Indian Acad. Sci., 1989.
- 9. Ekers R.D., Sancisi R. Astron. and Astrophys. 1977, 54, 973.
- 10. Alien R.J., Baldwin J.E., Sancisi R. Astron. and Astrophys. 1978, 62, 397.
- 11. Pooley G.G. Mon. Mot. RAS. 1969, 144, 143.
- 12. Sancisi R., and van der Kruit P.C. Origin of Cosmic Rays. IAU Symp. 94. Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1980. P. 209.
- 13. Burbidge G. Phil. Trans. R. Soc. 1975, A277, 481.
- 14. Ginzburg V.L. Phil. Trans. R. Soc. 1975, A277, 463.
- 15. *Ginzburg V.L.* Nature Phys. Sci. 1972, 239, 8.
- 16. Ginzburg V.L., Ptuskin V.S. J. Astrophys. and Astron. (India). 1984, 5, 99.
- Dodds D., Strong A. W., Wolfendale A.V. Mon. Not. Ras. 1975, 171, 569.
- 18. Sreekumar P. et al. Astrophys. J. (Lett.). 1992, 400, L67.
- 19. Maddox J. Nature. 1993, 361, 201.

- 20. *Гинзбург В.Л*, Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1987.
- 21. Chi X., Wolfendale A.W. Astrophys. J. (Lett). 1993 (inpress).
- 22. De Vaucouleurs G. et al. Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1991.
- 23. Sreekumar P., Fichtel C.E. Astron. and Astrophys. 1991, 251, 447.
- 24. Fichtel C.E. et al. Astrophys. J. 1991, 374, 134

- 25. Samorski M., Stamm W. Astrophys. J. 1983, 268, L17.
- 26. Amenomori M. et al. Phys. Rev. Lett. 1992, 69, 2468.
- 27. Alien W.H. et al. Astrophys. J. 1993, 403, 239.
- 28. Lawrence M.A., Reid R., Watson A.A. J. Phys. G: Nucl. and Part. Phys. 1991, 17, 733.
- 29. Protheroe R.J., Szabo A.B. Phys. Rev. Lett. 1992, 69, 2885.
- 30. Dar A., Laor A., Loeb A. Phys. Rev. Lett. (Comments). 1993 (in press).