

### § 9. Идеальный газ с учетом взаимного превращения частиц

Выше был рассмотрен газ, состоящий только из нейтронов. Основанием для этого были расчеты «нейтронизации», т. е. обратного бета-процесса:

$$e^- + p = n + \nu.$$

Напомним, что при ядерной плотности расчет приводил к выводу, что равновесная концентрация электронов и протонов составляет меньше 1% общей концентрации частиц. Этот результат есть следствие того факта, что при рассматриваемой плотности электроны являются релятивистскими, их энергия много больше энергии, соответствующей массе покоя, и в то же время нейтроны и протоны еще не являются релятивистскими, их энергия практически не отличается от энергии, соответствующей массе покоя. Однако когда и нейтроны становятся релятивистскими, их энергия и соответствующий химический потенциал растут, равновесие снова сдвигается в написанной формуле влево в сторону увеличения числа электронов и протонов. Взаимодействие между нейтронами, в частности, их отталкивание на малых расстояниях (т. е. при плотностях, превышающих ядерную), также влияет на химический потенциал нейтронов. Вообще полагают, что отталкивание на малых расстояниях есть общее свойство каждой пары барионов ( $n - n$ ,  $p - p$ ,  $\Lambda - n$  и т. д.). В этом случае химические потенциалы, соответствующие каждому типу барионов, должны компенсировать друг друга в уравнении, описывающем трансформацию одного типа барионов в другой для каждой реакции (эти уравнения обсуждаются ниже).

Выше мы особенно подчеркивали существование ядер (не свободных протонов), «разбрызганных» по нейтронному газу, когда плотность газа меньше ядерной. В противоположном случае высокой нейтронной плотности протоны могут быть однородно растворены в плотной нейтронной жидкости. Для статического состояния звезды нейтрино и антинейтрино можно считать свободно выходящими. Следовательно, их концентрация и ферми-энергия равна нулю. Отсюда условие равновесия для написанной выше реакции является условием для химических потенциалов:

$$\mu_p + \mu_e = \mu_n. \quad (6.9.1)$$

Но для холодного ферми-газа химический потенциал совпадает с ферми-энергией.

Плотность массы покоя и концентрация  $n$  определяются суммой концентраций протонов и нейтронов. Обозначим

$$n_p = \alpha n, \quad n_n = (1 - \alpha)n. \quad (6.9.2)$$

Далее необходимо удовлетворить условию электронейтральности. Это значит, что

$$n_{e^-} = n_p = \alpha n.$$

В ферми-энергию следует включить массу покоя, в ультрарелятивистском случае мы пренебрежем ею (при меньшей плотности разумно пренебречь массой покоя электрона и разностью масс покоя протона и нейтрона, но не самой массой покоя). Уравнение (6.9.1) для химических потенциалов (в ультрарелятивистском пределе) даст

$$m_0 c^2 (\alpha \chi)^{1/3} + m_0 c^2 (\alpha \chi)^{1/3} = m_0 c^2 [(1 - \alpha) \chi]^{1/3}, \quad (6.9.3)$$

откуда следует

$$8\alpha = 1 - \alpha, \quad \alpha = \frac{1}{9}, \quad 1 - \alpha = \frac{8}{9}.$$

Таким образом, в равновесии оказывается 88,9%  $n$ , 11,1%  $p$  (среди барионов) и электроны, плотность которых равна плотности протонов. Значит, при монотонном изменении плотности доля протонов и электронов проходит через глубокий минимум. Действительно, при совсем низких давлениях в равновесии число нейтронов и протонов примерно одинаково и  $\alpha \sim 50\%$  \*), а при ядерной плотности, как мы видели в § 5,6 этой главы,  $\alpha \sim 10^{-3}$ . В соответствии с общими принципами термодинамики (Ле-Шателье — Браун), превращение части нейтронов обратно в протоны и электроны несколько снижает давление при данном  $\chi$ . Обозначая посредством  $P_n$  давление чистых нейтронов, найдем

$$P = [\alpha^{4/3} + \alpha^{4/3} + (1 - \alpha)^{4/3}] P_n = 0,96 P_n.$$

Асимптотический закон зависимости давления от плотности покоя меняется только за счет множителя 0,96; показатель степени и выражение для скорости звука  $a_{зв} = \frac{c}{\sqrt{3}}$  не меняется. В давление необходимо включать эффект взаимодействия (отталкивание); как уже было показано, это увеличивает скорость звука.

Амбарцумян и Саакян (1960) первые и притом весьма обстоятельно рассмотрели ситуацию, которая возникает в связи с тем, что современная физика значительно расширила ассортимент элементарных частиц. Наряду с нейтроном, протоном и электроном, в принципе, следует рассматривать мюоны ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ), пионы ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ), каоны ( $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ ) и разнообразные барионы  $\Lambda$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$ .... Общие принципы написания условий равновесия те же, что и в рассмотренном выше элементарном примере.

\*) Точнее, для железа  $Fe_{26}^{56}$ ,  $\alpha = \frac{26}{56} = 46,3\%$ ;  $1 - \alpha = \frac{30}{56} = 53,7\%$ .

Можно показать, однако, что нет надобности выписывать соотношения между химическими потенциалами (ферми-энергиями), соответствующие всем возможным реакциям превращения частиц. Превращения частиц удовлетворяют двум законам: закону сохранения барионного заряда \*) и закону сохранения электрического заряда. Закон сохранения нейтринного заряда в рассматриваемой задаче не играет роли, поскольку  $\nu$  и  $\bar{\nu}$ , по предположению, свободно покидают систему.

Положим для любой частицы  $r$

$$\mu_r = aq_{er} + bq_{br}, \quad (6.9.4)$$

где  $q_{er}$  — электрический заряд, а  $q_{br}$  — барионный заряд частицы.

Коэффициенты  $a$  и  $b$  одинаковы для всех разнообразных видов частиц, находящихся в системе. Легко убедиться, что в таком случае для любой реакции, например,

$$r_1 + r_2 = r_3 + r_4,$$

для которой выполняются законы сохранения

$$\left. \begin{aligned} q_{e1} + q_{e2} &= q_{e3} + q_{e4}, \\ q_{b1} + q_{b2} &= q_{b3} + q_{b4}, \end{aligned} \right\} \quad (6.9.5)$$

при выполнении (6.9.4) тождественно выполняется и условие равновесия

$$\mu_1 + \mu_2 = \mu_3 + \mu_4. \quad (6.9.6)$$

Зная химический потенциал данного сорта частиц, элементарно находим их концентрацию. Таким образом, полный состав равновесной смеси, состоящей из большого числа компонент, выражается только через два параметра,  $a$  и  $b$ .

Условие электронейтральности фиксирует значение  $a$ : легко убедиться, что увеличивая  $a$ , мы увеличиваем концентрацию положительно заряженных частиц и уменьшаем концентрацию отрицательных.

При каждом  $b$  есть  $a_0(b)$ , дающее электронейтральный состав. Его барионная плотность зависит монотонно от одного параметра  $b$  и, таким образом, легко интерполяцией найти равновесный состав для любого  $\rho_0$ .

Отметим только две особенности решения при нулевой температуре:

1) для фермионов в случае  $\mu_r < m_r c^2$  соответствующие частицы ( $r$ ) полностью отсутствуют в равновесии;

\*) С учетом всех перечисленных типов частиц, сохранение барионного заряда означает, что постоянна сумма чисел  $n, p, \Lambda, \dots, \Xi \dots$  (концентрация частиц обозначается той же буквой).

2) для бозонов ( $\pi$ -,  $K$ -мезонов) в предположении полного отсутствия взаимодействия концентрация также равна нулю при  $\mu_r < m_r c^2$ . При наличии концентрации этих частиц  $r > 0$ ,  $\mu_r \equiv m_r c^2$  и от количества  $r$  не зависит  $\mu_r$ . Это следует из того, что бозоны (без взаимодействия!) все находятся в основном состоянии, т. е. покоятся.

Из первого свойства следует, что по мере роста  $\rho_0$  отдельные типы частиц включаются при определенных пороговых плотностях. Из второго свойства следует, что в равновесной системе совершенно отсутствуют нейтральные мезоны: при  $q_{er} = 0$ ,  $q_{br} = 0$  видим  $\mu_r = 0$ , а значит, и  $r = 0$ .

Далее ясно, что существование  $\pi^-$  делает невозможным существование  $K^-$  и любых других более тяжелых отрицательных мезонов. Тем более запрещено существование положительных мезонов, а также позитронов и антибарионов.

Отметим, что закон сохранения странности (или так называемого гиперзаряда) не должен учитываться в расчетах; действительно, этот закон относится к сильным взаимодействиям, происходящим за время столкновения частиц  $10^{-20}$  сек и меньше. Однако за время  $\sim 10^{-8}$  сек (малое даже по масштабу не-

стационарных явлений в звездах) процессы с изменением странности вполне успевают пройти. Равновесный состав в зависимости от  $\rho_0$ , см., например, в работе Амбарцумяна и Саакяна (1963).

Были проделаны аналогичные расчеты с другими наборами частиц (Камерон, 1959а). Общие свойства решения мало отличаются от упрощенных систем ( $n$ ;  $pre^-$ ), рассмотренных выше. Обзор см. Саакян (1974).

Недавно были выполнены вычисления, более точно учитывающие вклад ядерных сил [Немес, Шпрунг (1968)]. Основной результат состоит в том, что вследствие нейтрон-протонного притяжения концентрация протонов при данной плотности выше, чем предполагалось до этого; например, протонная концентрация составляет

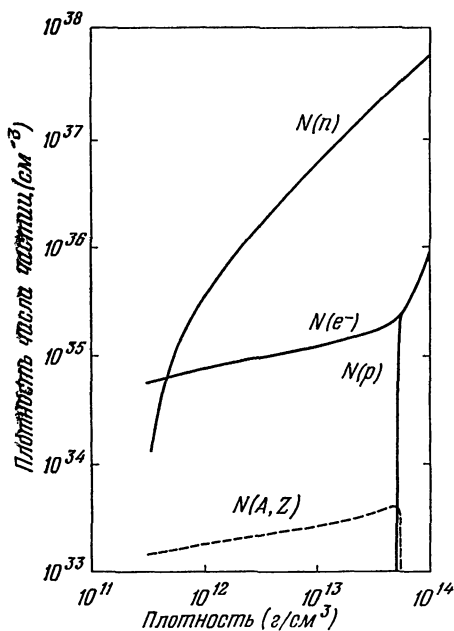


Рис. 30а. Концентрации нейтронов, электронов, протонов и ядер в равновесных условиях в зависимости от плотности (по Камерону, 1970).

приблизительно 4% от нейтронной концентрации при  $\rho \sim 3 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3$ . Отрицательные мюоны начинают появляться раньше, при  $\rho \sim 1,5 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3$ . При низких плотностях цитированные выше вычисления не корректны; очевидно, что при плотностях, много меньших ядерной, материя не представляет собой однородный раствор протонов (или даже пар протонов) в нейтронной жидкости, скорее, это обогащенная нейтронами смесь сложных ядер и свободных нейтронов. Зависимость плотности частиц от  $\rho$ , взятая из обзора Камерона (1970) приведена на рис. 306.

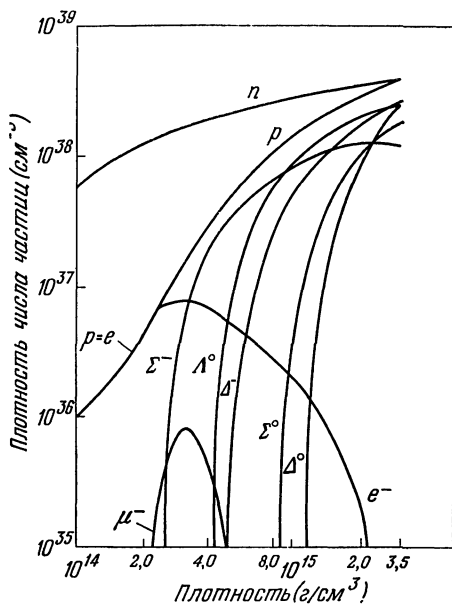


Рис. 306. Концентрации лептонов и барионов в зависимости от плотности (по Камерону, 1970).

зависит на малых расстояниях только от барионного заряда. В этом случае число частиц не изменяется, но общее давление увеличивается на величину, зависящую от взаимодействия. Упомянутые выше результаты ( $P = \text{const } \rho_0^{4/3}$  и величина постоянной) справедливы в этом случае только для кинетической части давления. О свойствах вещества, важных для теории пульсаров, см. раздел III.

## § 10. Все ли «элементарные» частицы элементарны?

Рассмотрение 8, 18 или даже большего числа барионов и резонансов [см., например, обзоры Розенфельда и др. (1965); Зельдовича (1965)] как независимых сортов элементарных частиц представляется неестественным любому здравомыслящему физическому. До недавнего времени резонансы рассматривались как возбужденные «состояния» обычных барионов. Более радикальная точка зрения заключается в том, что все барионы (как обычные, так и резонансы) представляют собой сложные системы, состоящие из трех более фундаментальных частиц — кварков.

При рассмотрении определенного конечного числа сортов невзаимодействующих частиц асимптотически  $P =$

$$= \text{const } \rho_0^{4/3}, \quad a_{\text{эв}} \rightarrow \frac{c}{\sqrt{3}}.$$

Давление и плотность энергии только меньше, чем для нейтронного газа, в отношении  $N^{-1/3}$ , где  $N$  — число сортов барионов. Предположим, что взаимодействие, в частности, отталкивание за-