

**Московский инженерно-физический институт  
(национальный исследовательский ядерный  
университет)**

**Кафедра физики элементарных частиц**

**Реферат на тему: «Суперсимметрия»**

**Студент: Старостин В.И.  
Группа: Т01-40м**

**2015**

## 1. Введение

Термин 'суперсимметрия' означает симметрию между фермионами и бозонами. Каждая модель Теории Великого Объединения (ТВО), основанная на обычной калибровочной симметрии, может быть расширена до суперсимметричного варианта. 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 нейтралينو.

## 2. Инфляция, бариосинтез и основные кандидаты на роль ТМ в рамках суперсимметричной модели.

### Инфляция

Идея модели инфляции Вселенной состоит в том, что в ранней Вселенной было не обычное состояние вещества, которое создавало антигравитацию, заставляя Вселенную расширяться с некоторым ускорением. Такой подход позволяет разрешить ряд противоречий, такие как проблема горизонта, проблема плоского мира и другие. В инфляционной модели предполагается существование некоторого скалярного поля (инфлатона), ответственного за расширение Вселенной. Если в произвольно малой области где-либо во Вселенной на ранних стадиях возникает такое поле, то при этом уравнении состояния масштабный фактор этой области растет экспоненциально со временем,

$a(t) \sim e^{Ht}$ , где  $H = \dot{a}/a = \text{const}$  - постоянная Хаббла. Из уравнений Фридмана и условий отрицательного давления получаем экспоненциальный рост масштабного фактора при постоянной плотности энергии.

В модели SUSY кандидаты на роль инфлатона претендуют s-нейтрино и комбинации хиггсовских бозонов.

### Бариосинтез

В суперсимметричной модели потенциал Лагранжиана составляется исходя из общих требований (требований суперсимметрии, калибровочных симметрий, B-L симметрии), допускающих нарушение B и L в отдельности. Данный потенциал до нарушения суперсимметрии практически не зависит от некоторых комбинаций полей скалярных кварков. Такие комбинации получили название полей «плоских направлений» или «долин». В суперсимметричных реализациях моделей инфляции суперсимметрия нарушается по окончании инфляции и поля долин приобретают массу. Поля долин начинают осциллировать вокруг минимума. Если поле долины несло в себе

барионный заряд, то энергия этих колебаний переходит в энергию бозе-конденсата скалярных кварков с ненулевым барионным зарядом. Впоследствии бозе-конденсат распадается на обычные кварки, давая барионный избыток.

Многочисленные эксперименты на ускорителях элементарных частиц показывают, что процессы рождения вещества и антивещества равноправны. Однако если бы количество протонов на начальных стадиях Вселенной было в точности равно количеству антипротонов, то при остывании плазмы до температуры  $\sim 100$  МэВ и ниже протоны и антипротоны аннигилировали бы, превратившись в фотоны, то есть во Вселенной вещество практически бы исчезло, и осталось бы одно излучение.

Отношение количества протонов  $n_p$  и реликтовых фотонов  $n_\gamma$  в настоящее время  $n_p/n_\gamma \approx 10^{-8}-10^{-10}$ . Это означает, что во время горячей стадии, когда температура была очень высокой ( $kT \gg m_p c^2$ ), в первичной плазме существовало не точное, а лишь приблизительно равное количество протонов  $n_p$  и антипротонов  $n_{\bar{p}}$   $[n_p - n_{\bar{p}}]/n_\gamma \propto 10^{-9}$ .

Механизм возникновения барионной асимметрии таков: у нас есть лептокварки (X) - частицы, переносящие взаимодействия с не сохранением  $B$ . Их масса зависит от модели: векторные лептокварки обычно имеют массу порядка  $M_X \sim 10^{14} - 10^{18}$  ГэВ, а скалярные  $\sim 10^{10} - 10^{15}$  ГэВ. Вследствие  $C$ - и  $CP$ -нарушения, а также не сохранения  $B$  при распаде лептокварков чаще образуются кварки и лептоны, чем антикварки и антилептоны. Зарядово-симметричная часть вещества плазмы в последующей эволюции Вселенной аннигилирует в конце концов в фотоны, нейтрино и антинейтрино, тогда как асимметричная часть остается, давая начало наблюдаемому миру галактик, звезд и т. п.

### Кандидаты в Темную материю в рамках суперсимметричной модели.

Наиболее реалистичными представляются суперсимметричные модели, содержащие понятие R-четности. В таких моделях предполагается, что все взаимодействия сохраняют R-четность, следовательно, в столкновениях обычных частиц суперпартнеры рождаются парами. Отсюда же следует, что в суперсимметричных обобщениях СМ с сохраняющейся R-четностью существует как минимум одна стабильная частица, легчайшая среди R-нечетных частиц. Именно такая частица (LSSP – lightest supersymmetric particle) и является кандидатом на роль скрытой массы. Поскольку заряженные стабильные частицы с массой 30 ГэВ – 20 ТэВ не могут составлять темную материю, [do they appear in SUSY models ?] то потенциально интересными кандидатами в суперсимметричных моделях являются нейтралино, гравитино и аксино.

Нейтралино – это такая частица, которая является суперпозицией партнеров нейтральных полей  $B$ ,  $W$  и Хиггса. Данная частица может быть легчайшей среди других суперчастиц и быть стабильной.

Частица гравитино ( $\tilde{G}$ ) предсказывается при суперсимметричных расширениях СМ, включающих гравитацию. Гравитино – майорановская частица со спином  $3/2$  и четырьмя спиновыми состояниями (два спиновых состояния гравитино приобретает от голдстино при нарушении суперсимметрии, становясь массивным).

Частица аксино – слабо взаимодействующая частица. Аксино – суперпартнер аксиону ( $f_a < 10^{12}$  ГэВ  $m_a > 0.5 \cdot 10^{-9}$  эВ) со спином  $1/2$  и соответственно появляется при

суперсимметричном расширении CM, включающем механизм Печей-Куин подавления CP-нарушения в КХД. Для поля аксиона со спином  $S=0$  (и R-четность  $R=1$ ) равенство между числами бозонных и фермионных степеней свободы, требуемое суперсимметрией, обеспечивается добавлением майорановского фермиона – аксино ( $\tilde{a}$ ) с  $S=1/2$  и  $R=-1$  и скаляра - с-аксиона (с-аксино) с  $S=0$  и  $R=1$ . Требование соблюдения симметрии  $U_{PQ}(1)$  не позволяет аксино, также как и самому аксиону, приобретать массу обычным образом за счет нарушения суперсимметрии. Такого запрета не возникает для с-аксиона, и его масса может быть порядка масс обычных суперпартнеров  $\sim 100 \div 1000$  ГэВ, возникающих после нарушения SUSY. Масса аксино может варьировать в широких пределах и быть значительно меньше масс других суперпартнеров:  $m_a \sim \text{КэВ} \div \text{ГэВ}$ . Аксино может являться легчайшей суперчастицей и, следовательно, при сохранении R – четности быть стабильной.

### 3. Экспериментальная проверка SUSY

Проверка суперсимметричных моделей на ускорителях подразумевает прежде всего обнаружение частиц-суперпартнеров, а также наблюдение и изучение различных явлений (аномальный магнитный момент мюона, физика B-мезонов, феноменология бозона Хиггса и т.п.), объяснение которых предоставляют в частности суперсимметричные расширения CM.

Исторически первые строгие ограничения на массы скварков и глюино были получены в рамках экспериментов UA1 и UA2 на супер-протонном синхротроне в CERN. Позже более строгие ограничения были установлены в экспериментах на коллайдере LEP. В 2006 году эти ограничения были уточнены в эксперименте D0 на Тэватроне.

Анализ первых данных, полученных в начале работы Большого Адронного Коллайдера (LHC), запущенного в 2009 году, в рамках моделей MSSM (минимальная суперсимметричная Стандартная модель) и NUHM1 показал, что если скварки и глюино действительно существуют, то значения их масс находятся в диапазоне 500 – 800 ГэВ, а значения 2.5 ТэВ маловероятны. Нейтралино и слептоны считались достаточно легкими и значения масс этих частиц ожидалось в районе 100 – 150 ГэВ. По состоянию на апрель 2013 года, подтверждений существования суперсимметрии в экспериментах на LHC найдено не было. Как следствие были подняты ограничения на массы скварков и глюино, ранее установленные на Тэватроне и LEP. На основании данных, полученных в эксперименте CMS, нижнее ограничение на массу скварков и глюино в MSSM составляет 800 ГэВ.

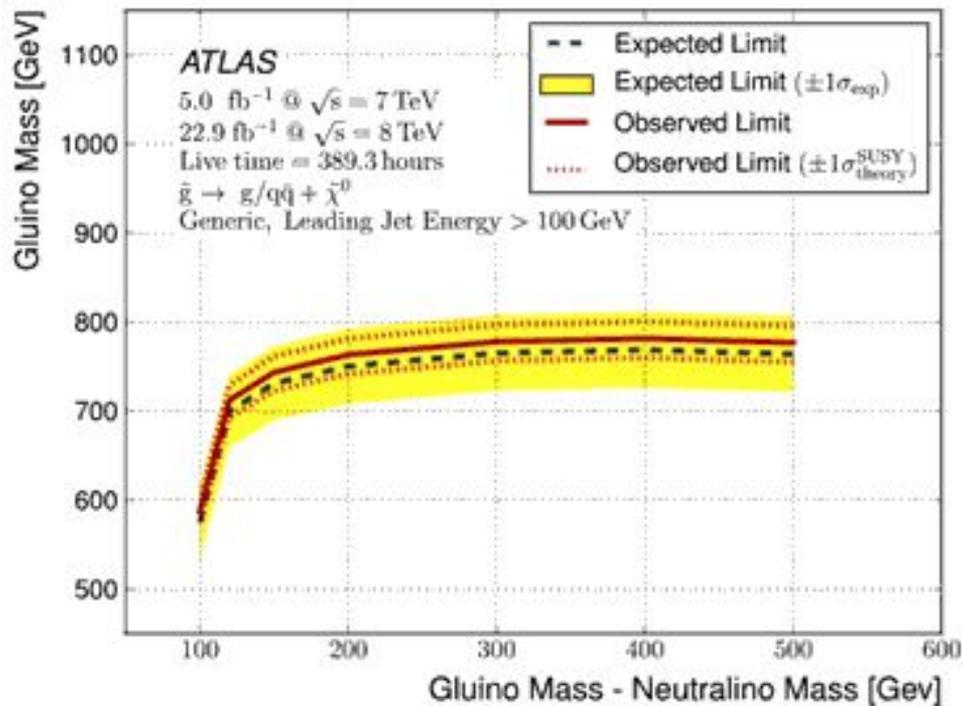


Рис.1. Ограничения на массы глюино в зависимости от величины расщепления по массе между глюино и нейтралино в G-модели R-адронов адронов и временем жизни глюино между  $10^{-5}$  до  $10^3$ с.

Впрочем, необходимо сделать одно существенно важное замечание: анализ полученных данных проводится в рамках одной конкретной суперсимметричной модели, в данном случае – MSSM. Таким образом, на настоящий момент SUSY исключена лишь в своем минимальном варианте.

Обнаруженный на LHC в 2011-2012 годах бозон Хиггса имеет массу 125 ГэВ и константы связи, согласующиеся со стандартной моделью. MSSM предсказывает, что масса легчайшего бозона Хиггса не должна намного превышать массу Z-бозона и в отсутствие «тонкой настройки» (масштаб нарушения суперсимметрии – 1 ТэВ) не должна превышать 130 ГэВ. Более того, для значений параметра MSSM, бозон Хиггса предсказывается в диапазоне масс ниже 114 ГэВ, однако этот диапазон был ранее исключен данными LEP в начале 2000-ых годов.

Однако, результат, полученный на LHC, содержит в себе определенные трудности для модели MSSM, так как значение массы 125 ГэВ является достаточно большим для этой модели и может быть получено только с учетом больших радиационных поправок от t-кварков. Подобное объяснение выглядит весьма «неестественно». Также в 2012 году на LHC были обнаружены отклонения от предсказанных SM констант связи бозона Хиггса, что может служить довольно жестким ограничением на MSSM.

### Суперсимметрия и космология

Наблюдательная космология предполагает наличие новой физики, выходящей за рамки SM. С помощью суперсимметрии можно создать базис для космологии, т.к именно модели SUSY дают ответы на вопросы об инфляции Вселенной,

бариосинтезе и предсказывают кандидатов на роль ТМ. При этом вводят новые калибровочные поля и, соответственно, новые виды взаимодействий. Нарушение глобальной симметрии приводит к существованию Goldstone бозонов Хиггса. Помимо исследований на ускорителе, так же возможно изучение новых типов космочастиц по косвенным измерениям, к примеру из космоархеологии.

Наличие новых законов в суперсимметрии - сохранения R-четности, приводит к стабильности первичных легких частиц, которые родились в ранней Вселенной и сохранились до сегодняшнего дня. Эти частицы являются кандидатами на роль ТМ и являются доказательством влияния суперсимметрии на космологию. Особое внимание уделяется ПЧД (первичные черные дыры), и эффектам связанные с ними, такие как - испарение ПЧД. Они так же позволяют исследовать модель суперсимметрии в астрономическом аспекте.

### **Изобилие LSP**

**SUSY studies illustrate the main principles of cosmoparticle physics – see my review in Symmetry journal and use it to discuss cosmological effects of SUSY. People widely use calculation of LSP abundance, explaining DM, to fix the parameters for searches for SUSY particles at accelerators. All these topics should be discussed in your referat**

### **Список литературы**

- Линде А.Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология – М.: Наука, 1990.
- Окунь Л.Б. Современное состояние и перспективы физики высоких энергий, Успехи Физических Наук, т.134, вып.1, 1981.
- Хлопов М.Ю. Основы космомикрoфизики. – М:УРСС, 2004.
- Емельянов В.М., Белоцкий К.М. Лекции по основам электрослабой модели и новой физике. – М, 2007.
- Рябов В.А., Царев В.А., Цховребов А.М. Поиски частиц темной материи (2008). УФН. 178, 11.
- Горбунов Д.С., Дубовской С.Л., Троицкий С.В. Калибровочный механизм нарушения суперсимметрии (1999). УФН. 169, 7.
- ATLAS Collaboration. Search for supersymmetry in events with photons, bottom quarks, and missing transverse momentum in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector. Phys.Lett. B719 (2013) 261-279
- CMS Collaboration. Search for new physics in events with photons, jets, and missing transverse energy in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV. JHEP 03 (2013) 111
- M. Carena, H. E. Haber. Higgs Boson Theory and Phenomenology. Prog.Part.Nucl.Phys.50:63-152, 2003

- P. Draper, P. Meade, M. Reece, D. Shih. Implications of a 125 GeV Higgs for the MSSM and Low-Scale SUSY Breaking. PhysRevD.85.095007 (2011) [arXiv:1112.3068]
- A.C.Kraan, Eur.Phys.J. C37 (2004) 91
- R.Mackeprang, A.Rizzi, Eur.Phys.J. C50 (2007) 353
- G. Jungman, M. Kamionkowski, K. Griest. Supersymmetric Dark Matter, Phys.Rept. 267 (1996) 195-373
- Maxim Khlopov Cosmological Probes for Supersymmetry. Symmetry (2015) V.7, pp. 815-842