1971 г. Март *Том 103, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

523.11

АНТИВЕЩЕСТВО И КОСМОЛОГИЯ *)

Дж. Стейгмен

Продукты аннигиляции. Стационарная модель. Модель Альвена — Клейна. Модель «большого взрыва». Несимметричная Вселенная.

Дирак, осуществив первым синтез теории относительности и квантовой механики, смог прийти к заключению, что частицы объединены в пары. Свойства частиц в таких парах следуют определенным правилам соответствия: массы их равны, электрические заряды (если частицы заряжены) противоположны, противоположные знаки имеют и все их квантовые числа. Наиболее существенно то, что при сближении обеих частиц пары они аннигилируют. Предсказания теории Дирака были полностью подтверждены в лабораторных экспериментах, и сейчас принято считать, что каждой частице соответствует античастица. Некоторые из частиц, такие, как фотон и нейтральный пион, совпадают со своими античастицами и называются истинно нейтральными.

К счастью для нас, Земля и Солнечная система построены из вещества только одного «типа». Было бы, однако, удивительным, если бы природа не использовала эту симметрию физических законов в масштабе Метагалактики и не создала Вселенную, состоящую из равного числа частиц и античастиц.

Недавно снова возродился интерес к зарядово-симметричным космологическим моделям [1, 2]. В этих моделях принимается, что Вселенная состоит из равных чисел частиц и античастиц, которые в «обычных условиях» разведены друг от друга. При встрече их в значительных количествах они аннигилируют и поставляют энергию для квазаров, сейфертовских галактик, радиогалактик и тому подобных объектов. Такие модели могут доставить научное и эстетическое удовлетворение, хотя ни одна из них пока еще не подтверждается наблюдениями.

Для обнаружения антивещества во Вселенной следовало бы «подождать», пока оно встретится с обычным веществом и проаннигилирует с ним, а затем поискать продукты аннигиляции. Нейтрино, по крайней мере в течение еще некоторого времени, обнаружить не удастся; электроны и позитроны не уйдут далеко от места своего возникновения и могут быть обнаружены лишь косвенным путем; таким образом, наилучшие шансы «наблюдать» антивещество предоставляет γ-излучение.

Оценка верхнего предела или прямые измерения потока γ-лучей позволяют установить предельную степень «смешения» вещества и антивещества. Действительно, недавние измерения этого потока [3–5] приводят к весьма четким ограничениям на возможное количество антивещества как в Галактике, так и в Метагалактике. На основе этих наблюдений мы далее проанализируем различные симметричные космологические модели.

*) J. Steigman, Antimatter and Cosmology, Nature 224, 477 (1969). Перевод В. И. Рыдника.

ПРОДУКТЫ АННИГИЛЯЦИИ

Свойства антивещества принципиально неотличимы от свойств вещества. Поэтому наилучшим способом установить присутствие антивещества является поиск продуктов его аннигиляции. Электрон-позитронная пара аннигилирует преимущественно с образованием двух γ-квантов (аннигиляция на $(n+2)$ γ-кванта менее вероятна в α^n раз, где $\alpha \approx 1/137$). Большинство актов аннигиляции происходит с частицами в покое, т. е. предварительно затормозившимися, и в результате возникает узкая γ-линия при энергии $E_\gamma = 0{,}51$ *Мэв*. Нуклон-антинуклонные пары аннигилируют преимущественно с образованием нескольких пионов [6-8]. В каждом акте аннигиляции при этом образуется, грубо говоря, примерно пять пионов, причем π^+, π^0 и π^- встречаются среди них примерно в равных количествах. Пионы затем на лету распадаются на мюоны и нейтрино по схеме $\pi^\pm \to \mu^\pm + \nu_\mu$, а мюоны в свою очередь на лету распадаются по схеме $\mu^\pm \to e^\pm + \nu_e + \nu_\mu$. В среднем каждая $e^\pm$-частица получает энергию около 100 *Мэв* в л. с. к. Нейтральный пион π^0 распадается на лету на два γ-кванта с энергиями, образующими спектр, простирающийся от нескольких десятков до нескольких сотен *Мэв* в л. с. к. Этот спектр имеет максимум примерно при 70 *Мэв*; в среднем γ-квант получает энергию около 180 *Мэв* [9, 10]. Если только аннигиляция не происходит в чрезвычайно плотных областях, γ-кванты и нейтрино вылетают за пределы области своего возникновения. Электроны и позитроны могут быть легко захвачены (магнитными полями) и растратят свою энергию там, где они возникли.

Из сказанного следует, что мы должны принять такую оценку: в каждом акте нуклон-антинуклонной аннигиляции образуется примерно 3—4 γ-кванта и около 10—20% энергии аннигиляции уносят релятивистские электроны и позитроны. Обнаружение нейтрино вряд ли осуществимо в предвидимом будущем, и мы далее их не будем рассматривать. В области, где вещество «перемешано» с антивеществом, скорость аннигиляции S в единице объема дается соотношением

$$S = n_+ n_- \sigma v, \tag{1}$$

где n_+ и n_- — соответственно плотности числа частиц и античастиц, v — их относительная скорость и σ — эффективное сечение аннигиляции. Сечение нуклон-антинуклонной аннигиляции было измерено для ряда энергий в диапазоне от ~ 25 *Мэв* до 7 *Гэв* [6, 11-17]. Во всем этом диапазоне $\sigma v \sim 10^{-15}$ *см*^{3}/*сек*. Если, однако, аннигилируют атомы и антиатомы и если $v \ll c$, то сечение аннигиляции будет значительно выше и может достигать атомных размеров. В этом случае для оценки можно принять $\sigma v \sim 10^{-10}$ *см*^{3}/*сек*.

Поток γ-излучения от аннигиляции в объеме dV на расстоянии R составляет

$$\frac{g_\gamma S\, dV}{4\pi R^2}, \tag{2}$$

где $g_\gamma S$ — скорость рождения γ-квантов в единице объема, g_γ — число квантов, возникающих в одном акте аннигиляции (как уже говорилось, $g_\gamma \sim 3$—4). Процессы аннигиляции в межгалактическом пространстве должны создавать изотропный поток γ-излучения, равный

$$\frac{dJ_\gamma}{d\Omega} = \frac{g_\gamma R_0}{4\pi} S_{\text{мг}} \text{ квантов/см}^2\text{сек}\cdot\text{стер}, \tag{3}$$

где $S_{\text{мг}}$ — скорость аннигиляции в межгалактическом пространстве, $R_0 = cH_0 \approx 10^{28}$ *см* — хаббловский радиус (H_0 — постоянная Хаббла). Анни-

гиляция в нашей Галактике создала бы линейный источник, расположенный в галактической плоскости, с потоком излучения

$$\frac{dJ_\gamma}{d\varphi} = \frac{g_\gamma R_\Gamma}{2\pi} S_\Gamma \text{ квантов/см}^2\text{сек}\cdot\text{рад}, \tag{4}$$

где S_Γ — скорость аннигиляции в Галактике, $R_\Gamma \approx 3\cdot 10^{22}$ *см* — радиус Галактики. Наконец, малый источник аннигиляционного излучения создает на рассоянии R поток

$$J_\gamma \approx \frac{g_\gamma}{4\pi}\frac{SV}{R^2} \text{ квантов/см}^2\text{сек}. \tag{5}$$

Недавно были измерены потоки квантов с энергиями $E_\gamma \gtrsim 100$ *Мэв* [3-5]. Для изотропного фонового излучения Кларк и др. [3] нашли

$$\frac{dJ_\gamma}{d\Omega} = (1{,}1 \pm 0{,}2)\cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}\text{стер}^{-1}.$$

Обе группы наблюдали линейный источник в плоскости Галактики с мощностью

$$\frac{dJ_\gamma}{d\varphi} = 2\cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}\text{рад}^{-1}.$$

Наконец, обе группы получили указание на существование источника в направлении на центр Галактики, с мощностью $J_\gamma \approx 10^{-4}$ *см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$.

Эти результаты мы можем использовать для установления верхнего предела скоростей нуклон-антинуклонной аннигиляции S в единице объема:

$$\left.\begin{array}{ll} S_{\text{мг}} \leqslant 4\cdot 10^{-32} \text{ актов/см}^3\text{сек} & \text{(межгалактическое пространство)}, \\ S_\Gamma \leqslant 10^{-26} \text{ актов/см}^3\text{сек} & \text{(Галактика)}, \\ SV_{\text{ц}} \lesssim 4\cdot 10^{41} \text{ актов/сек} & \text{(галактический центр)}. \end{array}\right\} \tag{6}$$

Рассмотрим сначала межгалактический газ. Если считать его ионизованным, то можно принять $\sigma v \sim 10^{-15}$ *см*^{3}/*сек*. Это дает $n_+ n_- \leqslant 4\cdot 10^{-17}$. Предполагая равенство чисел нуклонов и антинуклонов, находим $n_+ = n_- \leqslant 6\cdot 10^{-9}$ *см*$^{-3}$, так что в межгалактическом пространстве нельзя «набрать» массу, которую требует модель замкнутой Вселенной ($n_0 \approx 10^{-5}$ *см*$^{-3}$). И наоборот, в предположении зарядово-несимметричной и замкнутой Вселенной ($n_+ + n_- = n_0$) мы находим $n_- \lesssim 4\cdot 10^{-12}$ *см*$^{-3}$ и $n_+ \approx n_0$. Если, однако, межгалактический газ нейтрален, то $\sigma v \sim 10^{-10}$ *см*^{3}/*сек* и $n_+ n_- \leqslant 4\cdot 10^{-22}$. Если принять $n_+ = n_-$, то получается $n_+ \leqslant 2\cdot 10^{-11}$ *см*$^{-3}$ — величина, которая согласуется с оценкой верхнего предела плотности нейтрального межгалактического газа, полученной из факта отсутствия поглощения лаймановской H_α-линии в спектрах квазаров с сильными красными смещениями [19].

Наблюдения потока γ-излучения позволяют получить следующий предел для нейтральной межзвездной среды: $n_+ n_- \lesssim 10^{-16}$. При равных количествах вещества и антивещества тогда получается неприемлемая оценка $n_+ = n_- \leqslant 10^{-8}$ *см*$^{-3}$. При $n_+ + n_- \approx 1$ *см*$^{-3}$ мы имеем $n_- \leqslant 10^{-6}$ *см*$^{-3}$ и $n_+ \approx 1$ *см*$^{-3}$, что соответствует массе антивещества $M \lesssim 10^{-5} M_\odot$. Мы, таким образом, вынуждены заключить, что межзвездный газ состоит почти исключительно из вещества одного «типа».

Предполагая, что источник в галактическом центре имеет аннигиляционную природу, имеем $SV = \sigma v n_+ n_- V \lesssim 4\cdot 10^{41}$ *актов/сек*. Принимая $n_+ \sigma v \sim 10^{-10}$ *сек*$^{-1}$, находим для количества аннигилирующего антивещества всего лишь $M_- \sim 3\cdot 10^{-6} M_\odot$. При этом скорость «выгорания»

вещества, выраженная через потерю массы, составляет

$$\frac{dM}{dt} \approx 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}.$$

Исключить такую возможность крайне трудно, хотя и очень нелегко понять, как антивещество вообще могло «выжить» на ранних стадиях эволюции Галактики, еще до того, как образовались плотные объекты и когда аннигиляция шла со скоростью, значительно превышающей темпы галактической эволюции. Этот вопрос недавно обсуждался Хойлом [20].

Высказывалось соображение, что квазары, радиогалактики, сейфертовские галактики и подобные им объекты черпают энергию из процессов аннигиляции [1, 2, 21, 30]. Как уже говорилось, в каждом акте аннигиляции электроны и позитроны получают энергию около 100 *Мэв* или в сумме примерно $\varepsilon \sim 3 \cdot 10^{-4}$ *эрг*. Энергия, «оседающая» в аннигиляционном объеме в единицу времени, составляет

$$\frac{dE}{dt} = \varepsilon S \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3\text{сек}}. \tag{7}$$

Если принять, что эти электроны и позитроны ответственны за все прочие виды излучений упомянутых объектов (инфракрасное излучение, радиоизлучение и т. п.), то между потоком γ-лучей (выраженным в числе квантов в *см*^{2}*сек*) и потоком всех других излучений (выраженным в *эрг* на *см*^{2}*сек*) существует соотношение

$$J_{\gamma} \approx 10^4 J_{\text{проч}}. \tag{8}$$

Иными словами, в каждом акте аннигиляции возникает g_{γ} жестких γ-квантов, и релятивистские электроны и позитроны уносят ε *эрг*. Имея оценку для скорости «оседания» энергии в таких объектах ($V\, dE/dt$), можно затем найти ожидаемый поток γ-излучения

$$J_{\gamma} \approx \frac{10^4}{4\pi R^2} V \frac{dE}{dt}. \tag{9}$$

Фрай и Ван [22] применили эти соображения к анализу квазара 3С 273. Они получили верхний предел для наблюдаемого потока γ-излучения, втрое меньший предсказываемого значения. В самом деле, для тех квазаров, которые излучают с мощностью $\sim 10^{48}$ *эрг/сек*, ожидаемый поток γ-лучей превышает 10^{-5} *квантов/см*^{2}*сек*. Такие потоки могут быть обнаружены с помощью современной техники, и их отсутствие следует рассматривать как аргумент против аннигиляционной гипотезы их возникновения. Действительно, любой источник, излучающий примерно более чем 10^{-9} *эрг/см*^{2}*·сек*, можно было бы также зарегистрировать и в диапазоне γ-лучей, независимо от расстояния до него, при условии, что источником энергии в нем являются процессы аннигиляции. Следует отметить, что эту трудность можно было бы обойти, если ввести возможное поглощение γ-излучения в самом источнике.

До сих пор мы рассматривали γ-излучение, возникающее при аннигиляции нуклонов и антинуклонов. Однако можно полагать, что легче было бы обнаружить эмиссионную γ-линию при 0,51 *Мэв* от электрон-позитронной аннигиляции. К сожалению, поток космического γ-излучения резко растет с понижением энергии его квантов. Вследствие этого более низкий предел обнаружения имеет γ-излучение от распада π^0-мезона, нежели от $e^+ - e^-$-аннигиляции.

Учитывая результаты этого раздела, обратимся к анализу в рамках предположения о зарядово-симметричной Вселенной стационарной космологической модели [23], модели Альвена — Клейна [1, 24, 25] и модели «большого взрыва» [26–29].

СТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ

В модели «непрерывного творения» (пар частица — античастица) временна́я зависимость плотностей n_+ и n_- дается уравнением

$$\frac{dn_\pm}{dt} = q - 3H_0 n_\pm - \sigma v n_+ n_-, \tag{10}$$

где q — скорость рождения пар в единице объема. Второй член в правой части (10) отвечает уменьшению плотности из-за расширения Вселенной; постоянную Хаббла можно взять равной примерно 10^{10} год$^{-1}$. Последний член в правой части (10) отвечает потере частиц вследствие аннигиляции при предположении, что частицы и античастицы «перемешаны» друг с другом.

Полная плотность частиц $n = n_+ + n_-$ в зависимости от времени изменяется по уравнению

$$\frac{dn}{dt} = \left[2q + \frac{\sigma v (\Delta n)^2}{2}\right] - 3H_0 n - \frac{\sigma v n^2}{2}, \tag{11}$$

где $\Delta n = n_+ - n_-$.

В стационарной модели для Метагалактики $dn_\pm/dt = 0$, так что $\Delta n = 0$ и

$$q = \frac{3}{2} H_0 n_0 + S_{\text{мг}} \approx 0{,}5 \cdot 10^{-22}\ \text{см}^{-3}\text{сек}^{-1}, \tag{12}$$

где $n_0 = 10^{-5}$ *см*$^{-3}$ — плотность частиц, предсказываемая этой моделью [23]. Если пренебречь любым пока не обнаруженным метагалактическим излучением высокой плотности, то значение n_0 отвечает замкнутой Вселенной. Из измерений космического γ-излучения, как уже говорилось, найдено, что $S_{\text{мг}} \leqslant 4 \cdot 10^{-32}$. Тогда из (12) видно, что величина q определяется лишь расширением Вселенной и практически не зависит от процессов аннигиляции.

Обратимся теперь к нашей Галактике. Для нее

$$S_{\text{Г}} = \sigma v n_+ n_- = \frac{1}{4} \sigma v \left[n^2 - (\Delta n)^2\right] \leqslant 10^{-26}\ \text{см}^{-3}\text{сек}^{-1}. \tag{13}$$

Поскольку $\sigma v \gtrsim 10^{-15}$ *см*^{3}/*сек*, современное значение Δn, несомненно, должно быть порядка $n \sim 1$ *см*$^{-3}$. Величина Δn есть константа, но не равная нулю. Уравнение для dn/dt в отсутствие какого бы то ни было расширения принимает вид

$$\frac{dn}{dt} = \left[2q + \frac{\sigma v (\Delta n)^2}{2}\right] - \frac{\sigma v n^2}{2}. \tag{14}$$

Решение уравнения (14) при начальном условии $n(t=0) = n_0$ есть

$$n(t) = \left(\frac{A}{B}\right)^{1/2} \frac{De^{t/\tau} - 1}{De^{t/\tau} + 1}, \tag{15}$$

где

$$A = 2q + \frac{\sigma v (\Delta n)^2}{2}, \qquad B = \frac{\sigma v}{2}, \qquad D = \frac{A^{1/2} + B^{1/2} n_0}{A^{1/2} - B^{1/2} n_0}, \qquad \tau = \frac{1}{(4AB)^{1/2}}.$$

Поскольку $\sigma v (\Delta n)^2 \gtrsim 10^{-15}$, то $A \approx B$, $\tau \approx 1/\sigma v \Delta n \leqslant 10^{15}$ *сек*. При $t \gg \tau$ стационарное состояние будет иметь место, если скорость процессов аннигиляции равна скорости творения пар. Тогда в итоге мы получаем

$$S_{\text{Г}} = \frac{1}{4} \sigma v \left[n^2 - (\Delta n)^2\right] = \sigma v n_+ n_- = q. \tag{16}$$

Но из этого следует, что $q \lesssim 10^{-26}$ *см*$^{-3}$ *сек*$^{-1}$, что на четыре порядка меньше значения, требуемого для сохранения постоянной плотности вещества в Метагалактике.

Таким образом, мы приходит к заключению, что если бы вещество (и антивещество) возникало в нашей Галактике со скоростью, требуемой стационарной космологической моделью, то мы должны были бы зарегистрировать на четыре порядка более мощный поток γ-излучения, чем наблюдается в действительности. Это затруднение можно обойти двумя путями. Во-первых, можно считать, что вещество и антивещество создаются порознь, каждое в области, где находится соответственно вещество и антивещество; это позволило бы избегнуть процессов аннигиляции. Такое предположение, однако, равносильно постулированию нового физического закона. При этом каждый акт творения частицы локально нарушает закон сохранения барионного числа. Неважно, что в масштабах Вселенной этот закон мог бы выполняться: из-за конечной скорости распространения света любой нелокальный закон сохранения просто вообще не будет законом сохранения. Альтернатива состоит в том, чтобы «упрятать» акты творения частиц в плотные области, например, в галактические ядра, где аннигиляционное излучение целиком бы поглощалось и потому никогда бы не регистрировалось. Последнее предположение было высказано Хойлом [20]. Пока совершенно не ясно, каким путем можно подтвердить или отвергнуть эти соображения.

МОДЕЛЬ АЛЬВЕНА — КЛЕЙНА

Космологическая модель Альвена — Клейна строго зарядово-симметрична [1, 24, 25]. Вкратце, начальное состояние Вселенной в ней предполагается в виде разреженного облака, состоящего из равных количеств протонов, электронов и их античастиц. Это облако, имевшее вначале крайне малую плотность, сгущается вследствие взаимного гравитационного притяжения частиц. По мере роста плотности аннигиляция начинает играть все бо́льшую роль как источник излучения. Это излучение предотвращает коллапс, и благодаря ему сжатие сменяется расширением в современную эпоху. Во избежание превращения всего вещества и антивещества в излучение в период формирования галактик вводится процесс, аналогичный электролизу: «первичное» магнитное поле разводит вещество и антивещество. Вследствие большой скорости такого процесса эта модель приводит к заключению, что наполовину вещество в каждой (в том числе и в нашей) галактике в действительности есть антивещество. Теория Альвена — Клейна вызывает множество возражений; некоторые из них будут приведены ниже.

Из этой модели следует, что размеры Вселенной в «точке поворота» — момент, когда ее сжатие сменяется расширением, — должны быть в пределах гравитационного радиуса, но это означает, что они никогда не могли бы быть достигнуты. Вместе с тем трудно представить, как радиационное давление могло бы затормозить сжатие и привести к «точке поворота», поскольку средний свободный пробег излучения в течение всего процесса сжатия больше радиуса Вселенной. Даже если оставить этот довод в стороне, все равно можно доказать, что в отсутствие Λ-члена и без полей с отрицательной плотностью энергии никогда нельзя получить однородной, изотропной и коллапсирующей Вселенной [31]. В теории Альвена — Клейна предполагается, что образование галактик и отдельных звезд происходит в период, когда плотность вещества Метагалактики достигает максимума или близка к нему; но это было бы верным, лишь если принять, что давление излучения достаточно велико для того, чтобы начать «разду-

вать» Вселенную в «точке поворота». Поэтому весьма трудно понять, как галактики и звезды могли формироваться в столь «зыбких» условиях. Далее, в рамках этой модели нельзя придумать механизм, который мог бы создать реликтовое излучение. Для разделения вещества и антивещества в количествах порядка $M_\odot$ в масштабах Галактики ($\sim 10^{23}$ *см*) необходимы очень сильные магнитные поля ($\sim 1-100$ *гс*); такие поля до сих пор не наблюдались. Наконец,— по поводу утверждения о том, что половина нашей Галактики состоит из антивещества. Как уже говорилось, наблюдаемый поток космического γ-излучения накладывает жесткие ограничения на количества «смешивающихся» вещества и антивещества. В теории утверждается, что области вещества и антивещества не контактируют вследствие «конденсаторного» эффекта. Вольтьер [32], однако, указал, что в галактическом диске наблюдается крупномасштабное фарадеевское вращение. «Пятнистое» распределение вещества и антивещества стремилось бы смазать любые крупномасштабные эффекты.

Хотя и есть защитники космологической модели Альвена — Клейна, все же при ближайшем рассмотрении оказывается, что она вызывает проблем больше, чем решает. Приведенные выше соображения показывают, что, по крайней мере в ее современном виде, эта модель неприемлема.

МОДЕЛЬ «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА»

Теория происхождения Вселенной в результате «большого взрыва», предложенная впервые Гамовым [33], была неожиданно подтверждена открытием реликтового излучения [34-37]. В своем «каноническом» виде эта теория зарядово-несимметрична и, может быть, является сильнейшей поддержкой тому мнению, что Вселенная в действительности содержит разные количества вещества и антивещества.

Изложим вкратце соображения в пользу этого мнения, высказанные независимо друг от друга Зельдовичем [38] и Чью [39]. При высокой температуре ($kT \gg Mc^2$) и плотности вещества антивещество и излучение находятся в равновесии; это равновесие обеспечивается балансом процессов аннигиляции и рождения пар:

$$n_\pm = \left[n_p^2 + \left(\frac{\Delta n}{2}\right)^2\right]^{1/2} \pm \frac{\Delta n}{2}, \tag{17}$$

где n_p — равновесная плотность частиц при температуре T, Δn — плотность барионного числа. При адиабатическом расширении Вселенной (VT^3 — const) $n_p \to 0$ по экспоненте и $n \to |\Delta n|$. Если Вселенная с самого начала была зарядово-симметрична, то $\Delta n = 0$ и $n_p \to 0$. В действительности же, однако, прежде чем это случится, скорость аннигиляции станет ничтожно малой, и в результате сохранятся некоторые количества нуклонов и антинуклонов. Это «замораживание» нуклонов произойдет на очень ранней стадии, спустя $\sim 10^{-3}-10^{-2}$ *сек* после сингулярности, когда на каждую частицу еще приходится примерно 10^{18} квантов, т. е.

$$\left(\frac{n}{n_\gamma}\right)_0 \approx 10^{-18}. \tag{18}$$

Поскольку $n_\gamma \sim (kT/hc)^3$, число квантов N_γ в объеме Вселенной V ($N_\gamma = n_\gamma V$) остается при ее расширении неизменным. После «замораживания» в этом объеме остаются постоянными также количества нуклонов и антинуклонов:

$$\left(\frac{N}{N_\gamma}\right)_{\text{сейчас}} = \left(\frac{n}{n_\gamma}\right)_{\text{сейчас}} = \left(\frac{n}{n_\gamma}\right)_0 \approx 10^{-18}. \tag{19}$$

Известно, однако, что в настоящее время $n > 10^{-7}$ *см*$^{-3}$ и $n_\gamma \sim 10^3$ *см*$^{-3}$, так что на самом деле $(n/n_\gamma)_{\text{сейчас}} \gtrsim 10^{-10}$. В таком случае мы приходим к заключению, что если Вселенная была зарядово-симметричной, она должна была бы содержать примерно в 10^8 (а может быть, даже в 10^{10}) раз больше излучения, чем это наблюдается. Чтобы обойти эту «радиационную катастрофу», мы должны признать, что для зарядовой симметрии нет места в модели «большого взрыва».

Возможное решение этой дилеммы предложил Гаррисон [26-29]. Он предположил, что в первоначально сконденсированном состоянии Вселенной существовали пространственные флуктуации барионного числа ΔN. Аннигиляция только усиливала эту первоначальную неоднородность ($\Delta N_{\text{тогда}} = \Delta N_{\text{сейчас}} \pm N_{\text{сейчас}}$) вследствие сохранения барионного числа. Но тогда приходится отказаться от изолированных друг от друга областей вещества и антивещества. Если допустить, что эти флуктуации имели место тогда, когда вещество, антивещество и излучение находились в равновесии, то мы получим $N_{\text{тогда}} \approx (N_\gamma)_{\text{тогда}} = (n_\gamma)_{\text{сейчас}}$, так что

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\text{тогда}} = \left(\frac{N}{N_\gamma}\right)_{\text{сейчас}} = \left(\frac{n}{n_\gamma}\right)_{\text{сейчас}} \approx 10^{-9}. \tag{20}$$

В результате первоначально слабая пространственная неоднородность $\Delta N/N \sim 10^{-9}$ могла бы разрастись благодаря процессам аннигиляции до значения $(\Delta N/N)_{\text{сейчас}} = \pm 1$. Гаррисон поэтому заключил, что в действительности Вселенная зарядово-симметрична, а первоначальные пространственные неоднородности приводят к двум «удачным» следствиям. Они предотвращают «радиационную катастрофу» и вместе с тем создают области разделенных вещества и антивещества, что позволяет сформироваться галактикам. Как известно [40], построить галактики в рамках модели «большого взрыва» очень трудно; для этого нужны огромные флуктуации плотности ($\delta\rho/\rho \sim 10^{-3}$). Если использовать исключительно эффективный механизм усиления неоднородностей процессами аннигиляции, то для формирования галактик можно взять значительно более слабые флуктуации плотности барионов.

Следует подчеркнуть, однако, что даже столь малые флуктуации не имеют статистического характера. В самом деле, если $\Delta N \sim N^{1/2}$, то $N \sim 10^{18}$ частиц, что по массе составляет 10^{-6} *г*. Альтернативно можно задаться вопросом, сколь велика наибольшая возможная флуктуация. Мы имеем

$$\Delta N_{\text{тогда}} \sim N^{1/2}_{\text{тогда}} \sim (N_\gamma)^{1/2}_{\text{тогда}} \sim (N_\gamma)^{1/2}_{\text{сейчас}} \approx 10^{44}, \tag{21}$$

так что первоначальная флуктуация должна была быть $(\Delta N/N)_{\text{тогда}} \sim 10^{-44}$. Поэтому даже казалось бы достаточно малые флуктуации $\Delta N/N \sim 10^{-9}$ должны иметь нестатистическое происхождение.

Попытка обнаружить такие неоднородности была недавно предпринята Омнесом [2]. Сделав ряд довольно грубых допущений, он заявил, что смог «отделить» вещество от антивещества. Однако его работа вызывает ряд серьезных возражений. Омнес принял, что при высоких температурах рождение и аннигиляцию пар можно рассматривать как малозначительные эффекты. В действительности же это процессы, которые устанавливают равновесие между веществом, антивеществом и излучением. Далее, при столь высоких плотностях процессы аннигиляции пар совершенно неизбежны. Сечение аннигиляции нуклонов и антинуклонов известно в широком интервале энергий примерно от 25 *Мэв* до 7 *Гэв* и во всем этом интервале $(\sigma v)_{\text{анн}} \sim 10^{-15}$ *см*^{3}/*сек*; отношение же времени аннигиляции $\tau_{\text{анн}} = 1/n(t)(\sigma v)_{\text{анн}}$ к возрасту Вселенной $\tau_{\text{анн}}/t \sim 10^{15}/t \ll 1$. Кроме того,

даже если допустить, что может существовать способ подавить сильные взаимодействия, а с ними и нуклон-антинуклонную аннигиляцию, перед нами все равно останутся электромагнитные взаимодействия. Для аннигиляции протона и антипротона на два γ-кванта $(\sigma v)_{эм} \sim 2 \cdot 10^{-21}$ *см*^{3}/*сек* и $\tau_{анн}/t \sim 10^9/t \ll 1$.

В теории Омнеса отделить нуклоны от антинуклонов действительно можно было бы, приняв, что они взаимодействуют как непроницаемые друг для друга шары. Это, однако, находится в противоречии с результатами экспериментов по нуклон-нуклонному рассеянию [11–17]; последние вполне удовлетворительно объясняются феноменологической теорией [41, 42], в которой для представления короткодействующего нуклон-антинуклонного взаимодействия используется модель поглощающего керна. В области применимости этой теории $100 \leqslant E \leqslant 1000$ *Мэв* нуклоны не отталкивают, а наоборот, притягивают антинуклоны на малых расстояниях, и этот вывод подтверждается на опыте.

Поэтому нам представляется, что эффективный механизм разделения вещества и антивещества во Вселенной пока еще не найден. Такой механизм должен был бы работать на ранней стадии эволюции Вселенной ($t \leqslant 10^{-3}$ *сек*), когда температура и плотность еще очень велики ($kT \geqslant 10^2 - 10^3$ *Мэв*). Без этого разделения зарядово-симметричная модель «большого взрыва» приводит к «радиационной катастрофе».

НЕСИММЕТРИЧНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Как уже говорилось, свойства антивещества неотличимы от свойств вещества — будь то атом или звезда; поэтому наиболее прямым методом определить присутствие антивещества является обнаружение продуктов аннигиляции. Мы уже показали, что наблюдаемые потоки γ-лучей позволяют установить пределы количеству «смешиваемого» вещества и антивещества. Мы привели соответствующие наблюдательные данные и указали те пределы, которые ими устанавливаются.

В стационарной космологической модели приходится допускать творение пар частица — античастица. Альтернативой этому может служить допущение, что каждый акт творения частицы нарушает законы физики, установленные в «земных» экспериментах. Однако измерения космического γ-излучения дали результаты, которые, по существу, запрещают, чтобы эти акты творения были равномерно распределены по всему пространству. Эти результаты требуют, чтобы акты творения происходили в областях высокой плотности, непрозрачных для возникающих при последующей аннигиляции γ-лучей. Именно такое предположение было сделано Хойлом [20]. В противном случае зарядово-симметричную Вселенную в рамках стационарной модели построить нельзя.

В рамках любой другой космологической модели с «началом», наподобие модели «большого взрыва», соответствующие заключения не столь категоричны. Так, можно допускать, что Вселенная зарядово-несимметрична потому, что были несимметричными условия в начале ее эволюции. В самом деле, мы уже видели, что симметричные начальные условия приводят к «радиационной катастрофе». Поэтому можно было бы предположить, что вначале существовал «ансамбль вселенных». Те из них, что были симметричными, «переполнены» излучением, и их нельзя отождествлять с «нашей» Вселенной, которую следует отнести к «первоначально несимметричным». При подобном подходе никаких нарушений известных законов физики не будет.

Такая ситуация аналогична, например, существующей в электродинамике. Уравнения Максвелла симметричны относительно обращения

времени, однако при специфических граничных условиях (например, для уходящих сферических волн) они могут давать решения, несимметричные относительно знака времени. Если же требовать зарядово-симметричной Вселенной с самого начала, то для нее еще надо найти эффективный нестатистический механизм разделения частиц и античастиц на ранней стадии ее эволюции, когда температура и плотность еще высоки. В противном случае содержание излучения во Вселенной будет на 8—10 порядков больше, чем в «нашей» Вселенной.

Институт теоретической астрономии,
Кембридж

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. Alfvén, A. Elvius, Science **164**, 911 (1969).
2. R. Omnés, Phys. Rev. Lett. **23**, 38 (1969).
3. G. W. Clark, G. P. Garmire, W. L. Kraushaar, Ap. J. Lett. **153**, L203 (1968).
4. G. W. Clark, G. P. Garmire, W. L. Kraushaar, IAU Symp. **37** (ed. by L. Gratton) (1970).
5. C. E. Fichtel, D. A. Kiffen, H. B. Ogelman, IAU Symp. **37** (ed. by L. Gratton) (1970).
6. L. E. Agnew, Jr., et al., Phys. Rev. **118**, 1371 (1960).
7. G. G. Fazio, Ann. Rev. Astron. Ap. **5**, 481 (1967).
8. S. Benedetti, Nuclear Interactions, J. Wiley, N. Y., 1964, p. 509.
9. G. M. Frye, L. H. Smith, Phys. Rev. Lett. **17**, 733 (1966).
10. F. W. Stecker, Smithsonian Astrophysical Observatory Spec. Rept. 261 (1967).
11. J. G. Locken, M. Derrick, Phys. Lett. **3**, 334 (1963).
12. K. Bockmann et al., Nuovo Cimento **42A**, 954 (1966).
13. T. Ferbel et al., Nuovo Cimento **38**, 12 (1965).
14. A. G. Ekspong, B. E. Ronne, Nuovo Cimento **13**, 27 (1959).
15. B. Cork et al., Phys. Rev. **107**, 248 (1957).
16. C. A. Coombes et al., Phys. Rev. **112**, 1303 (1958).
17. B. Cork, et al., Nuovo Cimento **25**, 497 (1962).
18. G. Steigman, Thesis (New York University, 1968).
19. G. Burbidge, M. Burbidge, Quasi-Stellar Objects, W. H. Freeman and Co., 1967, p. 145.
20. F. Hoyle, Nature **224**, 477 (1969).
21. G. R. Burbidge, F. Hoyle, Nuovo Cimento **4**, 558 (1956).
22. G. M. Frye, C. P. Wang, Canad. J. Phys. **46**, S488 (1968).
23. F. Hoyle, J. V. Narlikar, Proc. Roy. Soc. **A273**, 1 (1963).
24. H. Alfvén, O. Klein, Arkiv för Fysik **23**, 187 (1962).
25. H. Alfvén, Rev. Mod. Phys. **37**, 652 (1965).
26. E. R. Harrison, Phys. Rev. Lett. **18**, 1011 (1967).
27. E. R. Harrison, Rev. Mod. Phys. **39**, 862 (1967).
28. E. R. Harrison, Phys. Rev. **167**, 1170 (1968).
29. E. R. Harrison, Physics Today **21** (No. 6), 3 (1968).
30. E. Teller, Perspectives in Modern Physics, ed. by R. E. Marshak, Interscience Press, 1966, p. 449.
31. S. Hawking, G. F. R. Ellis, Ap. J. **151**, 25 (1968).
32. L. Woltjer, IAU Symp. **31**, 480 (1967).
33. G. Gamow, Phys. Rev. **70**, 572 (1946).
34. A. A. Panzias, R. W. Wilson, Ap. J. **142**, 420 (1965).
35. P. G. Roll, D. T. Wilkinson, Phys. Rev. Lett. **16**, 405 (1966).
36. G. B. Field, J. L. Hitchcock, Phys. Rev. Lett. **16**, 817 (1966).
37. P. Thaddens, J. F. Clauser, Phys. Rev. Lett. **16**, 819 (1966).
38. Ya. B. Zeldovich, Adv. Astron. Ap. **3**, 241 (1965).
39. H. Y. Chiu, Phys. Rev. Lett. **17**, 712 (1966).
40. G. B. Field, Ap. J. **142**, 531 (1965).
41. J. S. Ball, G. F. Chew, Phys. Rev. **109**, 1385 (1958).
42. Z. Koba, G. Takeda, Progr. Theor. Phys. **19**, 269 (1958).