Вестник
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 6 — 1974

УДК 539.12.01

Д. Д. ИВАНЕНКО, Д. Ф. КУРДГЕЛАИДЗЕ, Н. МАКСЮКОВ

КВАРКИ В АСТРОФИЗИКЕ

В работе исследуются основные параметры, масса и радиус кварковых равновесных конфигураций, имеющих центральные плотности от 10^{19} до 10^{32} *г/см*^{3}. Показано, что подобные объекты должны иметь большой гравитационный дефект массы. Предполагая возможность рекомбинации кварков в гипероны, показано, что число рекомбинировавших кварков порядка полного числа кварков в звезде, а отношение числа рекомбинировавших к числу свободных 10^{-6}.

Попытки систематики элементарных частиц и их сведения к немногим объектам привели к гипотезе субчастиц — кварков, из которых предполагаются построенными все сильно взаимодействующие адроны.

Однако интерес к кваркам не ограничивается физикой элементарных частиц, а связан с возможной ролью кварков в космологии и астрофизике. Наиболее существенным с точки зрения возможности образования и выгорания кварков может явиться период начального расширения Вселенной, если это расширение происходило из сингулярного состояния. Расчет концентрации кварков на нуклон на нынешней стадии эволюции расширяющейся Вселенной, возникшей в результате взрыва и последующего охлаждения первичного горячего ($T > 10^{10}$ °K) сверхплотного ($\rho > 10^{14}$ *г/см*^{3}) котла, дает величину [1]:

$$N_{\text{кв}} \approx 6 \cdot 10^{-19} \frac{T^3}{M},$$

где T — температура излучения, оставшегося к настоящему времени, N — средняя плотность нуклонов в настоящее время, M — масса бариона. Для горячей модели мира $T^3/N \sim 10^3$, а для холодной — $T^3/N \sim 1$. Таким образом, возможная концентрация кварков после первичного расширения будет $\sim 10^{-8}$—10^{-18}.

По-видимому, кварковая плазма могла бы внести вклад в реализацию не только первичного космологического, но и протозвездного вещества [2]. Другим механизмом образования кварков может служить процесс гравитационного коллапса, ибо коллапс — это процесс образования Вселенной, обращенной во времени. В процессе гравитационного сжатия возможно образование не только белых карликов, нейтронных, гиперонных звезд, но и кварковых конфигураций [2 и 13], переход к которым соответствует сильному внутреннему возбуждению барионов,

приводящему к их развалу на кварки $B \to 3q$. В приближении идеального газа переход барионной звезды в кварковую возможен при

$$N_B \geqslant \frac{9}{\pi^2}\left(\frac{m_q c}{\hbar}\right)^3 \left\{1-\left(\frac{m_B}{3mq}\right)^2\right\}^{3/2} \sim 10^{44}\ см^{-3}.$$

Известно, что потенциальная энергия барионов зависит от импульса

$$V_B(p) \simeq V_B(0) + T_{кип}(p),$$

где $V_B(0)$ — постоянная величина, зависящая от плотности барионов. При этом условие термодинамического равновесия

$$E_B + V_B(p) = 3\,(E_q + V_q(p))$$

дает порог рождения кварков

$$N_B \geqslant \frac{9}{8\pi^2}\left(\frac{m_q c}{\hbar}\right)^3 \left\{\left[1+\frac{m_B}{3m_q}+\frac{2\,(3V_q(0)-V_B(0))^2}{3m_q c^2}\right]-\frac{4m_B^2}{9m_q^2}\right\}^{3/2} \sim 10^{43}\ см^{-3}.$$

При этом предполагается, что кварки подчиняются статистике Ферми и имеют массу 10 *Гэв*.

Рассматривая случаи, когда кварки образуют идеальный газ, а также газ взаимодействующих частиц, мы вычислим основные параметры кварковых конфигураций на основе интегрирования уравнений гидростатического равновесия

$$\frac{du}{dr} = \frac{4\pi}{c^2}\,\varepsilon(r)\,r^2\,\frac{dp}{dr} = -\frac{p+\varepsilon}{r\left(\frac{c^2}{G}\,r-2u\right)}\left(\frac{4\pi}{c^2}\,r^3 p + u\right).$$

(G — постоянная тяготения, c — скорость света) совместно с уравнением состояния для идеального газа

$$\varepsilon_0 = 3K_n\left(\frac{m_q}{m_n}\right)^4 (\operatorname{sh} t_q - t_q),$$

$$p_0 = K_n\left(\frac{m_q}{m_n}\right)^4 \left(\operatorname{sh} t_q - 8\operatorname{sh}\frac{t_q}{2} + 3t_q\right),$$

$$K_n = \frac{m_n^4 c^5}{32\pi^2\hbar^3} \qquad t_q = 4\operatorname{arsh}\frac{p_q}{m_q c}$$

(p_q — импульс Ферми, m_n — масса нейтрона) и для взаимодействующего газа [3]:

$$p_v = 6{,}82\cdot 10^{-18}\ N^{4/3} - 5{,}99\cdot 10^{-30}\ N^{5/3} + 8{,}03\cdot 10^{-43}\,N^2,$$

$$\varepsilon_v = 2{,}05\cdot 10^{-17}\ N^{4/3} - 8{,}88\cdot 10^{-30}\ N^{5/3} + 8{,}03\cdot 10^{-43}\,N^2$$

(p и ε — давление и плотность энергии).

Значения рассчитанных параметров конфигураций приведены в таблицах, где u и r — масса и радиус звезды для удаленного наблюдателя, а

$$M = \frac{4\pi}{c^2}\int_0^R \sqrt{g_{rr}}\,\varepsilon(r)\,r^2 dr \ \text{ и } \ R = \int_0^R \sqrt{g_{rr}}\,dr,$$

$$g_{rr} = \frac{1}{1-\frac{2Gu}{c^2 r}}.$$

Таблица 1

Основные параметры кварковых конфигураций, состоящих из идеального кваркового газа

Параметры в центре конфигураций			Массы в солнечных массах		Радиусы в *км*	
число кварков N (о), *в·см*$^{-3}$	давление p (о), *в эрг/см*^{3}	плотность вещества ε(о), *в г/см*^{3}	u	M	r	R
$1{,}03\cdot10^{43}$	$2{,}23\cdot10^{40}$	$2{,}25\cdot10^{20}$	0,0036	0,00414	0,0413	0,0474
$1{,}94\cdot10^{43}$	$5{,}84\cdot10^{40}$	$4{,}58\cdot10^{20}$	0,0034	0,00404	0,0356	0,0415
$3{,}45\cdot10^{43}$	$1{,}38\cdot10^{41}$	$8{,}92\cdot10^{20}$	0,00311	0,00378	0,031	0,037
$5{,}43\cdot10^{43}$	$2{,}69\cdot10^{41}$	$1{,}52\cdot10^{21}$	0,00284	0,00351	0,028	0,034
$9{,}92\cdot10^{43}$	$6{,}44\cdot10^{41}$	$3{,}17\cdot10^{21}$	0,00247	0,0031	0,0255	0,0315
$1{,}3\cdot10^{44}$	$9{,}21\cdot10^{41}$	$4{,}31\cdot10^{21}$	0,00233	0,00297	0,0248	0,0309
$1{,}63\cdot10^{44}$	$1{,}3\cdot10^{42}$	$5{,}86\cdot10^{21}$	0,00221	0,00283	0,0246	0,0305
$3{,}1\cdot10^{44}$	$3{,}22\cdot10^{42}$	$1{,}32\cdot10^{22}$	0,002	0,00254	0,025	0,031
$6{,}3\cdot10^{44}$	$8{,}55\cdot10^{42}$	$3{,}27\cdot10^{22}$	0,00188	0,00241	0,0278	0,034
$1{,}99\cdot10^{45}$	$4{,}12\cdot10^{43}$	$1{,}47\cdot10^{23}$	0,0021	0,00263	0,0321	0,0388
$6{,}24\cdot10^{45}$	$1{,}91\cdot10^{44}$	$6{,}59\cdot10^{23}$	0,00225	0,00283	0,0316	0,0385
$2{,}8\cdot10^{46}$	$1{,}44\cdot10^{45}$	$4{,}87\cdot10^{24}$	0,0022	0,0028	0,03	0,037
$1{,}27\cdot10^{47}$	$1{,}07\cdot10^{46}$	$3{,}6\cdot10^{25}$	0,00215	0,00273	0,0302	0,037
$2{,}68\cdot10^{47}$	$2{,}92\cdot10^{46}$	$9{,}79\cdot10^{25}$	0,00216	0,00274	0,0305	0,0373
$5{,}68\cdot10^{47}$	$7{,}96\cdot10^{46}$	$2{,}66\cdot10^{26}$	0,00218	0,00275	0,0306	0,0375

Таблица 2

Основные параметры кварковых конфигураций, состоящих из газа взаимодействующих кварков

Параметры в центре конфигураций			Массы в солнечных массах		Радиусы в *км*	
число кварков N (о), *в см*$^{-3}$	давление p (о), *в эрг/см*^{3}	плотность вещества ε (о) *в г/см*^{3}	u	M	r	R
$2{,}12\cdot10^{41}$	$3{,}44\cdot10^{40}$	$4{,}2\cdot10^{19}$	0,0514	0,0745	0,27	0,384
$6{,}01\cdot10^{41}$	$2{,}77\cdot10^{41}$	$3{,}17\cdot10^{20}$	0,05	0,073	0,277	0,399
$9{,}15\cdot10^{41}$	$6{,}42\cdot10^{41}$	$7{,}26\cdot10^{20}$	0,0512	0,0741	0,281	0,405
$1{,}58\cdot10^{42}$	$1{,}9\cdot10^{42}$	$2{,}16\cdot10^{21}$	0,052	0,0754	0,283	0,41
$5{,}41\cdot10^{42}$	$2{,}26\cdot10^{43}$	$2{,}52\cdot10^{22}$	0,0518	0,0754	0,28	0,407
$9{,}25\cdot10^{42}$	$6{,}61\cdot10^{43}$	$7{,}35\cdot10^{22}$	0,0516	0,0752	0,278	0,407
$2{,}86\cdot10^{43}$	$6{,}35\cdot10^{44}$	$7{,}06\cdot10^{23}$	0,0518	0,0754	0,281	0,408
$8{,}37\cdot10^{43}$	$5\cdot44\cdot10^{45}$	$6{,}04\cdot10^{24}$	0,0517	0,0753	0,28	0,408
$2\cdot65\cdot10^{44}$	$5{,}45\cdot10^{46}$	$6{,}06\cdot10^{25}$	0,0518	0,0754	0,281	0,408
$4{,}26\cdot10^{44}$	$1{,}41\cdot10^{47}$	$1{,}57\cdot10^{26}$	0,0518	0,0754	0,281	0,408
$1{,}36\cdot10^{45}$	$1{,}44\cdot10^{48}$	$1{,}6\cdot10^{27}$	0,0517	0,0753	0,28	0,408
$2{,}92\cdot10^{45}$	$6{,}65\cdot10^{48}$	$7{,}39\cdot10^{27}$	0,0518	0,0754	0,281	0,408
$6{,}24\cdot10^{45}$	$3{,}03\cdot10^{49}$	$3{,}37\cdot10^{28}$	0,0518	0,0754	0,281	0,408
$2{,}82\cdot10^{46}$	$6{,}18\cdot10^{50}$	$6{,}87\cdot10^{29}$	0,0519	0,0756	0,281	0,409
$5{,}98\cdot10^{46}$	$2{,}78\cdot10^{51}$	$3{,}09\cdot10^{30}$	0,0519	0,0755	0,281	0,408

Расчет позволяет сделать вывод о возможности существования во Вселенной объектов, обладающих огромным гравитационным дефектом массы

$$\Delta = \frac{M_0 - u}{u} \sim M_0, \quad M_0 = n_q m_q.$$

При переходе n_1 (т. е. барионов из n_0, находящихся в единице объема) в кварки гравитационная энергия системы не меняется, следовательно, подобный переход приводит к дальнейшему сжатию звезды. Если пред-

положить, что локальные флуктуации плотности в звезде могут обусловить процесс рекомбинации кварков в барионы, то такой процесс при наличии огромного дефекта массы носил был характер гигантского взрыва. При этом число рекомбинировавших кварков

$$h_q^* = \frac{M_0 - u}{m_q\left(1 - \frac{m_B}{3m_q}\right)} \sim n_q,$$

$$n_q = \frac{u(1+\Delta)}{m_q} = \frac{M_0 - u}{m_q} + \frac{u}{m_q}$$

полное число кварков в звезде, а отношение числа свободных кварков, разлетевшихся без рекомбинации n_q^0, к числу рекомбинировавших кварков $n_q^0/n_q^* \sim 10^{-6}$. Возможно, что этим обстоятельством в известной мере объясняется малая концентрация кварков во Вселенной. Подобный взрыв мог бы служить моделью для объяснения взрывных процессов, выделяющих энергии до 10^{60}—10^{62} *эрг*, в квазарах и ядрах некоторых галактик, где, как предполагается [2, 4—8], могут играть существенную роль процессы с участием кварков. Дело в том, что для освобождения подобной энергии с помощью обычных ядерных реакций требуется переработка 10^9—10^{10} $M_\odot$, что мало правдоподобно для сравнительно короткого периода 10^5—10^6 лет.

Плавка кварков может быть ответственна за светимость квазизвездных объектов (или ядер некоторых галактик) [9], при этом оценка эффективности переработки массы покоя кварков в фотоны дает величину порядка 50% (в то время как для протонов эта величина 0,7%). При этом плавка кварков может идти по следующим циклам [9]:

$q + \bar{q} \to \bar{q}$ + вещество, $q + q \to$ другое вещество;

$q + \bar{q} \to d_q + \gamma$, $d_q \to \bar{q}$ + вещество, $q + \bar{q} \to$ другое вещество;

$q + (\bar{p}, \bar{q}) \to \bar{q} + \bar{p}$ + вещество, $q + \bar{q} \to$ другое вещество,

$q + (\bar{p}, q) \to d_q + \gamma + p$, $d_q \to \bar{q}$ + вещество, $q + \bar{q} \to$ другое вещество.

Подобные реакции могут рождать барионы, антибарионы, а также большое число первичных и вторичных мезонов и других частиц.

Температура горения кварков, необходимая для объяснения величины светимости $\sim 10^{46}$ *эрг/сек* квазизвезд (или ядер некоторых галактик), $T_{гор} \sim 2 \cdot 10^6$ °K [9]. При этом в газообразных оболочках подобных объектов возможно наличие кварко-электронных атомов, причем возможное отношение числа кварков к числу протонов в области эмиссионных линий в среднем $\sim 0{,}2$ (для $q = 2/3$) [9]. Возможность образования и детектирования своеобразных кварко-атомов, в ядрах которых часть протонов или нейронов заменена на кварки, обсуждается в работах [5 и 2]. Наряду с возможной сверхпроводимостью в белых карликах и нейтронных звездах [10—12] возможно наличие сверхпроводящей кварковой плазмы [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Окунь А. Б., Пикельнер С. Б. «Успехи физических наук», 87, 113, 1965.
2. Иваненко Д. Д., Курдгелаидзе Д. Ф. «Астрофизика», 1, № 6, 479 (Ереван), 1965; Indian Journal of Pure and Appl. Phys., 7, 585, 1969; Nuovo Cim. Letters, 2, 13, 1969; «Изв. вузов», сер. физич., 8, 39, 1970.

3. Саакян Г. С. Сб. «Проблемы современной космологии» под ред. В. А. Амбарцумяна. М., 1969.
4. Paccini F. Nature, **209**, 389, 1966.
5. De Sabata V., Gualdi C., Bochaleti D. Novo Cim., **A45**, 513, 1966.
6. Бербидж Дж., Бербидж М. Квазары. М., 1969.
7. Itoh N. Prorg. Theor. Phys., **44**, 291, 1970.
8. Blatt J., Gutereund H. Phys. Let., **23**, 94, 1966.
9. Bahcall I., Callan C., Dashen R. Ap. J., **163**, 239, 1971.
10. Kothari D., Auluck F. Proc. Nat. Instit. Sci., India, **28A**, 228, 1962.
11. Трубников В. А. ЖЭТФ, **55**, 1893, 1968.
12. Киржниц Д. А. Письма ЖЭТФ, 1969.
13. Максюков Н. И. «Изв. вузов», физика, № 3, 11, 1974; Курдгелаидзе Д. Ф., Максюков Н. И. «Изв. вузов», физика, № 8, 129, 1974.

Поступила в редакцию
3.1 1973 г.

Кафедра
теоретической физики