

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**РЕФЕРАТ**  
**на тему:**  
**Суперсимметрия (SUSY)**

Выполнил  
магистр группы М21-115

\_\_\_\_\_ Н. Д. Зарецкий

Москва 2022

# Оглавление

Введение . . . . .	2
1 SUSY . . . . .	2
1.1 MSSM . . . . .	3
1.2 R-четность . . . . .	3
1.3 Объединение с гравитацией . . . . .	4
1.4 Супергравитация . . . . .	5
2 Проблемы СМ . . . . .	5
2.1 Объединение калибровочных констант связи . . . . .	5
2.2 Проблема иерархий . . . . .	6
2.3 Радиационное нарушение электрослабой симметрии . . . . .	7
3 SUSY в космологии . . . . .	8
3.1 Скрытая масса . . . . .	8
3.2 Инфляция . . . . .	9
3.3 Бариосинтез . . . . .	9
4 Поиск SUSY на эксперименте . . . . .	10
5 Заключение . . . . .	11
Список использованных источников . . . . .	13

# Введение

В современной физике элементарных частиц понятие симметрий является ключевым, так как с помощью симметрии можно создавать лагранжианы и, как следствие, уравнения движения для конкретных полей и частиц. Концепция суперсимметрии, математический аппарат которой был разработан в 1971 году Юрием Гольфандом и Евгением Лихтманом (ФИАН) [4], а приложения ее к физике элементарных частиц были представлены Дж. Вессом и Б. Зумино [13] в 1973 году, сильно отличается от других, более привычных, симметрий (например, симметрия группы Лоренца) тем, что она описывает переходы бозонов в фермионы и наоборот. Фермионы подчиняются статистике Ферми-Дирака, бозоны - статистике Бозе-Эйнштейна, то есть симметрия не сохраняет статистику. В теории суперсимметрии бозоны и фермионы объединяются в единое целое, называемое суперполем, что означает, что каждый фермион и каждый бозон должен иметь суперсимметричного партнера с такой же массой и квантовыми числами, но с отличным спином и подчиняющегося другой статистике. Таким образом, у каждого фермиона появляется бозонный партнер, а у каждого бозона - фермионный. Стоит отметить, что число частиц при этом удваивается.

Суперсимметрия может стать ключом к решению некоторых проблем физики частиц, которые не укладываются в рамки Стандартной Модели (СМ). К предпосылкам расширения СМ относят, например, проблему иерархий и отсутствие ограничения сверху на массу бозона Хиггса. Также суперсимметрия является базисом для других теорий, таких, как теория суперструн и теория супергравитации. Наконец, минимальное суперсимметричное расширение СМ (MSSM) позволяет говорить о великом объединении [2] и о кандидатах на роль скрытой массы.

## 1 SUSY

Суперсимметрия является расширением известных симметрий пространства-времени, когда алгебра Пуанкаре дополняется фермионными операторами  $Q_\alpha$  [9]. В привычном случае при действии на физическое состояние генератором группы симметрии получается другое физическое состояние, перемещенное в пространстве-времени, но с такими же квантовыми числами. В случае суперсимметрии квантовые числа тоже остаются неизменными, однако генератор группы суперсимметрии  $Q_\alpha$  меняет бозоны на фермионы и наоборот. Таким образом, для каждой известной частицы появляется суперсимметричный партнер со спином, отличающимся на  $\frac{1}{2}$ .

Так как суперсимметричные партнеры до сих пор не были обнаружены, в теорию вводятся поправки, нарушающие суперсимметрию, что позволяет суперсимметричным партнерам частиц иметь массу, отличную

от изначальных частиц. Стоит отметить, что при введении таких поправок основные достоинства суперсимметрии сохраняются. Также в теории с "нарушенной" суперсимметрией появляется возможность ввести суперсимметричные частицы скрытой массы.

Разработано много разновидностей суперсимметричных теорий, которые при низких энергиях похожи на Стандартную модель и не противостоят имеющимся сейчас экспериментальным данным. Один из главных параметров суперсимметричных моделей — это число  $N$ , показывающее количество заложенных в модель типов суперсимметрии. Например, у минимально суперсимметричной модели MSSM  $N=1$ , а у максимальной суперсимметричной теории с калибровочными взаимодействиями без гравитации  $N=4$  [8].

Вне зависимости от вида суперсимметричной теории, есть ряд предсказаний, справедливых для каждой разновидности. Так, Хиггсовский сектор должен быть устроен сложнее, чем в СМ, и суперсимметричные частицы не могут рождаться в одиночку (т.н. R-четность) и распадаться только на обычные частицы.

## 1.1 MSSM

Минимально суперсимметричная стандартная модель (MSSM) является простейшим расширением Стандартной Модели. В Стандартную Модель не входят суперсимметричные партнеры известных частиц, поэтому в MSSM вводятся соответствующие суперполя для каждого синглета и дублета частиц СМ. Фермионам (лептонам и кваркам) ставятся в соответствие скалярные поля (слептоны и скварки), в то время как суперсимметричным партнером бозона Хиггса является фермион Хиггсино. Калибровочные бозонные поля (глюоны,  $Z^0$ ,  $W^\pm$  и  $\gamma$ ) становятся частью векторных суперполей и получают суперсимметричных партнеров глюино, вино, фотино соответственно. На рисунке 1 показан состав MSSM [12]. Суперполя обозначены заглавной буквой с "шляпкой" (например,  $\hat{Q}$ ), суперсимметричные партнеры частиц обозначены "волной" (например,  $\tilde{u}$ ). Отдельно стоит отметить, что в теории суперсимметрии необходимы 2 Хиггс-дублета с противоположными гиперзарядами  $Y$  (в отличие от Стандартной Модели), для того чтобы обеспечить калибровочную инвариантность теории.

## 1.2 R-четность

При записи  $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ -инвариантного суперпотенциала в общем виде [14] становятся возможны процессы с нарушением сохранения лептонного и барионного чисел, что приводит к возможности распада протона на древесном уровне путем обмена скалярным партнером нижнего d-

Superfield	Particle content
$\hat{Q}$	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tilde{u}_L \\ \tilde{d}_L \end{pmatrix}$
$\hat{U}^\dagger$	$\bar{u}_R, \tilde{u}_R^*$
$\hat{D}^\dagger$	$\bar{d}_R, \tilde{d}_R^*$
$\hat{L}$	$\begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tilde{\nu}_L \\ \tilde{e}_L \end{pmatrix}$
$\hat{E}^\dagger$	$\bar{e}_R, \tilde{e}_R^*$
$\hat{H}_1$	$H_1, \tilde{h}_1$
$\hat{H}_2$	$H_2, \tilde{h}_2$

Superfield	Particle content
$\hat{G}^a$	$g, \tilde{g}$
$\hat{W}^i$	$W_i, \tilde{w}_i$
$\hat{B}$	$B, \tilde{b}$

Рисунок 1 – Состав MSSM

кварка. Чтобы избежать этого, вводят новый тип симметрии (R-четность), подавляющий подобные процессы.

R-четность вводится как мультипликативное квантовое число, при этом у всех частиц СМ  $R = 1$ , а у всех их суперсимметричных партнеров  $R = -1$ . Таким образом,

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

где  $B$  - барионное число,  $L$  - лептонное число,  $s$  - спин частицы. Так, из сохранения R-четности следует запрет на нарушение сохранения лептонного и барионного чисел. Также из сохранения R-четности следует, что суперсимметричные частицы могут быть получены (парно) только из несуперсимметричных частиц; а также что суперсимметричная частица будет распадаться на другие суперсимметричные частицы до тех пор, пока не будет получена легчайшая суперсимметричная частица (LSP), являющаяся, очевидно, стабильной. Такая частица должна взаимодействовать с материей путем обмена тяжелой виртуальной суперсимметричной частицей, что создает трудности в детектировании LSP.

Экспериментальным обнаружением суперсимметрии с сохранением R-четности может являться недостающая энергия от недетектируемой LSP. Также LSP является кандидатом на роль скрытой массы.

### 1.3 Объединение с гравитацией

Суперсимметрия может естественным образом объединить гравитацию и остальные взаимодействия. Объединения гравитона со спином 2 и калибровочных бозонов со спином 1 можно достичь преобразованиями суперсимметрии, действуя на состояния генераторами суперсимметрии, при этом в

этих преобразованиях будут участвовать и фермионы:

$$2 \rightarrow 3/2 \rightarrow 1 \rightarrow 1/2 \rightarrow 0$$

Выбирая суперсимметрию в локальном виде, можно прийти к теории супергравитации [15].

## 1.4 Супергравитация

Модели супергравитации - модели с локальной суперсимметрией, то есть где действие инвариантно относительно локальных суперсимметричных преобразований. Супергравитация обладает рядом преимуществ [7]:

- суперсимметричное объединение бозонов и фермионов
- автоматическое включение в теорию общей теории относительности
- ограничение числа независимых констант взаимодействия
- решение проблемы иерархии, объединение калибровочных констант связи
- некоторые теории супергравитации могут восприниматься как следствие более общей модели (теории струн) при низких энергиях

В моделях супергравитации переносчик гравитационного взаимодействия - гравитон - приобретает суперпартнера - гравитино. Если гравитино является LSP, то то его можно рассматривать как потенциального кандидата на роль скрытой массы.

## 2 Проблемы СМ

Стандартная Модель является доминирующей теорией в области физики элементарных частиц, однако она содержит ряд проблем, которые могут быть решены с помощью теории суперсимметрии.

### 2.1 Объединение калибровочных констант связи

Согласно гипотезе Великого объединения взаимодействий, все известные взаимодействия являются различными ветвями одного взаимодействия, причем расщепление происходит при высокой энергии. Другими словами, с ростом энергии калибровочные константы связи должны стать равными. В Стандартной модели сильная и слабая константы взаимодействия убывают с энергией, в то время как электромагнитная возрастает, поэтому их

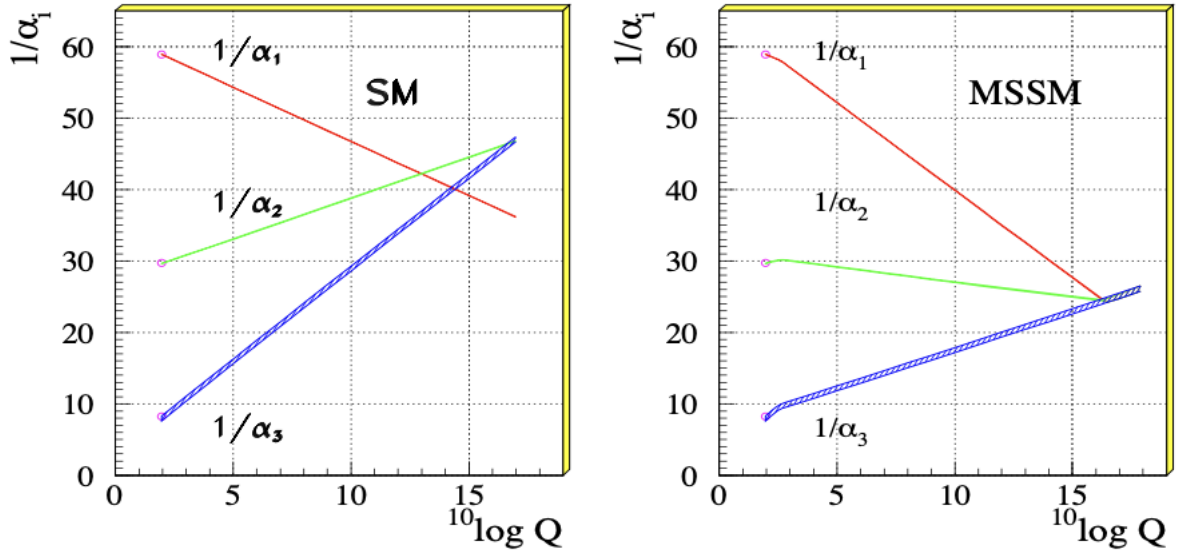


Рисунок 2 – Эволюция обратных констант связи в случае СМ (слева) и в случае суперсимметричного её расширения (МССМ) (справа) [15]

равенство при некоторой энергии возможно[15]. Изменение констант связи описывается уравнениями ренормгруппы, графики показаны на рисунке 2.

Видно, что в Стандартной Модели невозможно объединение трех констант, в то время как в случае суперсимметрии, вследствие изменения наклона РГ-кривых удастся достичь объединения констант связи, причем пересечение происходит при энергиях порядка  $M_{GUT} \sim 10^{16}$  ГэВ.

Это наблюдение являлось указанием на справедливость суперсимметричной теории.

## 2.2 Проблема иерархий

Появление двух шкал в Теории Великого Объединения (электрослабой  $M_w \sim 10^2$  ГэВ и ТВО  $M_{Pl} \sim 10^{19}$  ГэВ) приводит к проблеме иерархии. На рисунке 3 показаны поправки к массе бозона Хиггса в СМ и SUSY. В

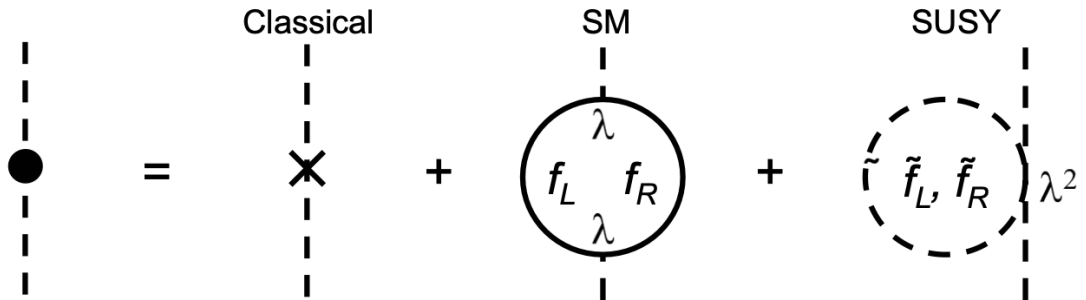


Рисунок 3 – Поправки к массе бозона Хиггса

Стандартной Модели к массе бозона Хиггса  $(m_h^2)_0$  должны быть добавлены поправки. Добавив фермионные радиационные поправки в случае СМ, наблюдаемая масса бозона Хиггса будет записана следующим образом:

$$m_h^2 = (m_h^2)_0 - \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - связь бозона Хиггса с фермионами,  $\Lambda$  - ультрафиолетовое обрезание. Для сохранения иерархии радиационные поправки должны сокращаться. Если  $\Lambda$  порядка планковских масштабов, то такое сокращение с точностью  $\sim 10^{-14}$  требует тонкой подстройки констант связи.

В случае суперсимметрии к каждой радиационной поправке от фермионов Стандартной Модели добавляются соответствующие радиационные поправки суперпартнеров. Тогда:

$$m_h^2 = (m_h^2)_0 - \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 \approx (m_h^2)_0 + \frac{1}{16\pi^2} (m_{\tilde{f}}^2 - m_f^2) \ln\left(\frac{\Lambda}{m_{\tilde{f}}^2}\right) + \dots \quad (2)$$

Видно, что квадратичные по  $\Lambda$  слагаемые сокращаются, оставляя только логарифмический вклад, то есть в этом случае радиационные поправки приемлемы для больших значений  $\Lambda$  [3].

Отдельно стоит отметить, что сокращение квадратичных членов справедливо с точностью до шкалы нарушения суперсимметрии ( $M_{SUSY} \sim 1$  ТэВ для обеспечения "естественности" тонкой подстройки), то есть подстановка в логарифмический член  $\Lambda \sim M_{Pl}$  и  $m_{\tilde{f}}^2 \sim M_{SUSY}^2$  обеспечит привычное значение вакуума Хиггса [8], из которого следуют массы калибровочных  $W^\pm$ ,  $Z$  бозонов:  $m_W \sim 80$  ГэВ,  $m_Z \sim 91$  ГэВ. Таким образом, удастся связать шкалы  $M_{Pl}$  и  $M_w$  через масштаб нарушения суперсимметрии.

### 2.3 Радиационное нарушение электрослабой симметрии

В Стандартной Модели нарушение электрослабой симметрии достигается за счет механизма Хиггса, при этом потенциал Хиггсовского поля выбирается так, чтобы минимум соответствовал ненулевому значению поля (рисунок 4).

В суперсимметричном случае массовые параметры Хиггсовского потенциала меняются с энергией, что вызывает спонтанное нарушение калибровочной  $SU(2)$  симметрии, то есть нарушение электрослабой симметрии следует естественным образом из радиационных поправок [15].



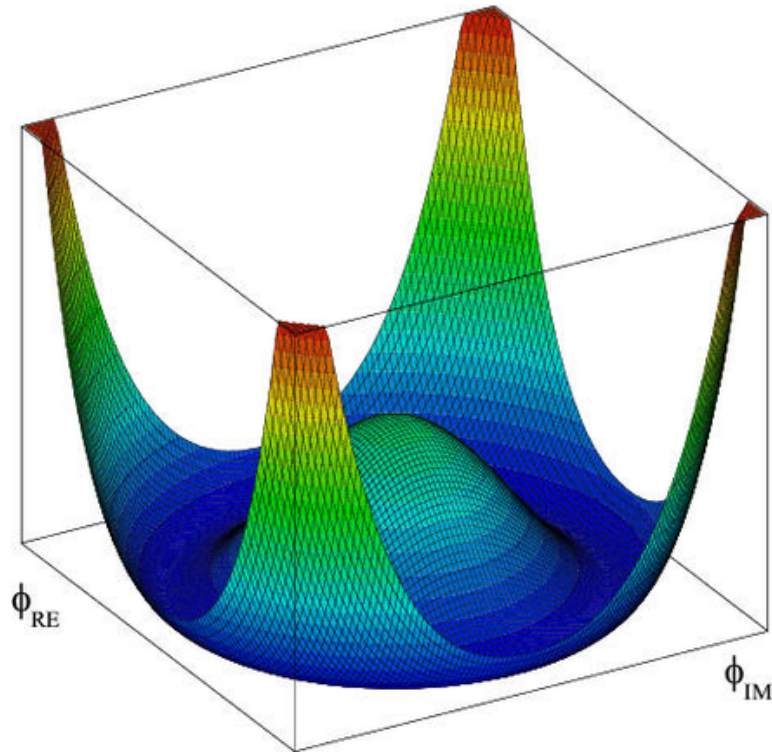


Рисунок 4 – Пример потенциала Хиггса

## 3 SUSY в космологии

### 3.1 Скрытая масса

В Стандартной модели отсутствуют частицы скрытой массы, которые необходимы для описания эволюции Вселенной в рамках космологии (например, модель  $\Lambda$ CDM). Суперсимметричные теории могут предложить кандидатов на роль скрытой массы. При условии сохранения R-четности легчайшая суперсимметричная частица (LSP) должна быть стабильна. В том случае, если LSP электронейтральна и не участвует в сильных взаимодействиях, она может быть кандидатом на роль скрытой массы (WIMP - weakly interacting massive particle). Нейтральные частицы суперсимметричной теории показаны на рисунке 5. Суперсимметричными кандидатами на роль скрытой массы являются гравитино, снеитрино и нейтралино (суперпозиция бино, вино и двух хиггсино - показаны красным на рисунке 5).

Нейтралино является популярным кандидатом на роль частиц скрытой массы, так как они предсказываются в суперсимметричном обобщении СМ; массы нейтралино в некоторых моделях лежат в области, обеспечивающей соответствие с известными величинами:  $\rho_{CDM} = 0.2\rho_c$ ; нейтралино участвуют в слабых взаимодействиях, поэтому их можно обнаружить на эксперименте.

Снейтрино - суперпартнер нейтрино. Если в моделях с сохраняющейся

Spin	U(1) $M_1$	SU(2) $M_2$	Down-type $\mu$	Up-type $\mu$	$m_{\tilde{\nu}}$	$m_{3/2}$
2						G graviton
3/2						$\tilde{G}$ gravitino
1	$B$	$W^0$				
1/2	$\tilde{B}$ Bino	$\tilde{W}^0$ Wino	$\tilde{H}_d$ Higgsino	$\tilde{H}_u$ Higgsino	$\nu$	
0			$H_d$	$H_u$	$\tilde{\nu}$ sneutrino	

Рисунок 5 – Нейтральные частицы SUSY [3]

R-четностью легчайшее sneutrino является LSP, то оно будет давать вклад в скрытую массу, при этом оценка плотности sneutrino будет такой же, как в случае нейтралино [5].

## 3.2 Инфляция

Теория горячей Вселенной имеет ряд проблем, как, например, проблему энтропии, горизонта или проблему начальных неоднородностей [5]. Инфляционная теория, сформулированная А.А. Старобинским [11], а также А.Д. Линде и А.Гутом [6], подходит для устранения этих недостатков. Она заключается в стадии экспоненциально быстрого расширения, предшествующей горячей стадии развития Вселенной. В модели инфляции предполагается наличие нового скалярного поля - инфлатона, ответственного за расширение Вселенной. Инфляционная стадия заканчивается при определенных условиях, энергия инфлатона переходит в энергию обычного вещества (стадия разогрева Вселенной), после чего Вселенная входит в горячую стадию.

В MSSM кандидатами на роль инфлатона являются sneutrino или комбинация бозонов Хиггса [1].

## 3.3 Бариосинтез

В современной Вселенной есть барионы, но практически отсутствуют антибарионы на макроскопических масштабах. Это явление называется барионной асимметрией. Предполагается, что избыток барионов по отношению к антибарионам был образован в процессе бариосинтеза из изначально симметричной Вселенной из-за CP нарушения при неравновесных процес-

сах с несохранением барионного числа [10]. Рассмотрим распады частиц  $X$  и античастиц  $\bar{X}$  равной концентрации  $n_X$  [16].

Пусть есть такие каналы распада:  $X \rightarrow qq$ ,  $X \rightarrow \bar{q}l$ ,  $\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q}$ ,  $\bar{X} \rightarrow q\bar{l}$

Из-за СР нарушения относительные вероятности конкретных мод распадов не будут совпадать. Обозначив относительную вероятность распада по каналу  $X \rightarrow qq$  за  $r$ , а относительную вероятность распада по каналу  $\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q}$  за  $\bar{r}$ , получим, что в результате неравновесных распадов образуется избыток барионов

$$n_b = (r - \bar{r}) \cdot n_X \quad (3)$$

Эта величина определяется величиной нарушения СР и различием относительных вероятностей распада.

В случае SUSY расширений суперсимметричные партнеры кварков (скварки) могут формировать бозе-конденсат с изначально положительным знаком барионного числа, что ведет к появлению барионной асимметрии после распада скварков на кварки и глюино [16].

## 4 Поиск SUSY на эксперименте

Поиск суперсимметричных частиц ведется с помощью ускорительных экспериментов. С помощью экспериментов (протон-протонные столкновения при  $\sqrt{s}$  от 7 ТэВ до 13 ТэВ) на Большом адронном коллайдере (БАК) уже получены существенные ограничения для суперсимметричных партнеров.

В адронных коллайдерах суперпартнеры могут рождаться в результате слабых или сильных взаимодействий (рисунки 6, 7, 8).

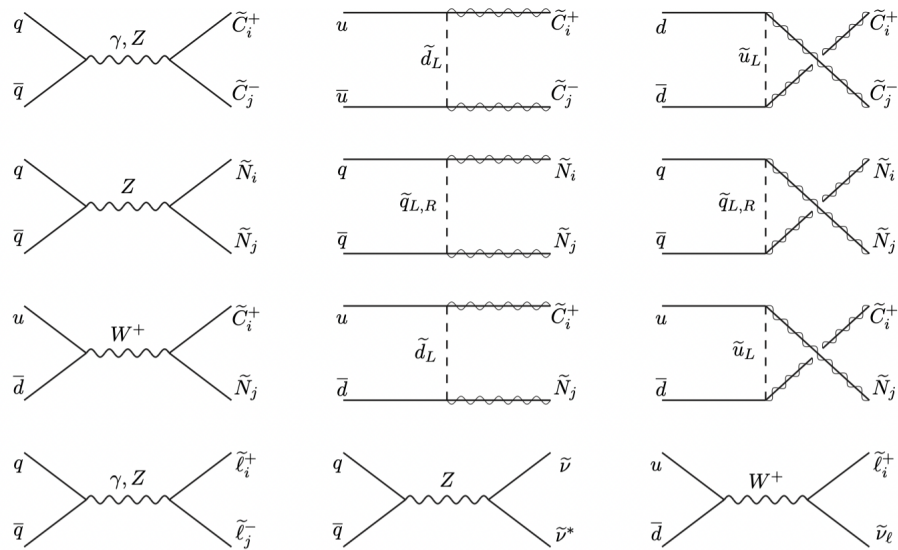


Рисунок 6 – Электрослабое рождение частиц в результате аннигиляции кварка и антикварка

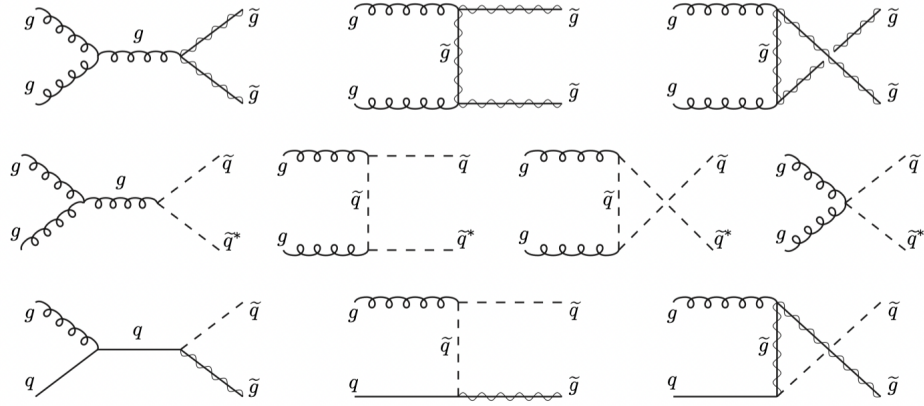


Рисунок 7 – Рождение глюино и скварков в результате глюон-глюон и глюон-кварк слияния

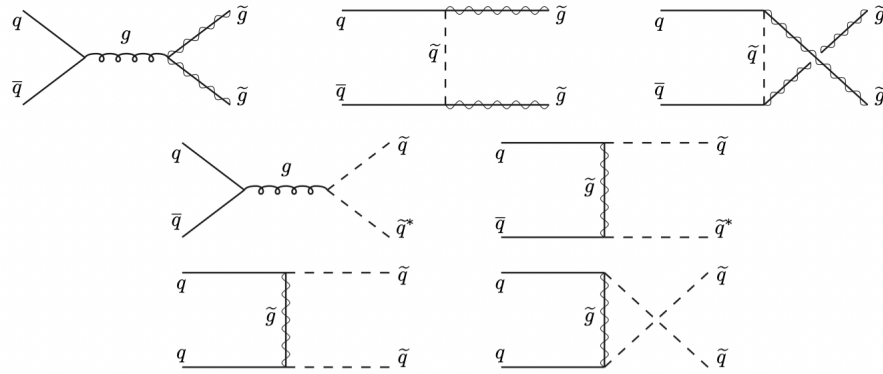


Рисунок 8 – Рождение глюино и скварков в результате аннигиляции кварка и антикварка

Образованные суперпартнеры распадаются, и в итоге образуются 2 LSP, которые покидают детектор. Таким образом, сигналами в адронных коллайдерах являются некоторое количество лептонов, некоторое количество струй и недостающая энергия от LSP.

На данный момент суперсимметричные частицы так и не были обнаружены, однако были получены строгие ограничения на их массы (рисунок 9). При увеличении энергии экспериментов есть шанс подтвердить суперсимметрию.

## 5 Заключение

Суперсимметрия является самым популярным расширением Стандартной Модели физики элементарных частиц, главным образом за счет удобного решения проблем Стандартной Модели. Так, с помощью суперсимметрии можно естественным образом ввести в теорию гравитацию, а также объединить константы связи и решить проблему иерархий. Также с помо-

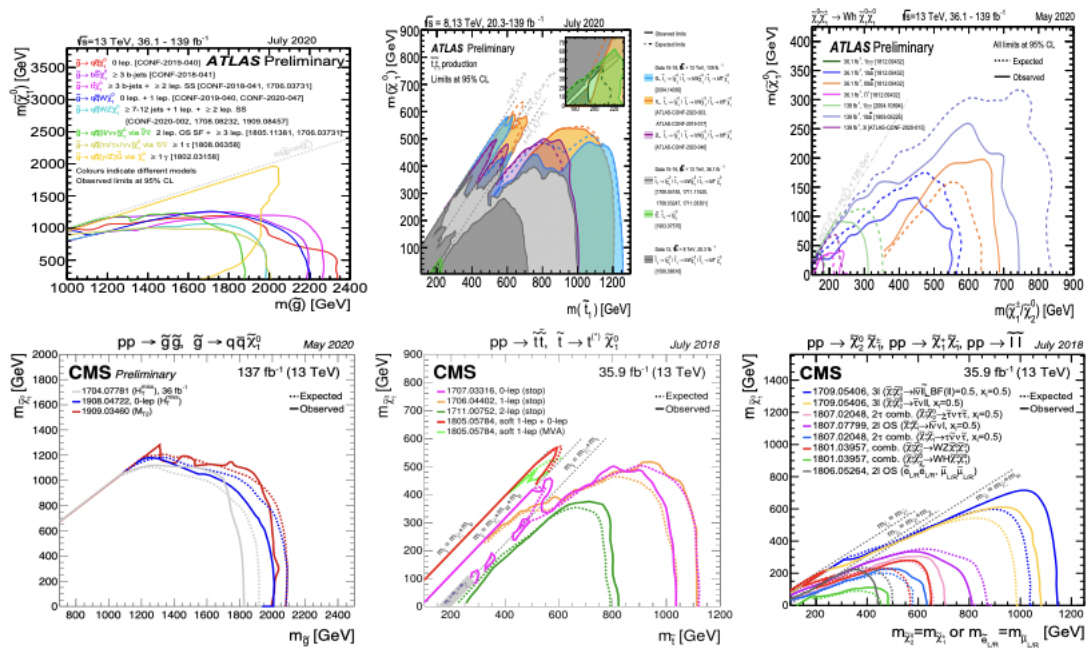


Рисунок 9 – Экспериментальные ограничения на массы суперсимметричных частиц, полученные на экспериментах ATLAS и CMS

цию суперсимметрии можно объяснить явления инфляции, скрытой массы и бариосинтеза. Однако из-за вынужденного нарушения суперсимметрии она обладает большим количеством свободных параметров, что является ее главным недостатком с точки зрения теории. С другой стороны, несмотря на привлекательность суперсимметрии как решения проблем СМ, ее до сих пор не удалось обнаружить на эксперименте, хотя есть надежда зарегистрировать суперсимметричные частицы при дальнейшем увеличении энергии на экспериментах.

## Список использованных источников

1. *Chatterjee A., Mazumdar A.* Tuned MSSM Higgses as an inflaton // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2011. — Sept. — Vol. 2011, no. 09. — P. 009.
2. *Cheng T. P., Li L. F.* Gauge theory of elementary particle physics. — Oxford, UK : Oxford University Press, 1984.
3. *Feng J. L.* Supersymmetry and cosmology // Annals of Physics. — 2005. — Jan. — Vol. 315, no. 1. — P. 2–51.
4. *Golfand Y. A., Likhtman E. P.* Extension of the Algebra of Poincare Group Generators and Violation of p Invariance // JETP Lett. — 1971. — Vol. 13. — P. 323–326.
5. *Gorbunov D. S., Rubakov V. A.* Introduction to the theory of the early universe: Cosmological perturbations and inflationary theory. — 2011.
6. *Guth A. H.* The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems // Phys. Rev. D. — 1981. — Vol. 23. — P. 347–356.
7. *Ketov S. V., Khlopov M. Y.* Cosmological Probes of Supersymmetric Field Theory Models at Superhigh Energy Scales // Symmetry. — 2019. — Vol. 11, no. 4. — P. 511.
8. *MARTIN S. P.* A SUPERSYMMETRY PRIMER // Perspectives on Supersymmetry. — WORLD SCIENTIFIC, 07/1998. — P. 1–98.
9. *Muller-Kirsten H. J. W., Wiedemann A.* SUPERSYMMETRY: AN INTRODUCTION WITH CONCEPTUAL AND CALCULATIONAL DETAILS. — 07/1986.
10. *Sakharov A. D.* Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe // Soviet Physics Uspekhi. — 1991. — May. — Vol. 34, no. 5. — P. 392.
11. *Starobinsky A. A.* Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe // JETP Lett. — 1979. — Vol. 30. — P. 682–685.
12. *Wess J., Bagger J.* Supersymmetry and supergravity. — Princeton, NJ, USA : Princeton University Press, 1992.

13. *Wess J., Zumino B.* A lagrangian model invariant under supergauge transformations // *Physics Letters B.* — 1974. — Vol. 49, no. 1. — P. 52–54.
14. *West P. C.* Introduction to supersymmetry and supergravity. — 1990.
15. *Казаков Д. И.* СУПЕРСИММЕТРИЧНОЕ РАСШИРЕНИЕ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. — 2014.
16. *Хлопов, М. Ю.* Основы космомикрoфизики. — 2004.