

2009

Topic: SUSY

# « Introduction to cosmoparticle physics »

Svetlana V. Silaeva

МЕРФИ: Кафедра Элементарных Частиц



## 1. SUSY model

Термин ‘суперсимметрия’ означает симметрию между фермионами и бозонами. Каждая модель ТВО, основанная на обычной калибровочной симметрии, может быть расширена до суперсимметричного варианта. Так, существует минимальная СУСИ SU(5) – модель или СУСИ SU(10) – модель. Суперсимметрия обладает очень широким спектром феноменологических проявлений (множество супер-партнеров, последовательности распадов, кандидаты на роль темной материи, нарушение R-четности, CP-нарушение, нарушение закона сохранения лептонного числа, и т.д. и т.п.). Отмечены были также две важные возможности SUSY моделей: CP-нарушение через CP-нечетные мягкие фазы и нарушение лептонного числа за счет несохранения R-четности и смешивания нейтрино с нейтрино.

## 2. Суперсимметричные частицы

Несколько вариантов расширений СМ приводят к вимпам. Одно из них, наиболее популярное - это Суперсимметрия (Supersymmetry - SUSY), которая расширяет СМ посредством включения в нее новых частиц и взаимодействий. В отличие от СМ, в которой имеется фундаментальное различие между фермионами (составными частями материи) и бозонами (переносчиками взаимодействий), суперсимметричные теории объединяют оба этих типа частиц в рамках унифицированной картины вещества и взаимодействий. В суперсимметричных теориях наряду с существованием обычных частиц предполагается существование их суперпартнеров, новых частиц со спинами, различающимися на  $\frac{1}{2}$ . Особенностью суперсимметричных теорий является унификация калибровочных констант связи на масштабе  $M_U \sim 2 \times 10^{16}$  ГэВ.

Минимальным суперсимметричным расширением СМ является MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model). В этой модели всем калибровочным полям сопоставляются фермионные суперпартнеры. Глюоны, калибровочные бозоны  $B$ ,  $W_3$  (или  $\gamma$  и  $Z^0$ ) и  $W^\pm$  получают фермионных партнеров, называемых глюино ( $\tilde{g}$ ) бино ( $\tilde{B}$ ) и вино ( $\tilde{W}^i$ ). Общее название для всех этих партнеров – гауино. Всем фермионам ставятся в соответствие скалярные партнеры, т.е. кварки и лептоны получают скалярных партнеров (“скварки”, “слептоны”). Вводится одно дополнительное поле Хиггса (к двум хиггсовским дублетам) и каждому нейтральному хиггсовскому бозону ( $H_1^0, H_2^0$ ) ставится в соответствие хиггсино ( $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0$ ) со спином  $\frac{1}{2}$ .

В MSSM вводится R-четность – мультипликативное число, определяемое соотношением

$R = (-1)^{3B+L+2s}$ , где  $B$  – барионное число,  $L$  – лептонное число,  $s$  – спин частицы. Для всех частиц СМ  $R=1$ , а для всех их суперпартнеров  $R=-1$ . Как следствие сохранения R-четности, суперсимметричные частицы (“с-частицы”) могут распадаться только нечетное число с-частиц (ЛСЧ) является стабильной и может исчезнуть только в результате парной аннигиляции. Это делает ЛСЧ очень привлекательным кандидатом на роль ТМ.

В модели MSSM существует целый ряд ограничений на природу ЛСЧ. Эта частица не может иметь электрического или цветного заряда, поскольку в противном случае она могла бы образовать с барионной материей тяжелые изотопы, что противоречит экспериментальным данным. Наиболее подходящим кандидатом в ЛСЧ являются нейтрино – линейная комбинация суперпартнеров фотона,  $Z^0$  и хиггсовских  $H_1^0$  и  $H_2^0$  бозонов.

С точки зрения регистрации нейтралитино, наиболее важны реакции парной аннигиляции и упругого рассеяния на нуклонах. В современную эпоху нейтралитино должны быть существенно нерелятивистскими с основными каналами аннигиляции в фермион-антифермионные пары (преимущественно тяжелые), пары калибровочных бозонов ( $W^+W^-$ ,  $Z^0Z^0$ ) и конечные состояния, содержащие хиггсовские бозоны.

Кроме нейтралитино другими возможными суперсимметричными кандидатами в частицы ТМ могли бы являться снейтрино и гравитино. Однако, ожидаемые значения сечения снейтрино-нуклонных взаимодействий оказываются слишком большими и находятся в противоречии с результатами прямых поисков ТМ. Что касается гравитино, то наличие у них только гравитационных взаимодействий делает их малоинтересными объектами для экспериментов по непрямым поискам ТМ.

### 3. Космологический сценарий

Понимание крупномасштабной эволюции Вселенной основано на ряде наблюдательных данных. Они включают расширение Вселенной и приближенно изотропное и однородное распределение материи на больших масштабах. Уравнения Эйнштейна общей теории относительности подразумевают, что метрика пространства-времени учитывает эти симметричные свойства гравитационных источников на больших масштабах. Обычно используется метрика Робертсона-Уокера:  $ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left\{ \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right\}$

где  $(t, r, \theta, \varphi)$  — безразмерные сопутствующие координаты,  $k = 0, 1, -1$  для пространства с нулевой, положительной и отрицательной кривизной соответственно. Космологические данные свидетельствуют в пользу  $k = 0$ . Динамическая переменная  $R(t)$  — масштабный фактор, имеющий размерность длины.

Динамические уравнения, определяющие временную эволюцию масштабного фактора, следуют из уравнений Эйнштейна. Подставляя метрический тензор,  $T^\mu_\nu = \text{diag}(\rho, -p, -p, -p)$ , где  $\rho(t)$  — полная плотность энергии и излучения во Вселенной, а  $p(t)$  — изотропное давление, подставляя в уравнение Эйнштейна, получаем уравнение Фридмана:  $H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G_N}{3} \rho - \frac{K}{R} + \frac{\Lambda}{3}$

Здесь  $H(t) = \dot{R}(t)/R(t)$  — параметр Хаббла, определяющий скорость расширения Вселенной в момент  $t$ ;  $\Lambda$  — космологическая «постоянная» в момент  $t$ .

Согласно сценарию раздувающейся Вселенной,  $\Lambda$ -член играет важную роль на очень ранних стадиях эволюции Вселенной, когда вакуумная энергия была доминирующей формой материи во Вселенной, приводя к экспоненциальному росту масштабного фактора. Последние наблюдения свидетельствуют о том, что в настоящее время наибольший вклад в плотность энергии Вселенной вносит «темная» энергия, которую также можно описать с помощью ненулевой космологической постоянной.

### 4. Распад протона в SUSY – моделях TBO