**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. **[In Russian I use skrytaya massa, Re-write this part to make it more logical]**

**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) **[Gliner, Dymnikova, early works – Bugrii Trushevsky – see refs in my book]** 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. **[not completely, but very small]** 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 **[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 – 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.

**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 LSSP 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 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**