

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Институт ядерной физики и технологий (ИЯФит)
КАФЕДРА № 40
«Физика элементарных частиц»

Реферат на тему:
Суперсимметрия

Выполнила ст. группы М19-115
Некрасова Е. А.

Проверил: д.ф.-м.н., профессор
Хлопов М.Ю.

Москва — 2020

Содержание

1	Введение	3
2	SUSY	4
2.1	MSSM	4
2.2	R-чётность	5
3	Решение некоторых проблем СМ	7
3.1	Проблема иерархии	7
3.2	Унификация калибровочных бегущих констант	8
3.3	Скрытая масса	9
3.4	Инфляция	10
3.5	Бареосинтез	10
4	Экспериментальная проверка SUSY	11
5	Заключение	13
	Список литературы	14

1 Введение

К 1940-м годам физики выделили два класса элементарных частиц: бозоны и фермионы. В 1960-х в результате изучения сильных взаимодействий было обнаружено множество адронов, которые были организованы в мультиплеты $SU(3)$, тогда же, в 1966 году Х. Миядзава предложил симметрию, связывающую мезоны и барионы [1], данная концепция получила название *суперсимметрия* (SUSY). Однако модель, предложенная Миядзавой, касалась только внутренней симметрии и не содержала описания механизма нарушения этой симметрии и поэтому в то время была в значительной степени проигнорирована.

В дальнейшем Ж.Л. Жерве и Б. Сакита (1971 г.) [2], Ю.А. Гольфанд и Е.П. Лихтман (1971 г.) [3], Д.В. Волков и В.П. Акулов (1972, 1973 гг.) [4, 5], независимо друг от друга заново открыли суперсимметрию в контексте квантовой теории поля, как симметрию, устанавливающую связь между элементарными частицами разной квантовой природы, и объединяющую пространство-время и внутреннюю симметрию микроскопических явлений.

Наконец, Дж. Весс и Б. Зумино (1974 г.) [6, 7] определили характерные особенности перенормировки четырехмерных суперсимметричных теорий поля и представили приложения для физики элементарных частиц.

К настоящему дню суперсимметричные модели ограничены множеством экспериментов, в то же время отсутствуют экспериментальные данные, подтверждающие эту теорию. Это привело к появлению открытой критики по отношению к суперсимметрии [8]. Более подробно текущий статус экспериментальных проверок суперсимметрии будет рассмотрен в разделе 4.

2 SUSY

Суперсимметрия – это совершенно новый вид симметрии, рассматривающийся в теоретической физике, которая на фундаментальном уровне связывает между собой бозоны и фермионы. Поскольку симметрия между известными бозонами и фермионами отсутствует, в рамках суперсимметрии каждой частице стандартной модели ставится в соответствие новая частица - её суперсимметричный партнёр, причём таким образом, что суперпартнеры фермионов являются бозонами, а суперпартнеры бозонов – фермионами. Так глюонам, фотонам, Z^0 и W^\pm бозонам соответствуют глюино (\tilde{g}), фотино ($\tilde{\gamma}$), вино (\tilde{W}^\pm) и зино (\tilde{Z}^0). Аналогично кваркам и лептонам ставятся в соответствие скварки и слептоны.

В простейших теориях суперсимметрии суперпартнеры обладают одинаковой массой и внутренними квантовыми числами, помимо спина. Однако ввиду отсутствия наблюдаемых суперсимметричных частиц необходимо предположить, что суперсимметрия нарушена, и суперсимметричные партнеры должны иметь массу отличную от обычных частиц. Разработано много разновидностей суперсимметричных теорий, которые при низких энергиях похожи на Стандартную модель и не противоречат имеющимся сейчас экспериментальным данным. Поскольку суперсимметрия до сих пор не открыта экспериментально, теоретики при построении таких моделей руководствуются прежде всего математической самосогласованностью теории.

Один из главных параметров суперсимметричных моделей — это их размерность, которая показывает, сколько типов суперсимметрии заложено в теорию. Размерность принято обозначать числом N . Минимальная суперсимметричная стандартная модель (MSSM) отвечает $N = 1$, максимально суперсимметричная теория без гравитации, включающая калибровочные взаимодействия, имеет $N = 4$, максимальная возможная размерность $N = 8$, она соответствует супергравитации.

2.1 MSSM

Простейшей реализацией суперсимметрии является минимальная суперсимметричная стандартная модель (MSSM), содержащая минимальное число дополнительных частиц и соответствующая, как было сказано выше, размерности $N = 1$. Состав этой теории представлен на рис. 1.

Так как суперсимметрия нарушена, массы обычных частиц и суперсимметричных партнеров из рис. 1 не совпадают. Разные виды суперсимметричных теорий могут сильно различаться своим спектром масс частиц, то есть тем, как именно массы разных суперсимметричных частиц располагаются друг относительно друга. На рис. 2 для примера показан массовый спектр одной разновидности MSSM [9].

Names	Spin	P_R	Gauge Eigenstates	Mass Eigenstates
Higgs bosons	0	+1	$H_u^0 \ H_d^0 \ H_u^+ \ H_d^-$	$h^0 \ H^0 \ A^0 \ H^\pm$
squarks	0	-1	$\tilde{u}_L \ \tilde{u}_R \ \tilde{d}_L \ \tilde{d}_R$	(same)
			$\tilde{s}_L \ \tilde{s}_R \ \tilde{c}_L \ \tilde{c}_R$	(same)
			$\tilde{t}_L \ \tilde{t}_R \ \tilde{b}_L \ \tilde{b}_R$	$\tilde{t}_1 \ \tilde{t}_2 \ \tilde{b}_1 \ \tilde{b}_2$
sleptons	0	-1	$\tilde{e}_L \ \tilde{e}_R \ \tilde{\nu}_e$	(same)
			$\tilde{\mu}_L \ \tilde{\mu}_R \ \tilde{\nu}_\mu$	(same)
			$\tilde{\tau}_L \ \tilde{\tau}_R \ \tilde{\nu}_\tau$	$\tilde{\tau}_1 \ \tilde{\tau}_2 \ \tilde{\nu}_\tau$
neutralinos	1/2	-1	$\tilde{B}^0 \ \tilde{W}^0 \ \tilde{H}_u^0 \ \tilde{H}_d^0$	$\tilde{N}_1 \ \tilde{N}_2 \ \tilde{N}_3 \ \tilde{N}_4$
charginos	1/2	-1	$\tilde{W}^\pm \ \tilde{H}_u^\pm \ \tilde{H}_d^\pm$	$\tilde{C}_1^\pm \ \tilde{C}_2^\pm$
gluino	1/2	-1	\tilde{g}	(same)
goldstino (gravitino)	1/2 (3/2)	-1	\tilde{G}	(same)

Рис. 1: Состав MSSM

2.2 R-чётность

В некоторых суперсимметричных моделях вводится новое мультипликативное квантовое число, называемое четностью материи или R-четностью, и определяемое следующим образом:

$$P_R = (-1)^{3(B-L)+2s}$$

При этом считается, что все известные частицы СМ обладают положительной R-четностью, а их суперпартнеры – отрицательной. Достоинство четности материи состоит в том, что теоретически она может быть точной и фундаментальной симметрией, чего не могут сами B и L , поскольку известно, что они нарушаются непертурбативными электрослабыми эффектами. Если R-четность точно сохраняется, то не может быть смешивания между суперсимметричными частицами и частицами с $P_R = +1$. Более того, каждая вершина взаимодействия в теории содержит четное число частиц с $P_R = -1$. Это имеет ряд важных феноменологических последствий:

- Самая легкая частица с $P_R = -1$, называемая «легчайшей суперсимметричной частицей» или LSP, должна быть абсолютно стабильной
- Если LSP электрически нейтрален (хиггсино, фотино), она слабо взаимодействует с обычным веществом и поэтому может стать привлекательным кандидатом в небарионную скрытую массу [10]

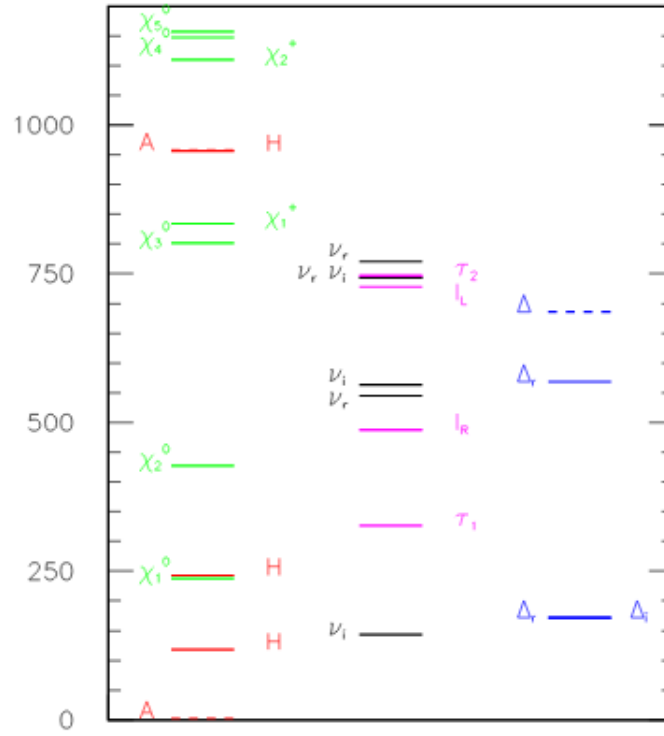


Рис. 2: Спектр масс суперсимметричных частиц в одной из разновидностей MSSM. Энергия по вертикали отложена в ГэВ. Массы глюино и скварков превышают 1,5 ТэВ и не показаны. Рисунок взят из работы [9]

- В экспериментах на коллайдерах суперчастицы образуются парами, которые затем распадаются на LSP и дают сигнал «недостающей энергии»

3 Решение некоторых проблем СМ

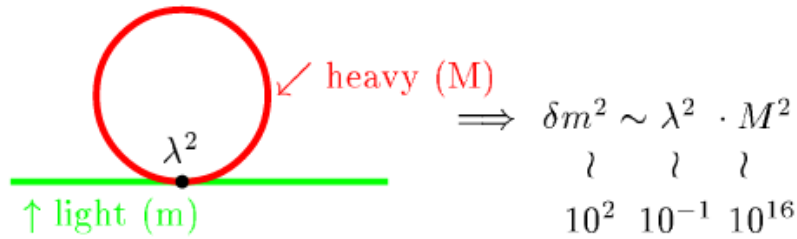
К настоящему моменту господствующей теорией в физике элементарных частиц является Стандартная модель (СМ). Хотя Стандартная модель считается теоретически самосогласованной и успешно описывает большую часть экспериментальных данных, она не является полной теорией фундаментальных взаимодействий и имеет ряд нерешённых проблем. Часть этих проблем может быть решена посредством введения суперсимметрии.

3.1 Проблема иерархии

В физике высоких энергий существует по крайней мере два фундаментальных масштаба - планковская масса $M_{Pl} \approx 10^{19}$ ГэВ, определяющая масштаб квантовой гравитации, и электрослабый масштаб $M_{ew} \approx 10^2$ ГэВ, определяющий масштаб слабых взаимодействий. Проблема, связанная с разницей масштабов этих шкал называется *проблемой иерархии*. Собственно проблему можно разделить на две части:

1. Почему $M_{ew} \ll M_{Pl}$?
2. Устойчива ли эта иерархия к квантовым поправкам?

Для ответа на вторую часть рассмотрим поправки к массе хиггсовского бозона [11]. Соответствующие фейнмановские диаграммы представлены на рис.3. Поправки, пропорциональные квадрату массы тяжелой частицы, разрушают иерархию, если только они не сокращаются. Подобное сокращение с точностью $\sim 10^{14}$ требует тонкой подстройки констант связи.



$$\begin{array}{c} \text{heavy (M)} \\ \swarrow \\ \text{loop} \\ \lambda^2 \\ \uparrow \text{light (m)} \end{array} \quad \Rightarrow \quad \delta m^2 \sim \lambda^2 \cdot M^2$$

$$\lambda^2 = 10^2 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{16}$$

Рис. 3: Радиационные поправки к массе лёгкого хиггсовского бозона

В суперсимметрии возможно получить подобное сокращение. Более того, суперсимметрия автоматически сокращает все квадратичные поправки во всех порядках теории возмущений. В силу наличия дополнительного множителя (-1) , следующего из ферми-статистики, вклады бозонных петель сокращаются со вкладом фермионных, как показано на рис.4.

В обоих случаях, представленных на рис.4, имеет место сокращение квадратичных членов. Оно справедливо с точностью до шкалы нарушения суперсимметрии, M_{SUSY} , которая не должна быть слишком большой (≤ 1 ТэВ), чтобы тонкая подстройка была естественной.

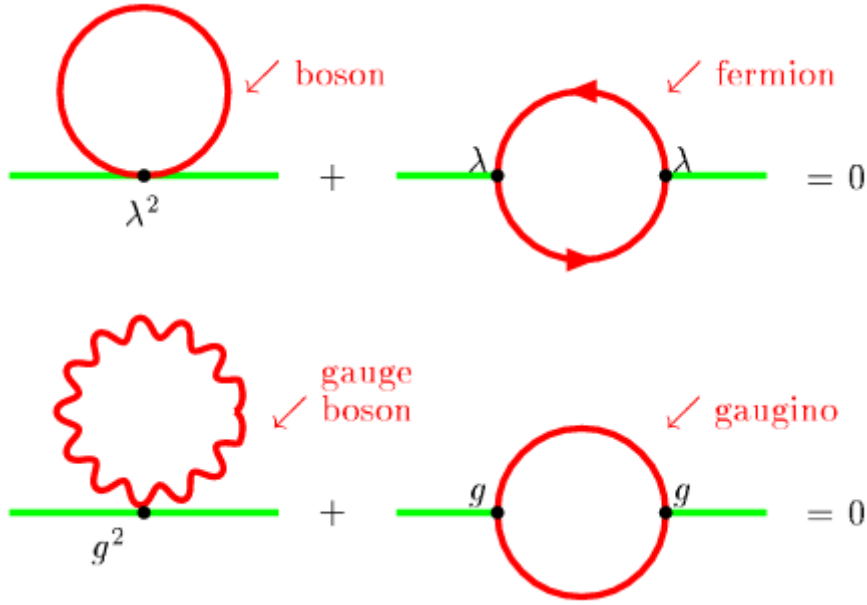


Рис. 4: Сокращение квадратичных расходимостей

Для ответа на первый вопрос необходимо вспомнить, что ввиду отсутствия наблюдаемых суперсимметричных частиц необходимо предположить, что суперсимметрия нарушена. Обозначим m наибольший масштаб массы этого нарушения, тогда соответствующая поправка к массе хиггсовского бозона примет вид

$$\Delta m_H \sim m^2 \ln \frac{\Lambda}{m}$$

где Λ - ультрафиолетовое обрезание импульса, используемое для регуляции петлевого интеграла; его можно интерпретировать, как характерный масштаб энергий новой физики. Если взять $\Lambda \sim M_{Pl}$, можно оценить [12], что m и, следовательно, массы, по крайней мере, нескольких самых легких суперпартнеров, не должны быть намного больше, чем масштаб ТэВ, чтобы обеспечить ожидаемое значение вакуума Хиггса, приводящее к $m_W, m_Z = 80, 4, 91, 2$ ГэВ. Таким образом связь между M_{Pl} и M_{ew} может быть обеспечена через масштаб нарушения суперсимметрии.

3.2 Унификация калибровочных бегущих констант

Согласно гипотезе Великого объединения взаимодействий (GUT) калибровочная симметрия возрастает с энергией. Все известные взаимодействия являются различными ветвями единого взаимодействия, связанного с простой калибровочной группой, включающей в себя группу СМ. При высокой энергии происходит объединение калибровочных взаимодействий в одну силу.

Для достижения данной цели нужно рассмотреть, как константы связи изменяются с изменением энергии. Это описывается уравнениями ренормгруппы.

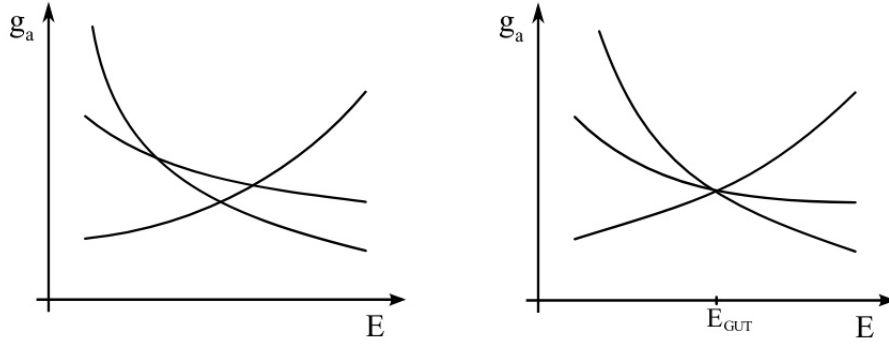


Рис. 5: Левый рисунок - движение калибровочных констант в не-суперсимметричной Стандартной модели, правый - в MSSM. Рисунок взят из работы [13].

В СМ сильные и слабые константы взаимодействия, ассоциированные с неабелевыми калибровочными группами, убывают с увеличением энергии, в то время как электромагнитная, ассоциированная с абелевой группой, наоборот, возрастает. Поэтому оказывается возможным, что при некоторой энергии они становятся равными.

Точный путь движения калибровочных констант связи определяется низкоэнергетическим спектром полей в теории. Из точных измерений Стандартной модели мы знаем, что с ее спектром движение трех бегущих констант таково, что они не пересекутся одновременно ни в одной точке при высоких энергиях. Однако в спектре MSSM три различных константы могут одновременно пересекаться при некоторой большой энергии E_{GUT} . Это считается главным феноменологическим успехом суперсимметричных теорий и намекает на суперсимметричную теорию великого объединения при больших энергиях.

3.3 Скрытая масса

Стандартная космологическая модель, Λ CDM, хорошо описывающая историю Вселенной в соответствии со многими астрономическими наблюдениями, включает в себя скрытую массу, однако в Стандартной модели частиц кандидатов в скрытую массу нет. Теории частиц, в том числе суперсимметрия, могут предложить кандидатов в скрытую массу.

Если R-четность сохраняется, то самая легкая частица, вводимая суперсимметрией, называемая «легчайшей суперсимметричной частицей» (LSP), должна быть абсолютно стабильной [14, 15]. Если LSP к тому же электрически нейтрален и не участвует в сильном взаимодействии, она взаимодействует с обычным веществом только с помощью слабого взаимодействия (WIMP) и поэтому может стать привлекательным кандидатом на роль скрытой массы [16] и попадает в категорию холодной темной материи (CDM). Основными кандидатами в скрытую массу от суперсимметрии являются нейтралино (линейная комбинация зино, фотино и хиггсино), гравитино, sneйтрино и аксино.

3.4 Инфляция

Идея ускоренного расширения Вселенной на ранних стадиях была высказана в конце 1970-х - начале 1980-х годов. Инфляция была призвана разрешить ряд существенных недостатков модели горячей Вселенной, в частности проблему горизонта, плоскостности, крупномасштабной структуры и других проблем. А.Д.Линде, А.Гусом [17], а также А.А.Старобинским [18] была сформулирована основная идея инфляционной модели Вселенной: в ранней Вселенной присутствовала необычная форма материи, которая создавала «антигравитацию», заставляя Вселенную расширяться с ускорением. В данной модели предполагается существование скалярного поля - инфлатона, ответственного за расширение Вселенной.

Суперсимметричные теории содержат различных кандидатов на роль инфлатона, например, sneutrino или комбинация хиггсовских бозонов в рамках MSSM [19].

3.5 Бареосинтез

В физической космологии проблема барионной асимметрии, это наблюдаемый дисбаланс в барионной и антибарионной материи на макроскопическом уровне вплоть до масштабов скоплений галактик. Предполагается, что барионный избыток был образован в процессе бариосинтеза, приводящем к барионной асимметрии изначально барион-симметричной Вселенной. Условия, которые могут привести к динамической асимметрии между барионами и антибарионами из первоначально зарядово-симметричного вещества в горячей Вселенной, были сформулированы Сахаровым [20]: нарушение барионного числа, нарушение C и CP и отклонение от теплового равновесия, что возможно только во время фазового перехода I рода.

Стандартная модель может удовлетворять всем трем условиям при прохождении электрослабого фазового перехода. Но CP -нарушение слишком мало [21], и фазовый переход не является строго первого рода [22].

SUSY предоставляет возможность электрослабого фазового перехода I рода, а также включает новые источники нарушения CP инвариантности, которые возникают в теории путем введения дополнительных фаз для дублетов полей Хиггса и комплексных параметров в потенциале.

4 Экспериментальная проверка SUSY

На сегодняшний день Большой адронный коллайдер ЦЕРН (LHC) уже исключил значительные участки пространства суперсимметричных параметров, основанные на протон-протонных столкновениях при энергиях 5 - 13 ТэВ.

На адронных коллайдерах суперсимметричные частицы могут образовываться парами в результате электрослабых (рис.6 а) или сильных (рис.6 б, в) взаимодействий в партонных столкновениях.

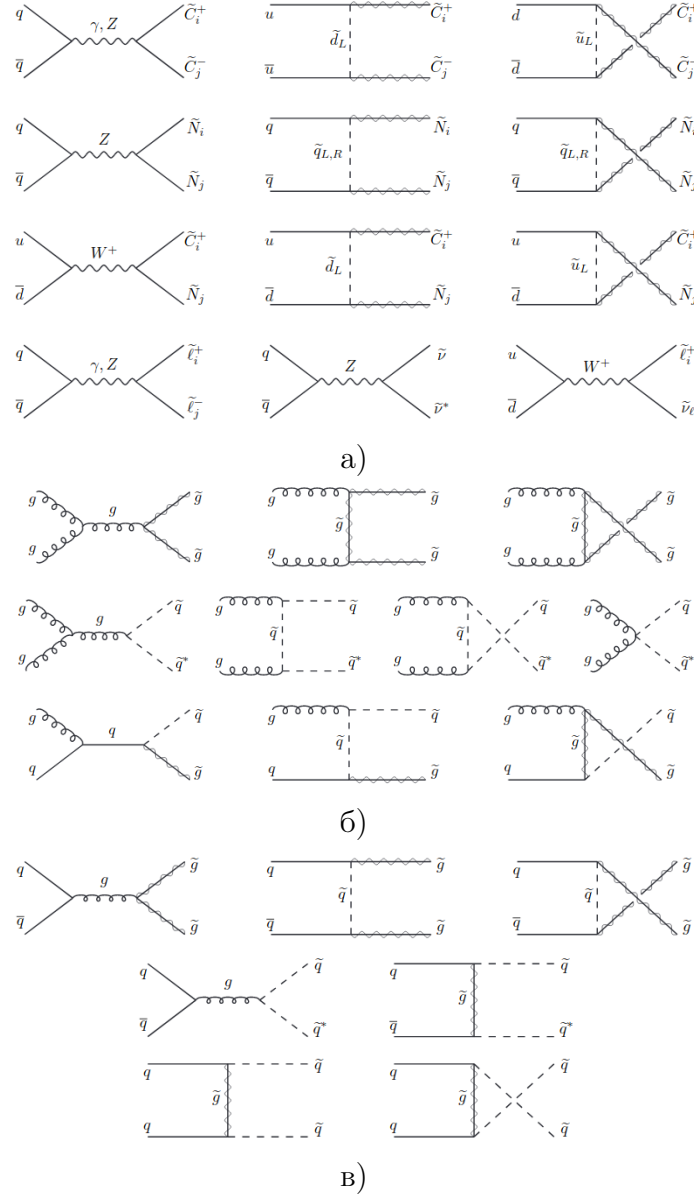


Рис. 6: Диаграммы Фейнмана для а)электрослабого рождения частиц в результате аннигиляции кварка и антикварка, б)рождения глюино и скварков в результате слияния глюон-глюон и глюон-кварк, в)рождения глюино и скварков в результате аннигиляции сильного кварка и антикварка и кварк-кваркового рассеяния

SUSY предсказывает существование сильно взаимодействующих частиц на ТэВ-ном масштабе энергий, которые распадаются на слабо взаимодействующие частицы. Распад образовавшихся частиц приводит к конечным состояниям с двумя нейтральными LSP, которые покидают детектор. При этом LSP дают экспериментальный сигнал в виде недостающей энергии. На адронных коллайдерах детектируется только часть недостающей энергии, поперечная встречным пучкам, обычно обозначаемая E_T или E_T^{miss} . Итак, в общем случае наблюдаемые сигналы суперсимметрии на адронных коллайдерах - это n лептонов + m струй + E_T , где n или m может быть 0. Эти сигналы имеют значительные фоны Стандартной модели, особенно от процессов, связанных с образованием W и Z бозонов, распадающихся на нейтрино, которые также дают сигнал E_T .

Ниже приведены несколько последних результатов поиска суперчастиц, изображенных как исключенные области. На всех графиках исключенные области находятся под соответствующими кривыми, это отвечает меньшим значениям масс и параметров модели.

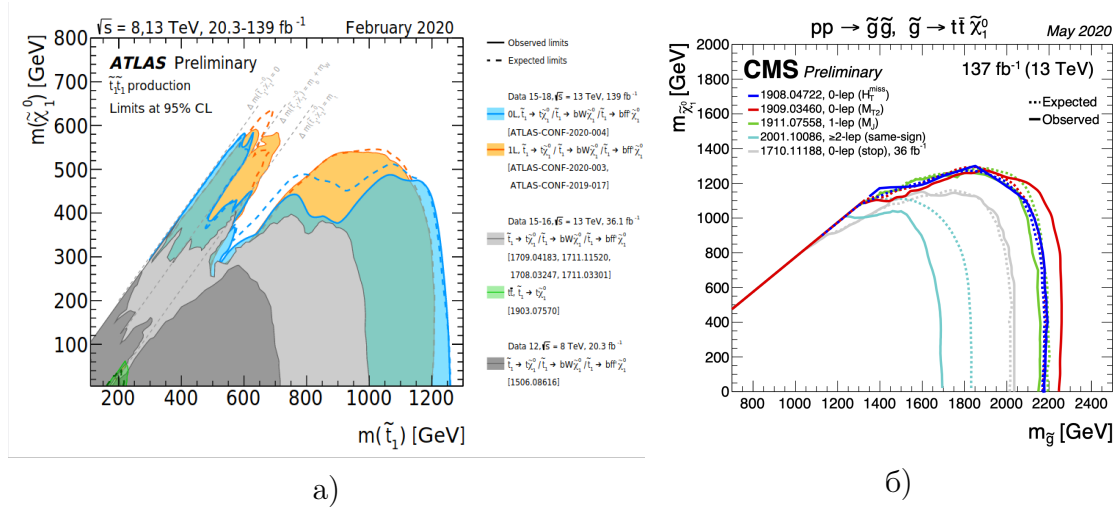


Рис. 7: Последние ограничения на SUSY, полученные коллаборациями ATLAS и CMS на 2020 год

По состоянию на 2020 год суперсимметрия является физической гипотезой, не подтверждённой экспериментально, однако поиск суперсимметрии остаётся одной из важных задач физики высоких энергий. Самые последние экспериментальные результаты с LHC доступны на веб-страницах результатов физики ATLAS и CMS.

5 Заключение

Стандартная модель физики высоких энергий, дополненная массами нейтрино, обеспечивает удивительно успешное описание большей части экспериментальных данных. Однако она не является полной конечной теорией и содержит большое число проблем, например, большое число внешних параметров, расходимости, возникающие при учете петлевых поправок, объяснение природы гравитации, скрытой массы, инфляции и бариогенезиса. Поэтому кажется очевидным, что Стандартная модель находится в стадии разработки и ее необходимо расширить. Необходимость усовершенствования стандартной модели привела к разработке большого количества расширений. Среди этого многообразия теоретических конструкций одной из наиболее популярных является суперсимметрия.

К настоящему дню разработано большое число различных суперсимметричных расширений Стандартной модели, более или менее успешно справляющихся с решением её проблем. Кроме того, суперсимметрия позволяет естественным образом ввести гравитацию и решить проблему иерархий и унифицирования калибровочных констант связи, становясь таким образом ключом к созданию теории Великого Объединения. Также хорошо разработаны различные решения проблем самой суперсимметрии, в частности, предложены механизмы её нарушения.

В то же время, несмотря на математическую и физическую красоту, теория обладает недостатками. Существенным минусом суперсимметрии является обилие параметров (характеризующих, например нарушение SUSY). Кроме того, до сих пор не найдено никаких экспериментальных подтверждений суперсимметрии. Таким образом вопрос о возможном существовании суперсимметрии остаётся открытым, а поиск суперпартнёров до сих пор является одной из важных задач современной экспериментальной физики.

Список литературы

- [1] H. Miyazawa. «Baryon Number Changing Currents». в: *Prog. Theor. Phys.* 36.6 (1966), с. 1266—1276. DOI: 10.1143/PTP.36.1266.
- [2] Jean-Loup Gervais и B. Sakita. «Field Theory Interpretation of Supergauges in Dual Models». в: *Nucl. Phys. B* 34 (1971). под ред. K. Kikkawa, M. Virasoro и S.R. Wadia, с. 632—639. DOI: 10.1016/0550-3213(71)90351-8.
- [3] Yu.A. Golfand и E.P. Likhtman. «Extension of the Algebra of Poincare Group Generators and Violation of p Invariance». в: *JETP Lett.* 13 (1971), с. 323—326.
- [4] D.V. Volkov и V.P. Akulov. «Possible universal neutrino interaction». в: *JETP Lett.* 16 (1972). под ред. J. Wess и V.P. Akulov, с. 438—440.
- [5] D.V. Volkov и V.P. Akulov. «Is the Neutrino a Goldstone Particle?» в: *Phys. Lett. B* 46 (1973), с. 109—110. DOI: 10.1016/0370-2693(73)90490-5.
- [6] J. Wess и B. Zumino. «A lagrangian model invariant under supergauge transformations». в: *Nucl. Phys. B* 49 (1974), с. 52—54. DOI: 10.1016/0370-2693(74)90578-4.
- [7] J. Wess и B. Zumino. «Supergauge Transformations in Four-Dimensions». в: *Nucl. Phys. B* 70 (1974). под ред. A. Salam и E. Sezgin, с. 39—50. DOI: 10.1016/0550-3213(74)90355-1.
- [8] M. Shifman. «Frontiers Beyond the Standard Model: Reflections and Impressionistic Portrait of the conference». в: *Mod. Phys. Lett. A* 27 (2012), с. 1230043. DOI: 10.1142/S0217732312300431. arXiv: 1211.0004 [physics.pop-ph].
- [9] F. Bazzocchi и др. «Calculable inverse-seesaw neutrino masses in supersymmetry». в: *Phys. Rev. D* 81 (2010), с. 051701. DOI: 10.1103/PhysRevD.81.051701. arXiv: 0907.1262 [hep-ph].
- [10] H. Goldberg. «Constraint on the Photino Mass from Cosmology». в: *Phys. Rev. Lett.* 50 (1983). под ред. M.A. Srednicki. [Erratum: *Phys.Rev.Lett.* 103, 099905 (2009)], с. 1419. DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.1419.
- [11] Д.И. Казаков. «Суперсимметричное расширение Стандартной модели фундаментальных взаимодействий». в: *Физика фундаментальных взаимодействий* (2006).
- [12] Stephen P. Martin. «A Supersymmetry primer». в: *Adv. Ser. Direct. High Energy Phys.* 21 (2010). под ред. Gordon L. Kane, с. 1—153. DOI: 10.1142/9789812839657_0001. arXiv: hep-ph/9709356.
- [13] Fernando Quevedo, Sven Krippendorff и Oliver Schlotterer. «Cambridge Lectures on Supersymmetry and Extra Dimensions». в: (2010). arXiv: 1011.1491 [hep-th].
- [14] Glennys R. Farrar и Pierre Fayet. «Phenomenology of the Production, Decay, and Detection of New Hadronic States Associated with Supersymmetry». в: *Phys. Lett. B* 76 (1978), с. 575—579. DOI: 10.1016/0370-2693(78)90858-4.

- [15] Gerard 't Hooft. «Symmetry Breaking Through Bell-Jackiw Anomalies». в: *Phys. Rev. Lett.* 37 (1976). под ред. Mikhail A. Shifman, с. 8—11. DOI: 10.1103/PhysRevLett.37.8.
- [16] John R. Ellis и др. «Supersymmetric Relics from the Big Bang». в: *Nucl. Phys. B* 238 (1984). под ред. M.A. Srednicki, с. 453—476. DOI: 10.1016/0550-3213(84)90461-9.
- [17] Alan H. Guth. «The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems». в: *Adv. Ser. Astrophys. Cosmol.* 3 (1987). под ред. Li-Zhi Fang и R. Ruffini, с. 139—148. DOI: 10.1103/PhysRevD.23.347.
- [18] Alexei A. Starobinsky. «Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe». в: *JETP Lett.* 30 (1979). под ред. I.M. Khalatnikov и V.P. Mineev, с. 682—685.
- [19] Arindam Chatterjee и Anupam Mazumdar. «Tuned MSSM Higgses as an inflaton». в: *JCAP* 09 (2011), с. 009. DOI: 10.1088/1475-7516/2011/09/009. arXiv: 1103.5758 [hep-ph].
- [20] A.D. Sakharov. «Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe». в: *Sov. Phys. Usp.* 34.5 (1991), с. 392—393. DOI: 10.1070/PU1991v034n05ABEH002497.
- [21] C. Jarlskog. «Commutator of the Quark Mass Matrices in the Standard Electroweak Model and a Measure of Maximal CP Violation». в: *Phys. Rev. Lett.* 55 (1985), с. 1039. DOI: 10.1103/PhysRevLett.55.1039.
- [22] Michael Dine, Patrick Huet и Jr. Singleton Robert L. «Baryogenesis at the electroweak scale». в: *Nucl. Phys. B* 375 (1992), с. 625—648. DOI: 10.1016/0550-3213(92)90113-P.