

**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. СМ основанна на $SU(2)_C \otimes U(1)$ 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 CP - 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,

$a(t) \sim e^{Ht}$, 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 ~ 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 n_p и реликтовых фотонов n_γ 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: в 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 (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 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 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 (\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 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.

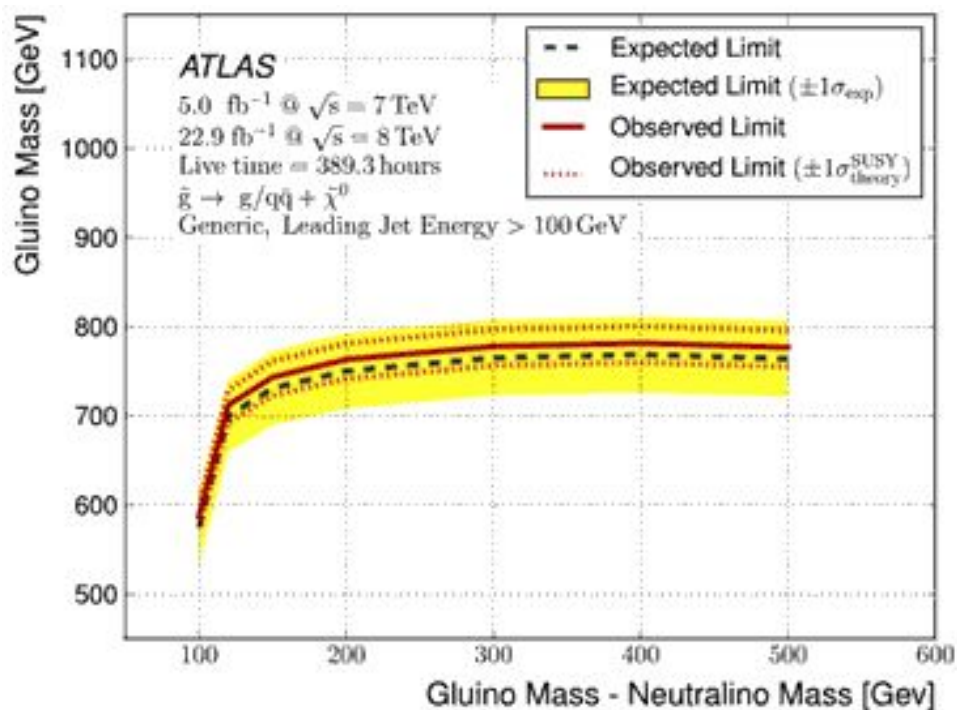


Рис.1. Ограничения на массы глюино в зависимости от величины расщепления по массе между глюино и нейтралино в G-модели R-адронов адронов и временем жизни глюино между 10^{-5} до 10^3 с.

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 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 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
-