**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.Ведение**

Суперсимметрия (симметрия Ферми-Бозе) - симметрия между фермионами и бозонами. Основная модель физики высоких энергий - Стандартная модель (СМ) - не является суперсимметричной. СМ основанна на SU(2)⊗U(1) локальной калибровочной группе электрослабого взаимодействия и SU(3)c симметрии КХД. Однако, СМ требуется расширить до суперсимметричной модели. Минимальное суперсимметричное расширение Стандартной модели называется «минимальная суперсимметричная Стандартная модель» (MSSM). В MSSM необходимо добавить дополнительные поля так, чтобы построить суперсимметричный мультиплет с каждым полем Стандартной модели. Теории, основанные на суперсимметрии, позволяют решить ряд проблем, присущих СМ, такие как решение проблемы иерархии, нарушение СР - инвариантности, наличие кандидатов на роль ТМ (темной материи) и другие.

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

 **Инфляция**

Идея модели инфляции Вселенной (модель А.Д. Линде, А. Гус, А.А. Старобинский) состоит в том, что в ранней Вселенной было необычное 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,

а(t) ~ eHt ,где H = a’/a=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 ~100 МэВ и ниже протоны и антипротоны аннигилировали бы, превратившись в фотоны, то есть во Вселенной вещество полностью бы исчезло, а осталось бы одно излучение. Отношение количества протонов *np* и реликтовых фотонов *n*γ в настоящее время *np*/*n*γ ≈10-8-10-10. Это означает, что во время горячей стадии, когда температура была очень высокой ( *kT*≫*mpc*2), в первичной плазме существовало не точное, а лишь приблизительно равное количество протонов *np* и антипротонов *np~*  [*np*-*np~*]/*n*γ ∝10-9 .

 Механизм возникновения барионной ассиметрии таков: в нас есть лептокварки (Х) - частицы, переносящие взаимодействия с не сохранением *В*. Их масса зависит от модели: векторные лептокварки обычно имеют массу порядка Мх~ 1014 - 1018 ГэВ, а скалярные ~ 1010 - 1015 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 (LSP – the lightest superpartner) и является кандидатом на роль скрытой массы. Поскольку заряженные стабильные частицы с массой 30 ГэВ – 20 ТэВ не могут составлять темную материю, то потенциально интересными кандидатами в суперсимметричных моделях являются нейтралино, гравитино и аксино.

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

Частица гравитино (*Ĝ*) предсказывается при суперсимметричных расширениях СМ, включающих гравитацию. Гравитино – майорановская частица со спином 3/2 и четырьмя спиновыми состоянтями (два спиновых состояния гравитино приобретает от голдстино при нарушении суперсимметрии, становясь массивным).

Частица аксино – слабо взаимодействующая частица. Аксино – суперпартнер аксиону (fa < 1012 ГэВ ma > 0.5 \* 10-9 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 (ă) с S=1\2 и R=-1 и скаляра - c-аксиона (с-аксино) с S=0 и R=1. Требование соблюдения симметрии UPQ(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 ~ 100 ÷ 1000 ГэВ, возникающих после нарушения SUSY. Масса аксино может варьировать в широких пределах и быть значительно меньше масс других суперпартнеров: ma ~ КэВ ÷ 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 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](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D1%83%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C&action=edit&redlink=1)) 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 ожидались 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 10-5до 103с.

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-скварков. 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.

**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 космомикрофизики. – 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**