

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

**Кафедра физики элементарных частиц**

**Реферат на тему: «Суперсимметрия»**

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

## 1. Введение

Суперсимметрия (симметрия Ферми-Бозе) - симметрия между фермионами и бозонами. Основная модель физики высоких энергий - Стандартная модель (СМ) - не является суперсимметричной. Основана на  $SU(2) \otimes U(1)$  локальной калибровочной группе электрослабого взаимодействия и  $SU(3)_c$  симметрии КХД, стандартная модель не противоречит наличию суперсимметрии. Однако СМ нуждается в расширении, так как в ней имеют место быть квадратичная расходимость радиационных петлевых поправок к массе хиггсовского поля, нарушение CP-инвариантности в КХД, наличие кандидатов на роль темной материи (ТМ) и т.д. и т.п.

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

### Инфляция

Первая попытка построить модель раздувающейся Вселенной, нацеленная на решение ряда космологических проблем, на основе физического скалярного поля была предпринята А. Гусом в 1981 году. Однако из-за привязанности к фазовому переходу Великого Объединения (ВО) ей были присущи неразрешимые проблемы: проблема образования сильных неоднородностей в результате инфляции, прежние вопросы происхождения в отношении горячей доинфляционной стадии. Было сформулировано требование к свойствам скалярного поля, ответственного за инфляцию – поле инфлатона (фундаментальное скалярное поле), где ключевое значение имеет форма его потенциала. Эти требования являются физической основой инфляционной космологии.



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

### Бариосинтез


Модель бариосинтеза была предложена Афлеком и Дайном в 1985 г. Согласно этой модели в ранней Вселенной мог существовать первичный конденсат скалярных кварков. Скалярные кварки, распадаясь на обычные кварки, создавали затем избыток барионов.

В СМ несохранение барионов из-за электрослабых взаимодействий имеет место при очень высоких температурах. Чтобы электрослабый бариосинтез был возможен, СМ должна содержать значительно большее число хиггсовских бозонов или включать несохранение лептонного числа. Последнее может быть связано с механизмом генерации майорановской массы нейтрино.

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. Т.е. значения поля долин  становятся энергетически неэквивалентными, и их потенциал приобретает минимум. 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.

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

Одной из наиболее популярных категорий кандидатов на роль частиц темной материи (ТМ) являются вимпы (название “вимпы” образовано от англ. аббревиатуры WIMPs-Weakly Interacting Massive Particles), родившиеся вскоре после Большого Взрыва. Термином “вимп” принято называть класс частиц, характеризуемых, прежде всего, такими значениями массы и сечения аннигиляции, которые позволяют им выйти из равновесия в ранней Вселенной с плотностью, характерной для ТМ. Вимпы особенно привлекательны как кандидаты в ТМ ввиду ряда очевидных достоинств. Во-первых, появление вимпов в теоретической физике частиц мотивировано проблемой нарушения электрослабой симметрии. Во-вторых, согласно стандартным космологическим предположениям, их тепловая реликтовая распространенность естественным образом совпадает с той, которая требуется для ТМ. Наконец, требование достаточно эффективной аннигиляции вимпов (для обеспечения соответствующей реликтовой плотности) означает, что взаимодействие вимпов с материей является достаточно сильным для того, чтобы они могли быть обнаружены в прямых экспериментах .

Оценки для современной плотности вимпов дают:  $\Omega_{WIMP} h^2 \approx (3 \cdot 10^{-27} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}) / (\sigma_{ann} v)$ . Среднее сечение аннигиляции, умноженное на скорость для частицы данной массы, имеет максимум, определяемый парциально-волновой унитарностью S-матрицы,  $(\sigma_{ann} v)_{max} \approx 1/m^2_{WIMP}$ . Требование  $\Omega_{WIMP} h^2 \leq 1$  соответствует унитарному пределу и приводит к ограничению на массу частиц ТМ  $m_{WIMP} \leq 340 \text{ ТэВ}$ . В настоящее время в рамках суперсимметричных моделей рассматривается три основных кандидата в ТМ: нейтралино, гравитино, аксино.

Нейтралино – данная частица, является суперпозицией партнеров нейтральных полей В, W и Хиггса. Данная частица может быть легчайшей среди других суперчастиц и быть стабильной.

Частица гравитино ( $\hat{G}$ ) 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 ( $f_a < 10^{12} \text{ ГэВ}$   $m_a > 0.5 \cdot 10^{-9} \text{ эВ}$ ) со спином 1/2 и соответственно появляется при суперсимметричном расширении СМ, включающем механизм Печей-Куин подавления CP-нарушения в КХД. Суперсимметризация моделей Печей-Куин приводит для моделей SUSY следствиям. 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

(а) 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 легкой суперчастицей и, следовательно, при сохранении  $R$  – четности быть стабильной.

Please, put here other model dependent cosmological effects of SUSY: PBHs, antimatter domains, effects of gravitino

### 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 В-мезонов, феноменология бозона Хиггса и т.п.), объяснение которых предоставляют в частности суперсимметричные расширения СМ.

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.

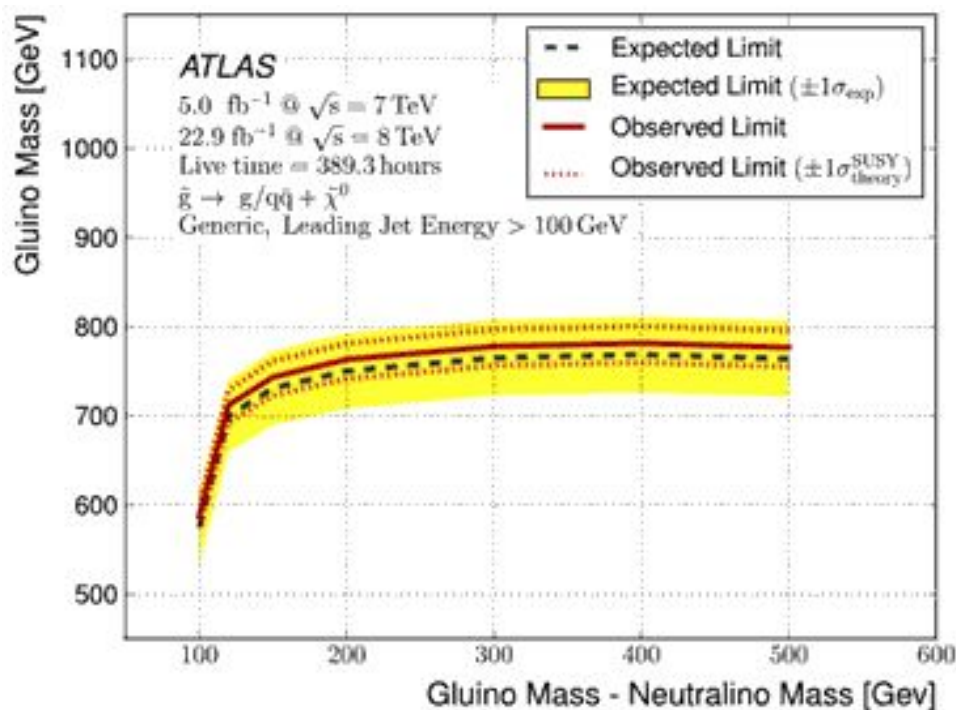


Рис.1. Ограничения на массы глюино в зависимости от величины расщепления по массе между глюино и нейтралينو в G-модели R-адронов адронов и временем жизни глюино между  $10^{-5}$  до  $10^3$ с.

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 СМ констант связи бозона Хиггса, что может служить довольно жестким ограничением на MSSM.

The important example of SUSY studies is proper combination of cosmological, astrophysical and physical effects - demonstrating the main principles of cosmoparticle physics. It should be shown 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