

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 ρ , взятая из обзора Камерона (1970) приведена на рис. 306.

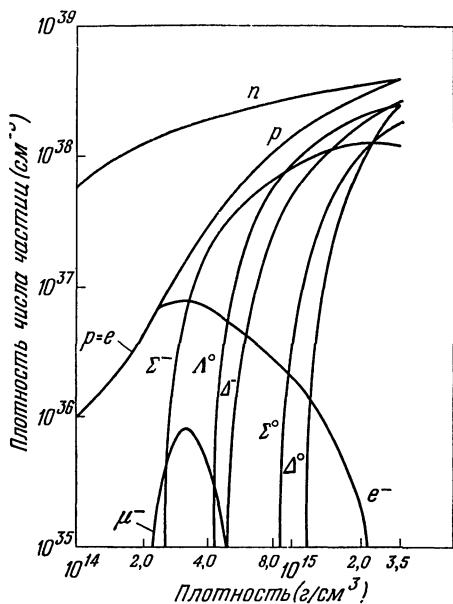


Рис. 306. Концентрации лептонов и барионов в зависимости от плотности (по Камерону, 1970).

висит 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-

В обоих случаях при сверхвысокой плотности, когда объем, приходящийся на частицу, становится меньше собственного объема частицы (которая является составной и имеет свою пространственную структуру), заведомо нельзя рассматривать частицы как элементарные.

Можно предположить, например, что в пределе, когда полная кинетическая (ферми) энергия вырожденных барионов на один кварк станет много больше энергии связи кварков *), можно будет рассматривать сжатое вещество как кварковый газ.

В этом случае асимптотически получим равное число кварков всех трех типов, $n_1 = n_2 = n_3$ **). При этом каждое число равно n -барионной плотности, поскольку один барион состоит из трех кварков. Значит, асимптотически давление в этой модели при данной плотности массы покоя втрое больше давления идеального нейтронного газа (и, конечно, оно больше, чем давление, вычисленное для смеси различных резонансов).

На первый взгляд, этот результат противоречит общему принципу Ле-Шателье — Брауна; в предыдущем разделе подчеркивалось, что с учетом превращения частиц давление обязательно ниже давления идеального нейтронного газа P_n . Нет ли внутреннего противоречия или ошибки в кварковой модели с $P_q = 3P_n$? Вопрос об асимптотике давления составных частиц был рассмотрен в работе одного из авторов [Зельдович (1965)].

Оказалось, что если частицы (в данном случае нейтроны) являются составными (из кварков), то нельзя рассматривать их как невзаимодействующие, — они отталкиваются; это отталкивание является следствием принципа Паули для кварков.

Идеальный нейтронный газ большой плотности в этом случае не является физически допустимым состоянием, поэтому нет и нарушения принципа Ле-Шателье — Брауна.

С 1967 года идея физических кварков с дробными зарядами $(+\frac{2}{3}e, -\frac{1}{3}e, -\frac{1}{3}e)$ поблекла. Экспериментальные поиски не подтвердили существование кварков ни в космических лучах [Каша и Стефанский (1968); Бондарев и др. (1968); Гармайер и др. (1968), Ландсберг], ни в экспериментах на ускорителях [Беллами и др. (1968); Росс и др. (1967)], ни в небольших количествах в покое в обычной материи [Брагинский и др., (1967); Стоувер и др. (1967)], ни в солнечной фотосфере [Ликок и др. (1968)].

Между тем, космология предсказывает существование заметного количества первичных, реликтовых кварков, если, конечно, кварки вообще существуют (см. гл. 18 Релятивистской астрофизики).

*) Речь идет о связи между собой трех кварков, образующих барион.

***) (n_1) : заряд $+\frac{1}{3}$, странность 0 (p);
 (n_2) : заряд $-\frac{1}{3}$, странность 0 (n);
 (n_3) : заряд $-\frac{1}{3}$, странность -1 (λ).

Детальные теоретические исследования возможной структуры барионов, как состоящих из кварков, также привели к трудностям [Брагинский и др. (1967)]. Все это вместе является веским аргументом против существования дробно-заряженных кварков.

Имеются более сложные схемы с девятью различными типами кварков с целочисленными зарядами. Доказать их или опровергнуть еще труднее. Поэтому термодинамику кварков следует рассматривать как иллюстрацию принципов, а не как необходимое описание действительности.

§ 11. Электромагнитное взаимодействие частиц

Можно ли что-нибудь сказать об уравнении состояния при наличии взаимодействия между частицами? В одном очень важном случае оказывается, что можно, а именно, для электромагнитного поля. Плотность энергии поля равна $(E^{*2} + H^2)/8\pi$, где E^* — напряженность электрического поля, H — магнитного поля.

В общем случае силы определяются максвелловским тензором натяжений, и в упорядоченных полях силы резко анизотропны (натяжение вдоль поля $E^{*2}/8\pi$ и расталкивание в двух перпендикулярных направлениях поперек поля $E^{*2}/8\pi$; аналогично и для магнитного поля).

Однако сумма нормальных натяжений на три перпендикулярные площадки всегда тождественно равна $(E^{*2} + H^2)/8\pi$, т. е. равна плотности энергии. Этот результат не зависит от того, имеем ли мы дело со статическими или переменными полями, с полями в той области, где находятся заряды и токи или с полями (в частности, полем электромагнитной волны) в пустоте. Когда можно говорить о давлении электромагнитного поля? Для этого нужно, чтобы при усреднении по времени или по макроскопическим площадкам все направления (в среднем) оказывались равноценными. Тогда сумма напряжений равна $3P$ и, следовательно, для электромагнитного поля всегда $\epsilon = 3P$, где ϵ — объемная плотность энергии. Мы отмечали, что такое равенство имеет место для ультрарелятивистского газа, в частности, для совокупности световых квантов, т. е., говоря классически, для совокупности электромагнитных волн.

Однако полученный выше результат богаче: ведь электромагнитное поле не исчерпывается полем волн. Это видно уже из того, что электромагнитные волны поперечные. Кулоновское поле заряда, например, продольно и его нельзя свести к свободным электромагнитным волнам.

Давление и плотность энергии системы заряженных частиц не обязательно вычислять как производную от энергии. В принципе, можно непосредственно в веществе данной плотности мысленно провести поверхность и найти поток импульса, нормальный к по-