3 — цветовой индекс) и благодаря наличию цвета участвует в хромодинамич. сильном взаимодействии, обладающем локальной цветовой симметрией $SU(3)$ и характеризуемом константой α_s. Кварки и лептоны участвуют также в ЭСВ, описываемом калибровочной симметрией $SU(2)\otimes U(1)$. При этом левые киральные компоненты (см. *Киральные поля*) кварков и лептонов образуют дублеты по группе $SU(2)$ и участвуют во взаимодействии с симметрией $SU(2)$, описываемом константой α_2, а во взаимодействии с симметрией $U(1)$, характеризуемом константой α_1, участвуют все киральные компоненты фермионов (как правые, так и левые). Величины констант α_1 и α_2 принято выражать через константу эл.-магн. взаимодействия α и угол Вайнберга θ_W:

$$\alpha = \alpha_2 \sin^2\theta_W, \quad \mathrm{tg}^2\,\theta_W = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$$

Симметрия ЭСВ спонтанно нарушена на расстояниях $\sim 10^{-16}$ см за счёт механизма Хиггса в результате того, что одна из компонент $SU(2)$-дублета скалярных полей приобретает ненулевое *вакуумное среднее*.

На сверхмалых расстояниях, на к-рых реализуется объединяющая симметрия G, включающая в качестве подгруппы симметрию $SU(3)_c\otimes SU(2)\otimes U(1)$, сильное и электрослабое взаимодействия являются, по предположению, частью единого взаимодействия, описываемого одной константой α_G. Поэтому на таких расстояниях между константами α_1, α_2 и α_s должно выполняться определ. соотношение.

Если известные фермионы образуют полное представление группы G (или каждое из семейств в отдельности образует полное представление), то оказывается, что в пределе точной единой симметрии G $\alpha_s = {}^8/_3\alpha$. Можно также показать, что в этом пределе константы α_2 и α_s должны быть равны друг другу: $\alpha_2=\alpha_s=\alpha_G$. Т. о., на сверхмалых расстояниях $\alpha_2 = {}^8/_3\alpha$, что фиксирует величину угла Вайнберга в пределе точной симметрии: $\sin^2\theta_W = \alpha/\alpha_2 = {}^3/_8$ [1]. При переходе к расстояниям $\sim 10^{-16}$ см значения констант α и α_2 изменяются и величина $\sin^2\theta_W$ уменьшается до примерно 0,21 (см., напр., [2], [3]), что близко к эксперим. величине 0,218(25).

Т. к. электрослабая группа симметрии является подгруппой G, то оператор электрич. заряда Q является одним из *генераторов группы* G. Поэтому, если группа G компактная, то собств. значения оператора Q могут принимать лишь дискретный ряд значений, что отвечает квантованию электрич. заряда.

Для количеств. оценки масштаба расстояний, на к-рых происходит В. о., следует рассмотреть эволюцию констант с изменением расстояния. При этом удобно пользоваться величинами, обратными расстояниям и имеющими в системе единиц $\hbar=c=1$ размерность массы. Зависимость констант при изменении массового масштаба от μ до M определяется в главном (однопетлевом) порядке теории возмущений след. соотношениями (ур-ниями эволюции; см. *Перенормировки*):

$$\frac{1}{\alpha(M)} = \frac{1}{\alpha(\mu)} + \frac{8}{3}\left(\frac{11}{4} - \frac{4}{3}N_F - \frac{1}{8}N_\Phi\right)\frac{1}{2\pi}\ln\frac{M}{\mu},$$

$$\frac{1}{\alpha_s(M)} = \frac{1}{\alpha_s(\mu)} + \left(11 - \frac{4}{3}N_F\right)\frac{1}{2\pi}\ln\frac{M}{\mu},$$

$$\frac{1}{\alpha_2(M)} = \frac{1}{\alpha_2(\mu)} + \left(\frac{22}{3} - \frac{4}{3}N_F - \frac{1}{6}N_\Phi\right)\frac{1}{2\pi}\ln\frac{M}{\mu},$$

где N_F — число семейств фермионов, а N_Φ — число дублетов скалярных полей в ЭСВ. При этом предполагается, что величины μ и M больше масс кварков, лептонов и промежуточных векторных бозонов. Описываемая этими соотношениями зависимость констант от M при $N_F=3$, $N_\Phi=1$ изображена на рис. 1. Положив в них $\mu\approx m_W$ (где $m_W\approx 100$ ГэВ — масса промежуточных векторных бозонов) и задав значения $\alpha(m_W)$ и $\alpha_s(m_W)$, можно оценить величину M_X, при к-рой выполняется соотношение $\alpha(M_X) = {}^3/_8\alpha_s(M_X)$, а также величину единой константы $\alpha_G(M_X)$. Величина M_X играет роль масштаба масс спонтанного нарушения единой группы симметрии G, т. е. на расстояниях, меньших M_X^{-1}, восстанавливается симметрия G. На этих расстояниях взаимодействие описывается единой константой α_G, и её закон эволюции определяется калибровочным взаимодействием, отвечающим полной группе симметрии G.

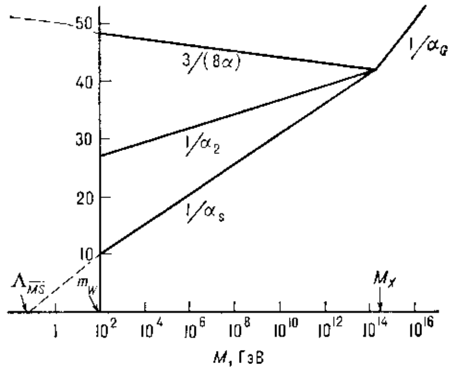

Рис. 1.

Оценка M_X указанным выше способом производится из соотношения:

$$\ln\frac{M_X}{m_W} = 2\pi\left(\frac{3}{8\alpha(m_W)} - \frac{1}{\alpha_s(m_W)}\right)\Big/\left(\frac{33}{4} + \frac{1}{8}N_\Phi\right)$$

(заметим, что эта оценка не зависит от числа семейств фермионов, но зависит от N_Φ). В простейшей схеме ЭСВ ($N_\Phi=1$), полагая (см. рис. 1) $\alpha_s^{-1}(m_W)\approx 10$ и $\alpha^{-1}(m_W)\approx 128{,}5$ [отличие от привычного значения $\alpha^{-1}\approx 137$ связано с изменением константы α при уменьшении расстояний от m_e^{-1} (где m_e — масса электрона) до m_W^{-1}], находим

$$M_X \approx 2\cdot 10^{14}\ \text{ГэВ}$$

(что отвечает расстояниям $\sim 10^{-28}$ см). При $N_\Phi=3$ находим величину единой константы в точке объединения: $\alpha_G^{-1}\approx 42$. Задавая теперь $\alpha_2(M_X)=\alpha_G$ и возвращаясь по ур-нию эволюции для α_2 к $\alpha_2(m_W)$, можно найти отношение $\alpha(m_W)/\alpha_2(m_W) = \sin^2\theta_W$, к-рое приведено выше.

Более детальный анализ приводит к оценке: $M_X \approx 2\cdot 10^{15}\,\Lambda_{\overline{MS}}$, где $\Lambda_{\overline{MS}}\approx 160$ МэВ — массовый параметр КХД (см. *Квантовая хромодинамика*), определяющий величину константы α_s (на рис. 1 величина $\Lambda_{\overline{MS}}$ отвечает точке, в к-рой продолжение линии α_s^{-1} пересекает ось абсцисс). Теоретич. неопределённость в численном множителе в этой оценке M_X составляет, по-видимому, фактор 1,5—2.

Выбор объединяющей группы G определяется требованием, чтобы она содержала произведение $SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$ в качестве подгруппы и имела представления, в к-рые могут быть включены известные кварки и лептоны. Миним. группой, отвечающей этому требованию, является группа $SU(5)$. Ранг $SU(5)$ (число взаимно коммутирующих генераторов) равен четырём, т. е. совпадает с рангом произведения $SU(3)\otimes SU(2)\otimes U(1)$. В $SU(5)$-модели В. о. [4] фермионы из одного семейства входят в квинтетное и декуплетное представления группы $SU(5)$. Квинтет для первого семейства имеет вид:

$$(\tilde d_1,\ \tilde d_2,\ \tilde d_3,\ e^-,\ \nu_e),$$