

а соответствующий декуплет можно представить антисимметричной матрицей вида:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & \bar{u}_3 & -\bar{u}_2 & -u_1 & -d_1 \\ -\bar{u}_3 & 0 & \bar{u}_1 & -u_2 & -d_2 \\ \bar{u}_2 & -\bar{u}_1 & 0 & -u_3 & -d_3 \\ u_1 & u_2 & u_3 & 0 & -e^+ \\ d_1 & d_2 & d_3 & e^+ & 0 \end{pmatrix}$$

(где тильда является знаком античастицы). При этом все фермионные поля считаются левыми киральными полями. Правые компоненты частиц получаются CP-сопряжением левых компонент античастиц. [Заметим, что в SU(5)-теории нет необходимости в правом нейтрино (левом антинейтрино), однако оно, вообще говоря, могло бы существовать в качестве SU(5)-синглета.]

В группе SU(5) имеются 24 генератора. Соответственно калибровочное взаимодействие осуществляется обменом 24 векторными бозонами. Из них 12 (8 глюонов, W±-бозоны, Z-бозон и фотон) являются калибровочными бозонами группы SU(3) ⊗ SU(2) ⊗ U(1) и не приобретают массы при спонтанном нарушении SU(5)-симметрии на сверхмалых расстояниях. Остальные 12 векторных бозонов — X<sub>a</sub><sup>±</sup> и Y<sub>a</sub><sup>±</sup> (a = 1, 2, 3) приобретают массу M<sub>X</sub>. Электрич. заряд X<sup>±</sup>-бозонов равен ±4/3 (в единицах e), а Y<sup>±</sup>-бозонов ±1/3. Бозоны X<sub>a</sub> (Y<sub>a</sub>) одинакового заряда образуют триплет из цветовой группе SU(3), а пары бозонов X, Y одинакового цвета и знака заряда — дублеты по группе электрослабого взаимодействия SU(2).

Т. к. лептоны, кварки и антикварки входят в один мультиплет группы SU(5), испускание или поглощение X- и Y-бозонов может переводить кварк в лептон

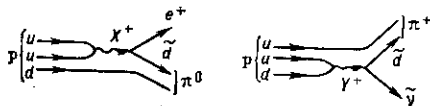


Рис. 2.

либо в антикварк. Поэтому обмен X-, Y-бозонами может приводить к процессу, когда два кварка превращаются в лептон и антикварк, т. е. к нарушению закона сохранения барионного числа. За счёт таких обменов в SU(5)-теории возможен распад протона. Примеры графиков с обменом X- и Y-бозонами, описывающих распад протона, приведены на рис. 2.

Обмен X-, Y-бозонами для процесса распада протона сводится к эффективному четырёхфермионному взаимодействию (см. Лагранжиан эффективный) с размерной константой, пропорциональной α<sub>G</sub>/M<sub>X</sub><sup>2</sup> (аналогично четырёхфермионному слабому взаимодействию, порождаемому обменом массивным W-бозоном). При этом время жизни протона можно оценить из размерных соображений по ф-ле

$$\tau_p = C \frac{M_X^4}{\alpha_G^2} \frac{1}{m_p^5} = C \left( \frac{M_X}{2 \cdot 10^{13} \text{ ГэВ}} \right)^4 \cdot 10^{29} \text{ лет,}$$

где m<sub>p</sub> — масса протона, а C — безразмерный коэф., вычисление которого требует тщательного анализа и зависит от деталей кварковой структуры протона. Разные модели этой структуры дают для C значения от 0,3 до 30, причём наиб. надёжными представляются оценки C ≈ 0,3—1. [Следует отметить, что эксперим. значение τ<sub>p</sub> ≥ 3·10<sup>31</sup> лет исключает простейшую (минимальную) SU(5)-модель В. о. и требует рассмотрения более сложных схем. Однако эта модель несёт в себе все наиб. важные черты В. о. и поэтому рассматривается в статье.]

В модели SU(5) сохраняется разность барионного и лептонного чисел, B—L, поэтому в распаде протона рождается позитрон или антинейтрино (напр., p →

→ π<sup>0</sup>e<sup>+</sup>, p → π<sup>+</sup>ν̄<sub>e</sub>), но не рождается электрон или нейтрино.

Спонтанное нарушение SU(5)-симметрии до группы SU(3) ⊗ SU(2) ⊗ U(1) происходит за счёт образования вакуумного конденсата 24-плета скалярных Хиггса полей H, преобразующихся по присоединённому представлению группы SU(5). При этом величина вакуумного среднего оказывается порядка M<sub>X</sub>/√α<sub>G</sub> ≈ 10<sup>15</sup> ГэВ.

Дублеты скалярных полей, обуславливающие спонтанное нарушение SU(2) ⊗ U(1)-симметрии ЭСВ на расстояниях ~10<sup>-16</sup> см, могут принадлежать квинтетам в группе SU(5) либо 45-плетам. При этом остальные компоненты данных SU(5)-мультиплетов приобретают массы порядка 10<sup>13</sup>—10<sup>14</sup> ГэВ при спонтанном нарушении симметрии за счёт вакуумного среднего 24-плетного хиггсова поля H. В схеме с миним. набором мультиплетов скалярных полей — 24-плета с квинтетом или с 45-плетом (т. е. миним. вариант сектора скалярных полей) должно выполняться соотношение между массами кварков и лептонов:

$$\frac{m_d}{m_e} \approx \frac{m_s}{m_\mu} = \frac{m_b}{m_\tau},$$

причём величина этих отношений составляет примерно 3 для схемы с квинтетом и примерно 1 для схемы с 45-плетом полей Хиггса. В любом случае эти соотношения не выполняются на опыте (за исключением m<sub>b</sub>/m<sub>τ</sub> ≈ 3), поэтому случай миним. варианта сектора скалярных полей кажется неприемлемым.

Средством обобщением SU(5)-модели В. о. является схема, основанная на ортогональной группе SO(10), в к-рой предсказываемое время жизни протона может быть существенно увеличено по сравнению с τ<sub>p</sub> в модели SU(5). В SO(10)-моделях обязательно присутствует правое нейтрино и естеств. образом возникает масса нейтрино, причём в зависимости от конкретной модели нейтрино могут иметь как дираковскую, так и майорановскую массу (см. Нейтрино). Однако конкретные оценки массы нейтрино весьма неопределёны.

В SO(10)-схемах с необходимостью возникает спонтанное нарушение разности B—L, являющейся генератором группы SO(10) (возникновение майорановских масс нейтрино является одним из следствий такого нарушения). Поэтому в данных моделях возможны такие процессы, как осцилляции нейтрон-антинейтрон [5] (возможность осцилляций n ↔ n̄ впервые рассматривалась в [5]). Оценка периода осцилляций зависит от деталей модели; характерные ожидаемые величины ≥ 1 года. Объединение разл. семейств фермионов в один неприводимый мультиплет требует дальнейшей расширения группы симметрии. В связи с этим обсуждаются модели, основанные на группах SU(8), SO(14), SO(18) и др. Однако феноменологически приемлемой модели такого рода пока нет.

Как отмечалось, модели В. о. имеют ряд космологич. следствий. Одно из важнейших — возможность объяснения наблюдаемого преобладания вещества над антивеществом во Вселенной и отношения наблюдаемой в наше время концентрации барионов n<sub>B</sub> в концентрации фотонов n<sub>γ</sub> в микроволновом фоновом излучении: n<sub>B</sub>/n<sub>γ</sub> ≈ 10<sup>-8</sup>—10<sup>-10</sup>. Она связана с реализацией в моделях В. о. гипотезы о том, что барионная асимметрия Вселенной обусловлена CP-неинвариантными процессами с нарушением закона сохранения барионного числа в ранней горячей Вселенной [6]. Теоретич. оценки отношения n<sub>B</sub>/n<sub>γ</sub> зависят от деталей модели. В частности, в SU(5)-модели согласование расчётного значения этого отношения с наблюдаемым также требует увеличения числа скалярных полей.

Имеются попытки объяснить с помощью моделей В. о. наблюдаемую температурную однородность Вселенной, к-рая выражается в однородности микроволнового фонового излучения, приходящего из причинно не связанных друг с другом в стандартной космологич.