МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ   
**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

Кафедра № 40 «Физика элементарных частиц»

**Реферат на тему: «Суперсимметрия»**

Выполнил:

Студент: Пятиизбянцева Д.Н.  
Группа: М16-115

Москва 2016г.

Содержание

Введение .................................................................................................................. 3

Объединение с гравитацией ….............................................................................. 3

Объединение калибровочных констант связи ..................................................... 4

Проблема иерархий ................................................................................................ 5

Радиационное нарушение электрослабой симметрии ........................................ 6

Инфляция ................................................................................................................. 7

Бариосинтез ............................................................................................................. 9

Природа темной материи Вселенной ...................................................................10

Теория суперструн ................................................................................................ 12

Экспериментальные поиски .................................................................................12

Заключение ............................................................................................................ 15

Список используемой литературы ...................................................................... 15

*Введение*

Суперсимметрия (SUSY) берет свое начало с 1971-1972 гг., когда она была предложена советскими физиками Юрием Гольфандом и Евгением Лихтманом [1] из ФИАН, а также Дмитрием Волковым и Владимиром Акуловым [2] из ХФТИ.

В 1973 г. появились некоторые разновидности суперсимметричной теории, созданные австрийским физиком Джулиусом Вессом и итальянским физиком Бруно Зумино [3]. Одна из их новых теорий заключалась в расширении электромагнетизма, в котором фотон объединялся с частицей, весьма похожей на нейтрино [4].

Другое развитие суперсимметрии связано с теорией струн, которую предложили Пьер Рамон, Джон Шварц и Андре Невё [5].

Предпосылками к расширению Стандартной модели (СМ) являлись следующие факторы:

* стремление к созданию теории Великого объединения (ВО);
* проблема иерархий;
* скрытая масса, темная материя и темная энергия;
* нарушение электрослабой симметрии;
* отсутствие ограничения сверху на массу бозона Хиггса;
* попытка объединения с гравитацией;
* масса нейтрино, нейтринные осцилляции и др.

SUSY является ключом к решению некоторых из данных проблем [6, 7].

Суперсимметрия - это симметрия между бозонами (частицами с целым

спином) и фермионами (частицами с полуцелым спином).

Данная теория возникла в результате стремления обобщить алгебру Пуанкаре на представления с различным спином с помощью добавления антикоммутаторов к обычным коммутаторам алгебры Лоренца [8].

Пусть – генератор алгебры суперсимметрии. Подействуем им на бозонное состояние, тогда он переведет его в фермионное состояние, и наоборот:

*.*

Так как бозоны коммутируют друг с другом, а фермионы антикоммутируют, то суперсимметричные генераторы должны также антикоммутировать, т.е. они должны быть фермионными и изменять спин на полуцелую величину.

Ключевым соотношением для обобщения алгебры Пуанкаре является антикоммутатор

, (1)

где и – генераторы суперсимметрии, индекс α указывает на спинорную компоненту, а - генератор трансляций, т.е. четырёхимпульс.

*Объединение с гравитацией*

Гравитационное взаимодействие находится за рамками Стандартной модели. Суперсимметрия может служить ключом к объединению всех сил природы.

При квантовом описании релятивистской теории гравитации в плоском пространстве-времени переносчиком является гравитон, имеющий спин 2 [9, 10].Однако спин остальных калибровочных бозонов, таких как фотон, глюон, W- и Z-бозоны, равен 1. Благодаря преобразованиям суперсимметрии можно «перемешать» данных представителей различных групп Пуанкаре. Полученная цепочка состояний, возникающая при действии генераторами на гравитон, выглядит следующим образом: 2→ 3/2→1→1/2→ 0.

Кроме того, комбинация двух локальных преобразований суперсимметрии приводит к локальной трансляции координат. В итоге мы получаем теорию, инвариантную относительно локальных координатных преобразований, то есть теорию гравитации в плоском пространстве-времени.

Кроме того, в рамках Модели Супергравитации (SUGRA) возможно связать нарушение суперсимметрии с гравитационным взаимодействием.

Таким образом, из попытки объединить бозоны и фермионы естественным образом вытекает объединение гравитации с другими взаимодействиями.

*Объединение калибровочных констант связи*

Согласно гипотезе Великого объединения [11], различные фундаментальные взаимодействия есть часть более общего взаимодействия, проявляющегося при больших энергиях. При понижении энергии от объединенного взаимодействия «отщепляется» сначала сильное взаимодействие, а затем электрослабое взаимодействие распадается на слабое и электромагнитное.

Зависимость констант связи от энергии описывается уравнениями ренормгруппы [12]. Так как в СМ сильные и слабые константы взаимодействия убывают с увеличением энергии по-разному, а электромагнитная - возрастает, возможен тот факт, что при некоторой энергии они становятся равными.

Сравниваемые константы связи определяются следующим образом [13]:

,

, (2)

,

где - постоянная тонкой структуры, – электрослабая константа , - калибровочная константа , - константа связи для группы S.

В гипотезе Великого объединения на некотором масштабе константы должны принять одинаковые значения.

В однопетлевом приближении уравнение ренормгруппы

, (3)

где , – «бегущий» масштаб энергий, – коэффициенты Гелл-Манна-Лоу.

Решение уравнения (3) представляется в виде

, (4)

где – некоторый начальный энергетический масштаб, обычно принимаемый за массу Z-бозона .

С учетом того, что , , и в СМ коэффициенты = (, , −7), получаем зависимость, представленную на левой части рис. 1. Одновременного пересечения всех констант связи в одной точке не происходит.

В суперсимметричном случае коэффициенты = (, , −3). Объединение констант связи показано на правой части рис. 1.

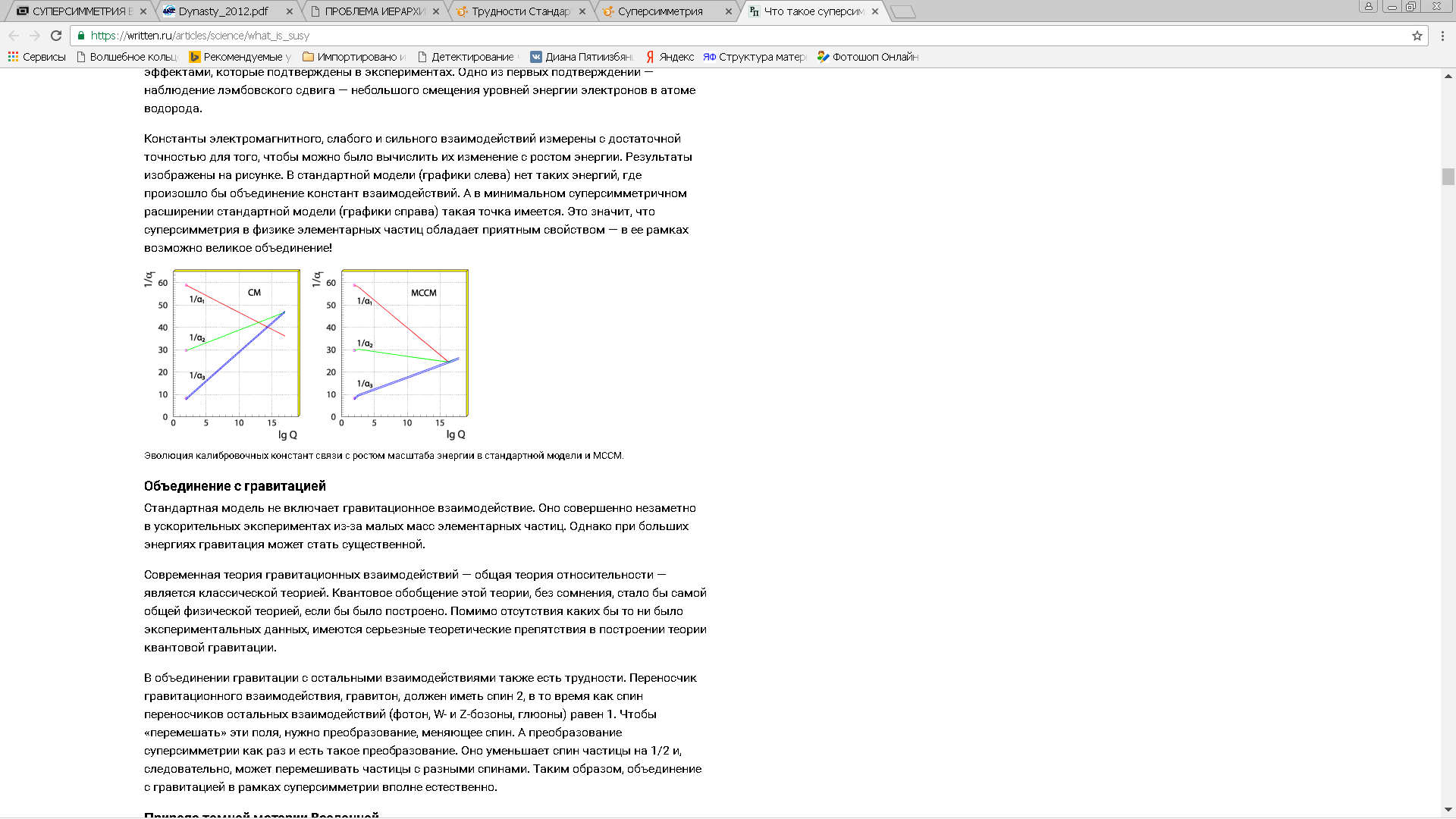


Рис. 1. Эволюция калибровочных констант связи с ростом масштаба энергии в Стандартной модели и её суперсимметричном расширении.

Отсюда находится шкала нарушения суперсимметрии и точка объединения :

GeV,

GeV, (5)

= 26.3 ± 1.9 ± 1.0.

Первая ошибка следует из неопределённости в измерении констант связи, а вторая – из неопределенности в расщеплении масс суперсимметричных частиц.  
Масштаб нарушения суперсимметрии порядка 1 ТэВ.

*Проблема иерархий*

Как известно, масштаб масс, соответствующий слабому взаимодействию, меньше масштаба Великого объединения или планковского масштаба на много порядков. Данный разброс масштабов и является проблемой иерархий.

Даже при постулировании такой иерархии возникает новая проблема: иерархия будет разрушена радиационными поправками.

Рассмотрим поправки к массе легкого хиггсовского бозона [14]. Соответствующие фейнмановские диаграммы представлены на рис. 2. Поправки, пропорциональные квадрату массы тяжелой частицы, разрушают иерархию, если только они не сокращаются. Такое сокращение с точностью требует тонкой подстройки констант связи.

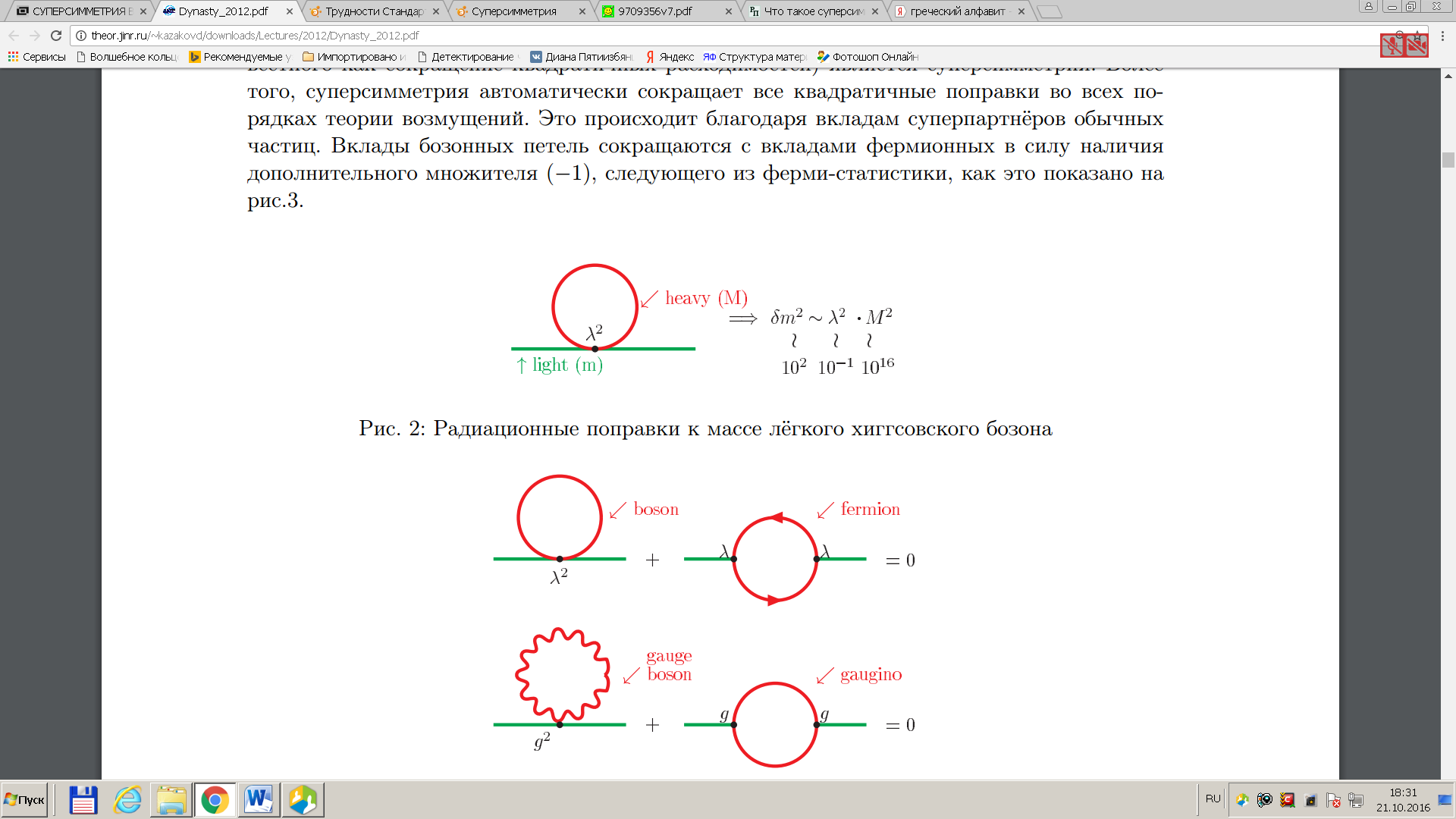


Рис. 2. Радиационные поправки к массе лёгкого хиггсовского бозона.

Суперсимметрия является выходом из сложившейся ситуации, так как при добавлении суперпартнера квадратичная расходимость сокращается. Вклады бозонных петель сокращаются с вкладами фермионных петель в силу наличия дополнительного множителя (−1), следующего из ферми-статистики, как это показано на рис. 3 [15].

На верхней части рисунка изображены вклады тяжёлого хиггсовского бозона и его суперпартнёра, а на нижней - вклады тяжёлого калибровочного бозона и тяжёлого калибрино.

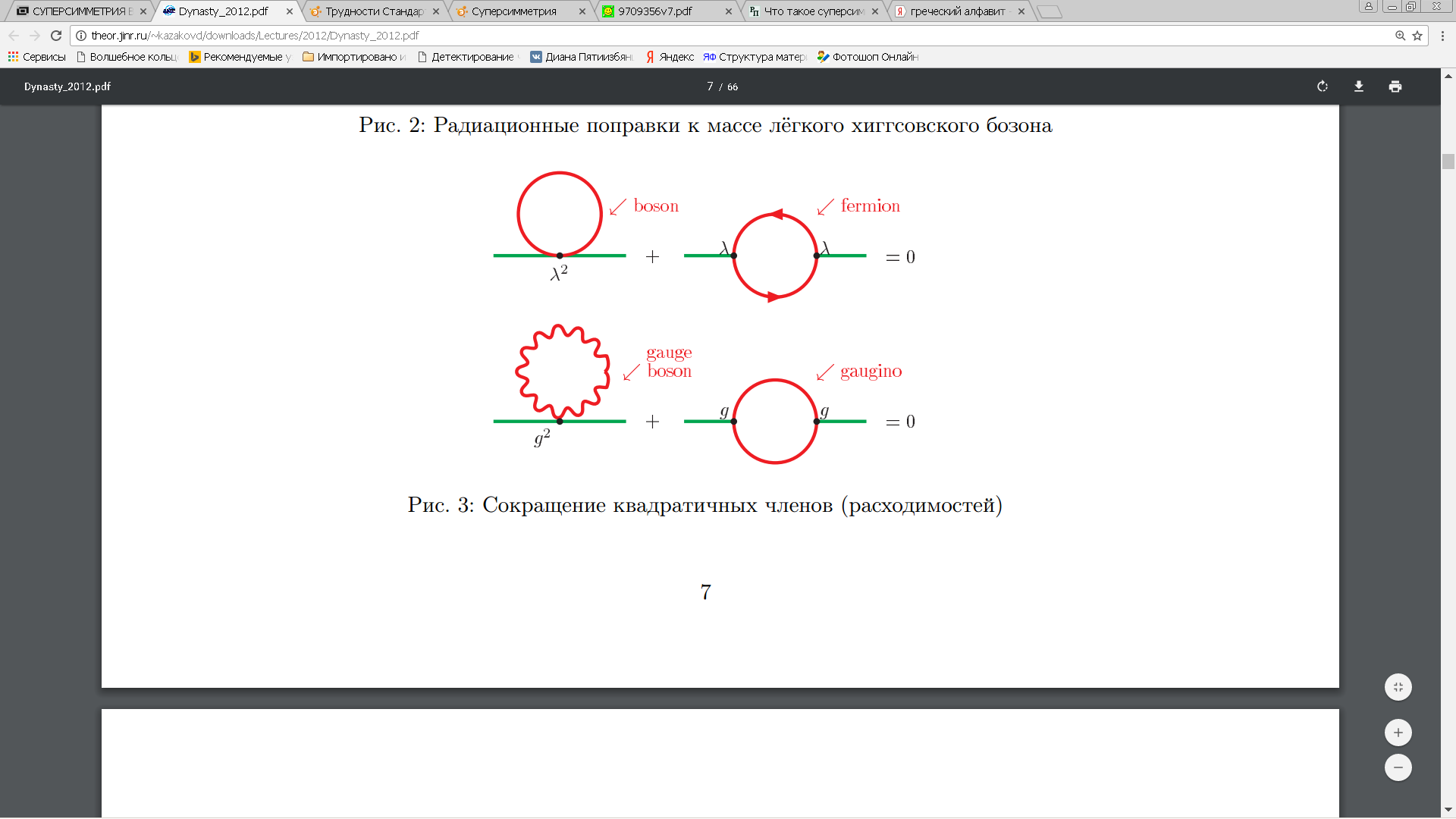


Рис. 3. Сокращение квадратичных расходимостей.

Радиационные поправки не должны превосходить массу бозона Хиггса, т.е.

*.*  (6)

Таким образом, если ГэВ и , то . Следовательно, шкала нарушения суперсимметрии совпала с оценками шкалы из условия объединения констант связи.

*Радиационное нарушение электрослабой симметрии*

Электрослабая симметрия нарушается за счет механизма Хиггса. При этом важен вид потенциала хиггсовского поля. В СМ он выбирается так, чтобы его минимум соответствовал ненулевому значению поля. В суперсимметричном случае потенциал фиксирован требованием суперсимметрии и не имеет нетривиального минимума.

Массовые параметры хиггсовского потенциала меняются при движении от шкалы Великого объединения к шкале и могут стать отрицательными. Тогда при некотором значении у потенциала появляется нетривиальный минимум, что вызывает спонтанное нарушение SU(2) калибровочной симметрии. Вакуумные средние хиггсовских полей приобретают ненулевые значения, и это обеспечивает массы кваркам, лептонам и SU(2) калибровочным бозонам, а соответствующие суперпартнёры получают добавки к массам.

Таким образом, нарушение электрослабой симметрии возникает естественным путём из радиационных поправок.

*Инфляция*

Если U(1) симметрия электромагнитного взаимодействия включена в компактную группу Великого объединения, то теория ВО предсказывает существование магнитного монополя. Для массы магнитного монополя ГэВ концентрация первичных монополей превосходит концентрацию барионов, так что плотность магнитных монополей оказывается на 16 порядков больше, чем барионная плотность [16]. Чтобы решить проблему перепроизводства монополей, была предложена инфляционная космологическая модель[17], в которой начальная концентрация монополей сильно подавлена.

В простейшем случае начальное состояние космологического расширения обладает максимальной пространственно-временной симметрией, что соответствует вакуумному уравнению состояния де Ситтера:

, (7)

где – давление, – плотность энергии, – шкала нарушения симметрии Великого объединения.

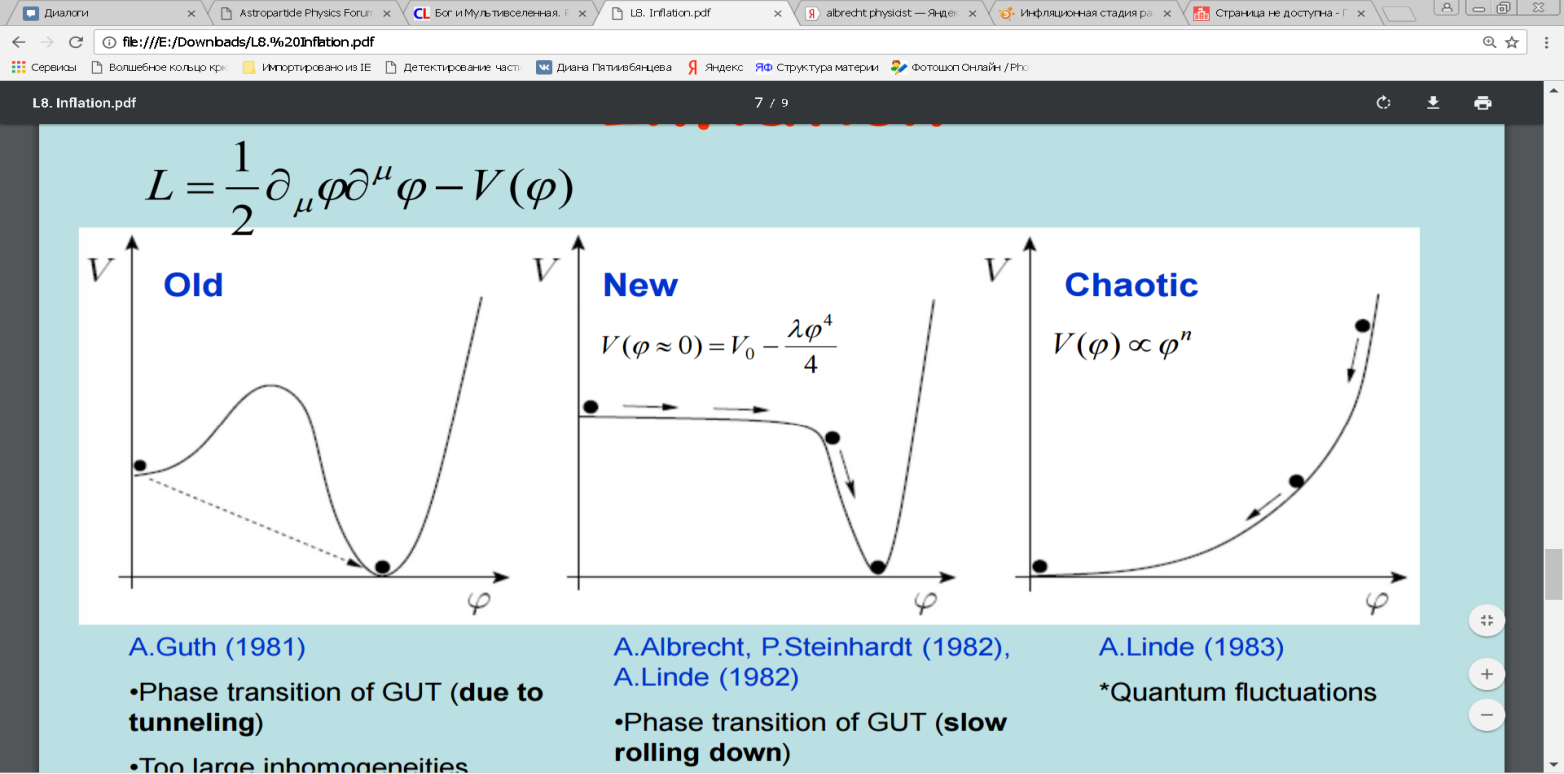
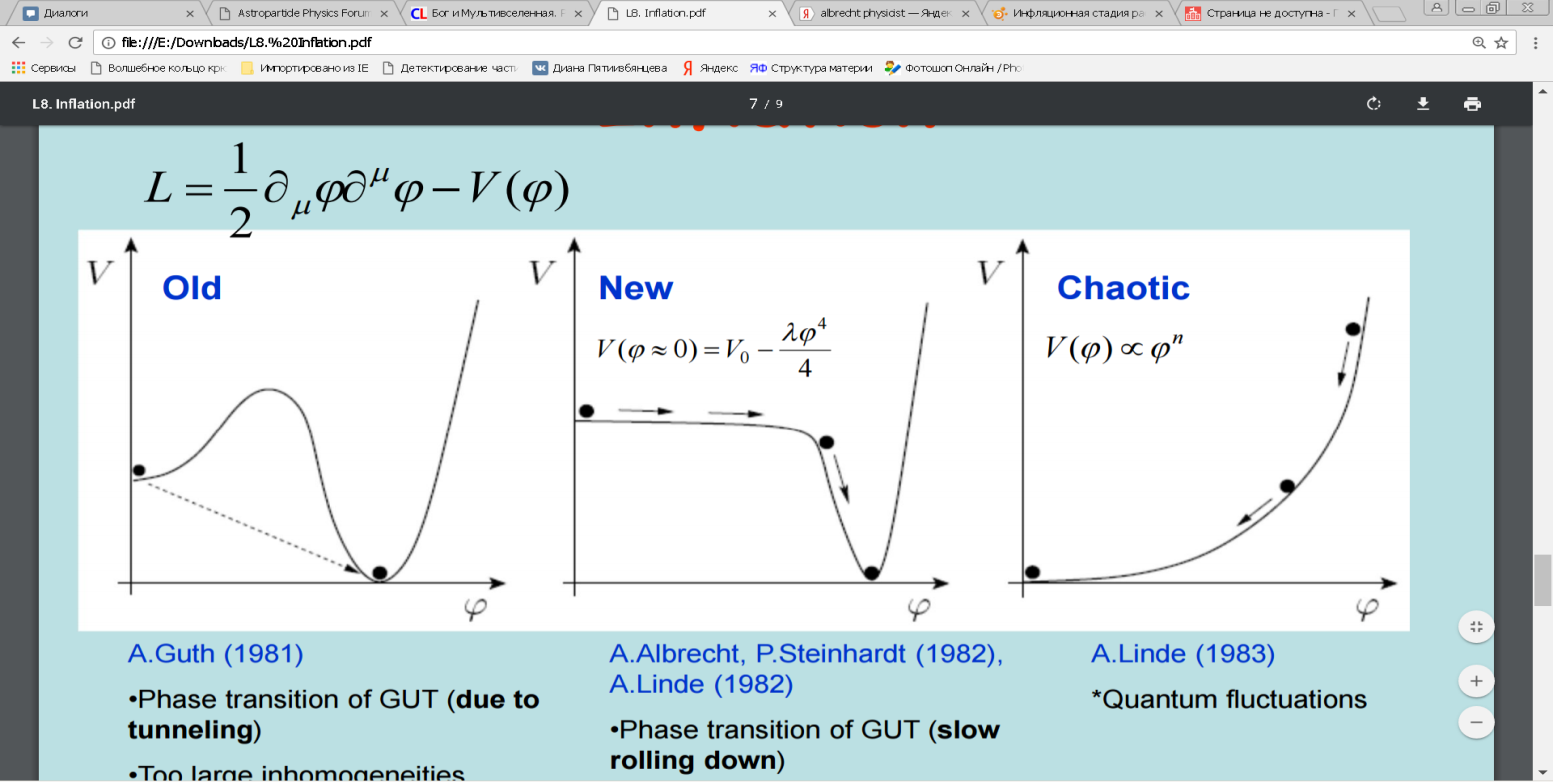
Тогда зависимость масштабного фактора от времени задается экспоненциальным законом:

, (8)

где – постоянная Хаббла.

Это приводит к экспоненциальному подавлению концентрации магнитных монополей, зависящей от масштабного фактора как .

Кроме того, существуют «старый», «новый» и хаотический инфляционные сценарии:



Old

New

Chaotic

Рис. 4. «Старая», «новая» и хаотическая модели инфляции.

«Старая» модель инфляции имеет недостаток, связанный с сильной неоднородностью Вселенной из-за большого размера пузыря истинного вакуума, при котором высвободившаяся в процессе фазового перехода энергия переходит в кинетическую энергию стенок пузыря, а внутренность пузыря оказывается пустой и не разогретой. В «новом» [18] и хаотическом [19] сценариях инфляции данный недостаток исправляется за счет медленного скатывания эффективного потенциала к истинному вакууму.

Экспоненциальный рост масштабного параметра решает и проблему горизонта, которая вытекает из факта высокой однородности реликтового излучения.

В эпоху рекомбинации наблюдаемые сейчас фотоны реликтового излучения, приходящие к нам с близких направлений, должны были взаимодействовать с областями первичной плазмы, между которыми не успела установиться причинная связь за всё время их существования от планковского время (рис. 5).

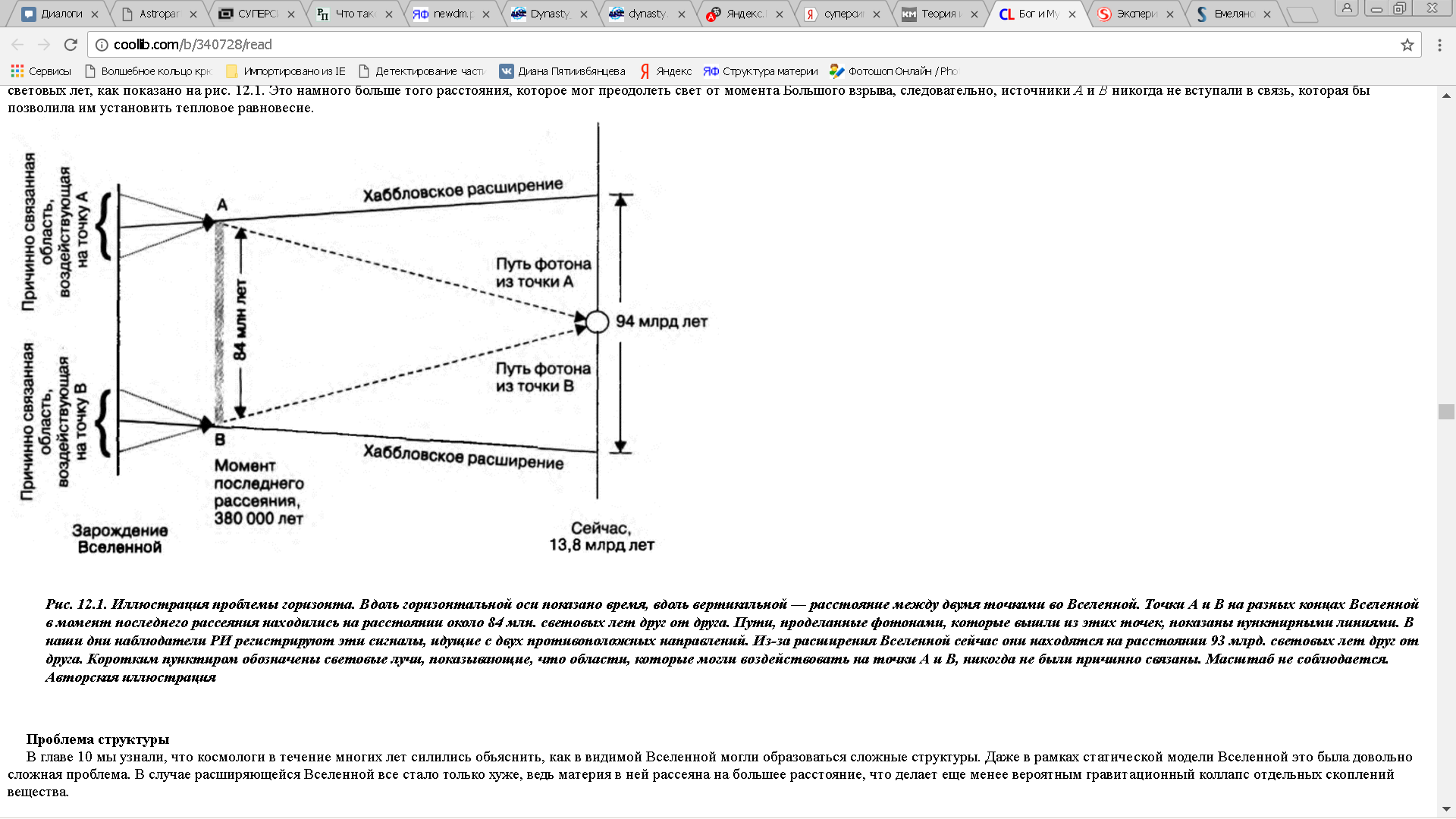


Рис. 5. Иллюстрация проблемы горизонта.

Как показано на рис. 6, инфляционная модель решает эту проблему. В период времени после рождения Вселенной, но до начала ее инфляционного расширения точки A и B находились ближе друг к другу, и таким образом между ними была установлена причинная связь.

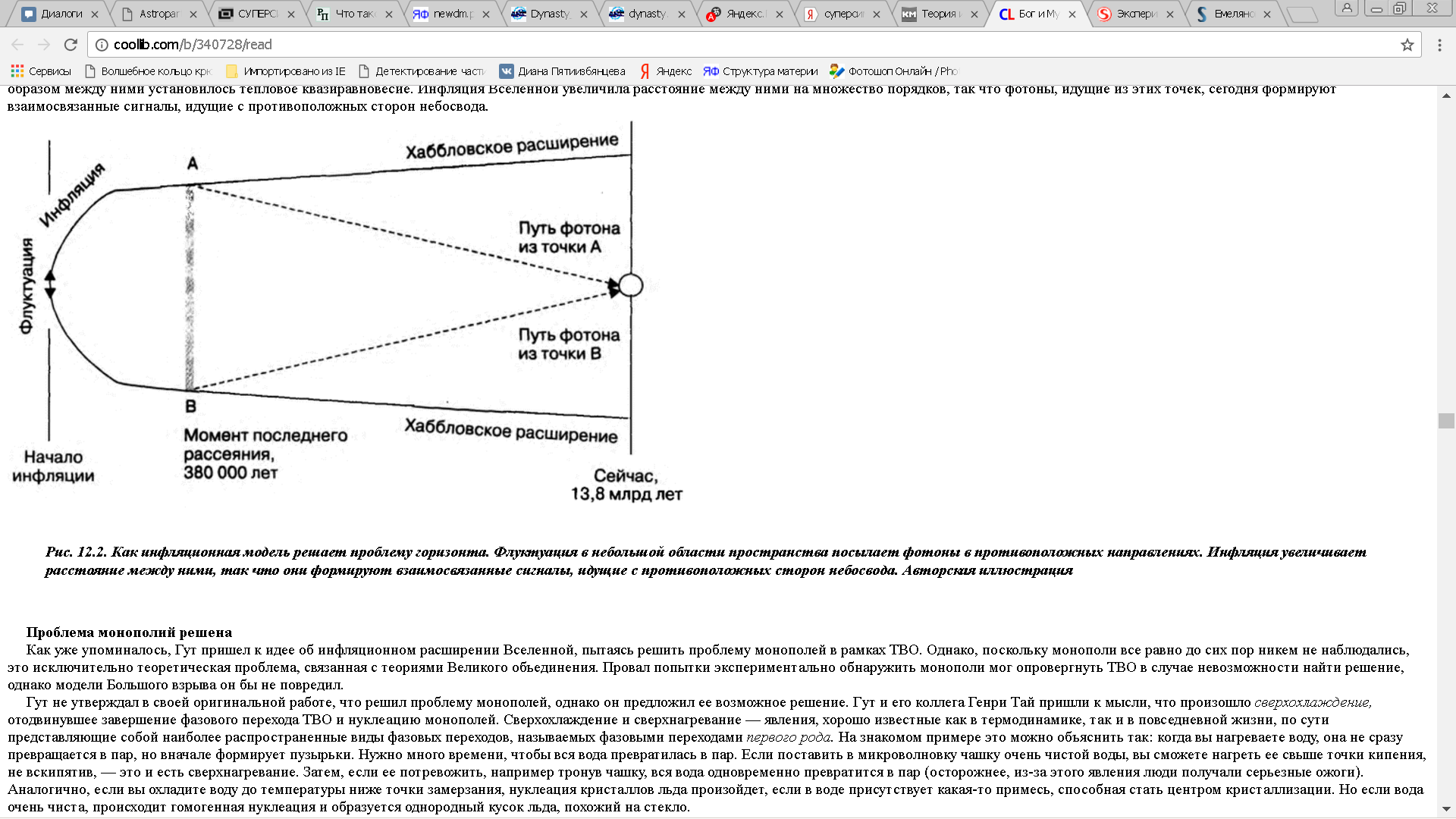


Рис. 6. Иллюстрация решения проблемы горизонта с помощью инфляции.

Также инфляция помогает обойти проблему плоскостности. Согласно наблюдениям, средняя плотность Вселенной ρ близка к критической плотности , при которой кривизна пространства Вселенной равна нулю. Однако, согласно расчётным данным, отклонение космологической плотности от критической со временем должно увеличиваться. Для объяснения наблюдаемой пространственной кривизны в рамках стандартной модели горячей Вселенной приходится постулировать отклонение плотности в планковскую эпоху от не более чем в раз.

Благодаря инфляции, радиус пространственной кривизны на инфляционной стадии увеличивается настолько, что современное значение плотности автоматически оказывается весьма близким к критическому.

Что касается крупномасштабной структуры Вселенной, то для её образования из первичных малых флуктуаций плотности необходима определённая амплитуда и форма спектра первичных возмущений. В ходе инфляционного расширения возникает плоский спектр возмущений, что приводит к последующему развитию флуктуаций в наблюдаемую структуру Вселенной при сохранении крупномасштабной однородности и изотропности и решает проблему крупномасштабной структуры.

В минимальной суперсимметричной Стандартной модели скалярными полями, вызывающими инфляцию, являются поля Хиггса и [20]. Также инфлатонами могут быть аксионы [21], комбинации u- и d-скварков R-типа, слептонов L- и R-типа [22], нейтралино, слептона L-типа и хиггсовского состояния [23].

*Бариосинтез*

Как известно, на макроскопических масштабах нашей Вселенной вплоть до масштабов скоплений галактик не наблюдается антивещество. Предполагается, что первоначально Вселенная была барион-симметричная, а избыток барионов образовался ввиду бариосинтеза из-за -нарушения [24].

Рассмотрим распады некоторых вышедших из равновесия частиц концентрации и их античастиц той же концентрации [25]. Пусть данные распады осуществляются по двум каналам:

, и , , (9)

где – кварк, а – лептон.

Ввиду -инвариантности, полные ширины распад частиц и античастиц будут равны, но из-за -нарушения относительные вероятности для конкретных мод распадов будут отличаться.

Если принять полную вероятность распада за единицу, а относительную вероятность распада обозначить как

, (12)

тогда

, (13)

, (14)

. (15)

В результате данных распадов образуется избыток барионов, равный

. (16)

Данное значение определяется величиной и знаком фазы -нарушения.

В SUSY после нарушения симметрии появляется конденсат скалярных кварков с положительным барионным числом, который распадается на кварки и глюино с образованием барионной асимметрии.

*Природа темной материи Вселенной*

Тёмная материя (ТМ) – это форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и не взаимодействует с ним, но проявляет себя в гравитационном взаимодействии, что позволяет обнаружить ее экспериментально. Частицы, которые в раннюю стадию Вселенной отщепились от плазмы с нерелятивистскими скоростями, представляют собой холодную темную материю.

Переносчиками данного вида материи являются сверхмассивные частицы с массами от десятков ГэВ до нескольких ТэВ. Основным кандидатом на данную роль являются WIMP-ы (Weakly Interactive Massive Particles) — слабовзаимодействующие массивные частицы [26].

Прямым указанием на существование тёмной материи являются кривые вращения. Для объяснения этих кривых обычно предполагают существование галактического гало, состоящего из несветящейся материи, которая участвует в гравитационном взаимодействии. Согласно закону Кеплера, в области за наблюдаемым галактическим диском массу внутри скопления можно считать постоянной, а скорость вращения должна быть обратно пропорциональна корню квадратному из расстояния от центра галактики. Однако оказывается, что с удалением от центра галактики, скорость почти не уменьшается. Расхождение объясняется тем, что галактики находятся в «облаках» темной материи. Обычная материя группируется вокруг сгустков темной материи, а частицы ТМ искажают распределение масс в галактике.

Другим проявлением существования тёмной материи является гравитационное линзирование (рис. 7), приводящее к появлению кольцевых отображений далёких звёзд, когда свет от них проходит сквозь темную материю (рис. 8) [27].

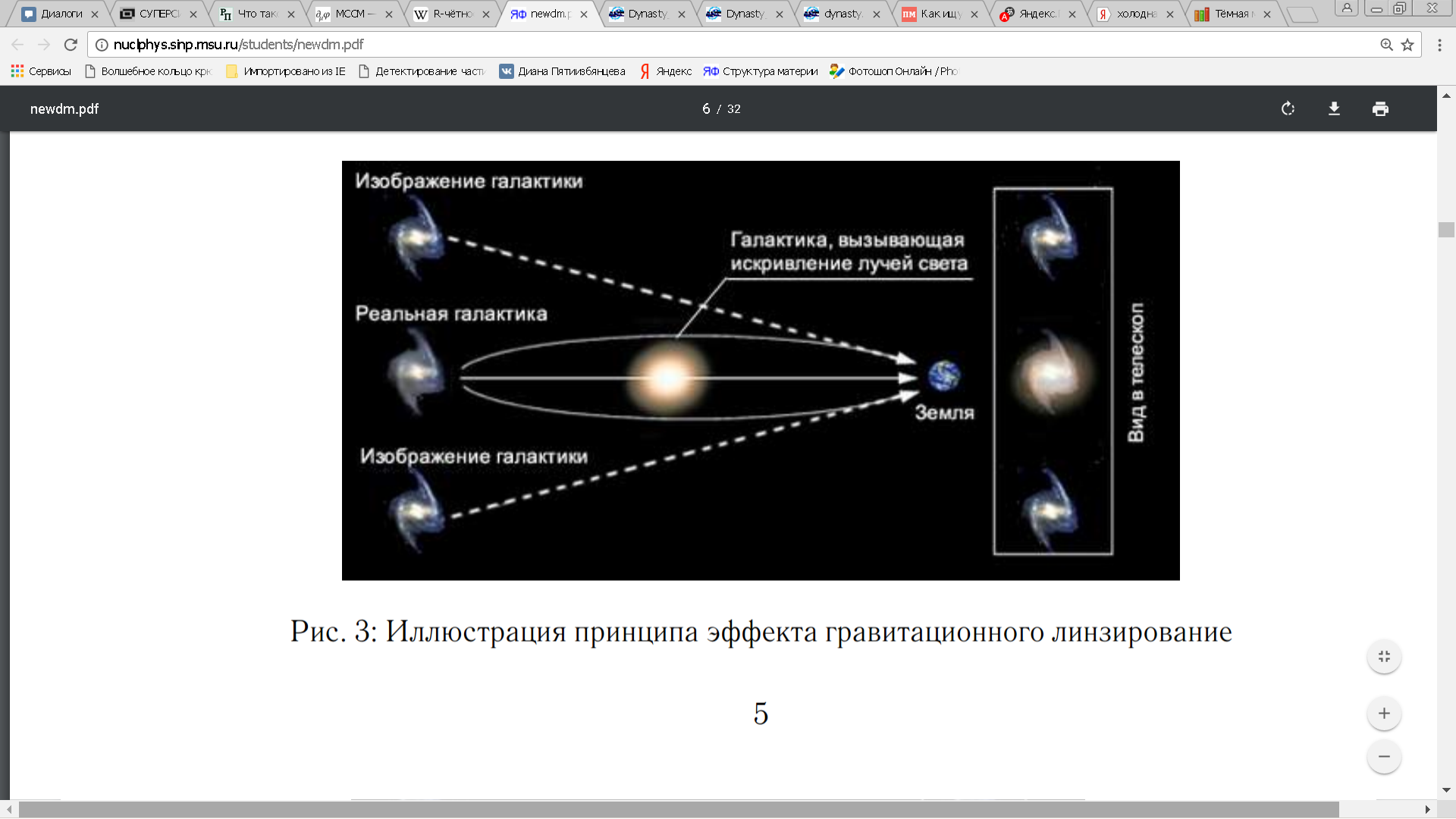


Рис. 7. Иллюстрация гравитационного линзирования.

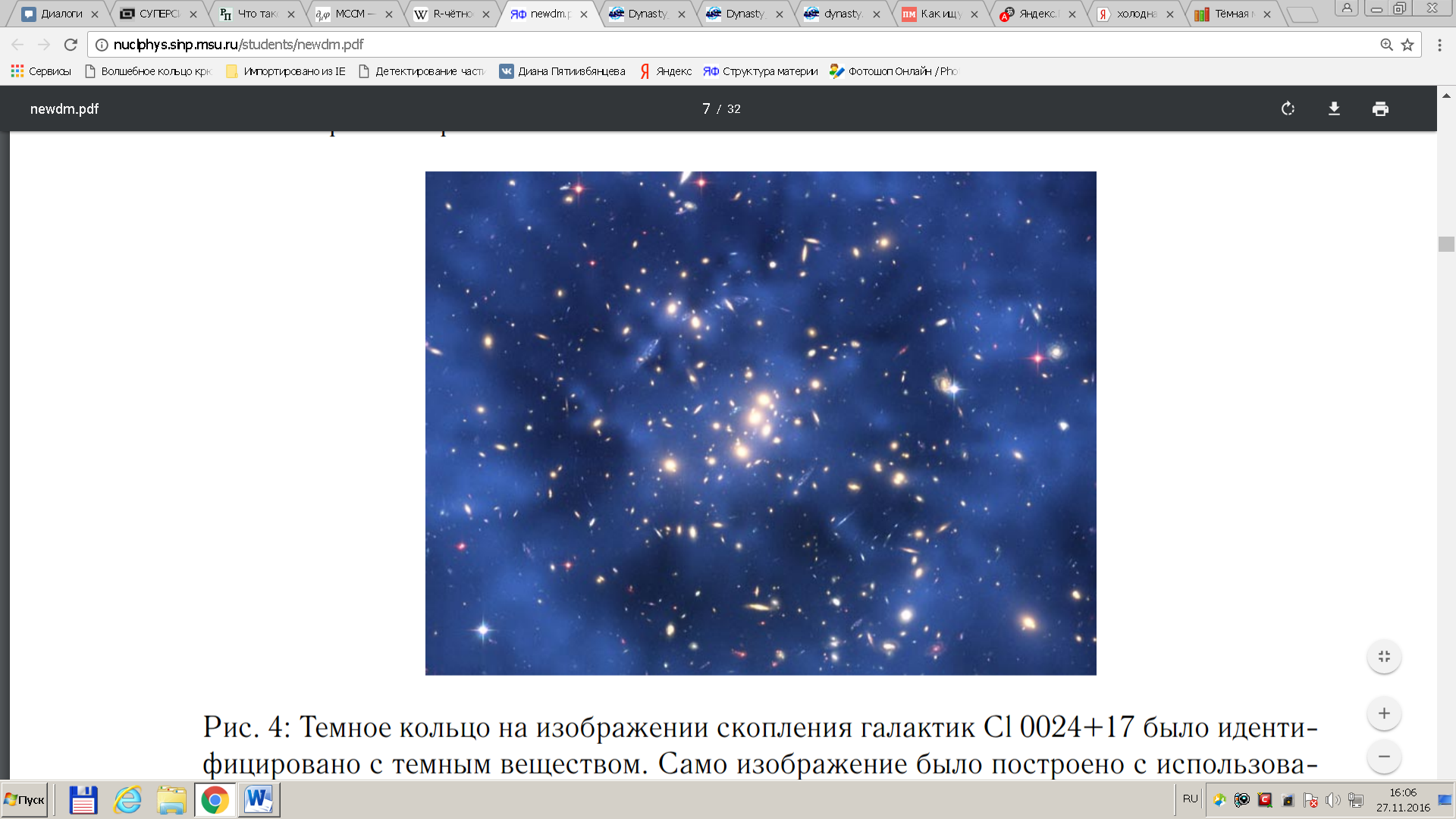


Рис. 8. Изображение “кольца” темной материи в скоплении галактик C1 0024+17, полученное с помощью космического телескопа Hubble.

Основными аргументами в пользу небарионной природы скрытой массы во Вселенной являются первичный нуклеосинтез в инфляционной космологии и образование крупномасштабной структуры Вселенной при наблюдаемой изотропии реликтового излучения [28].

В СМ нет подходящего кандидата для холодной темной материи. Обратимся к суперсимметричной модели. В ней постулируется закон сохранения R-четности:

, (10)

где и – барионное и лептонное числа, - спин частицы. R-чётность всех частиц СМ равна 1, а для суперпартнеров .

Следовательно, для стабильных SUSY-частиц, сохраняющих R-четность, возможна лишь парная аннигиляция. Легчайшая из данных частиц – нейтралино - наиболее привлекательный кандидат в ТМ:

, (11)

где – некоторые константы, – вино (суперпартнер -бозона), – бино (суперпартнер калибровочного бозона, соответствующего слабому гиперзаряду; смешивание этой частицы с вино даёт суперпартнера фотона (фотино) или -бозона (зино)), - два нейтральных хиггсино (суперпартнеры бозона Хиггса).

Нейтралино имеет спин , не обладает электрическим и цветным зарядами, является стабильной частицей и принимает участие в слабых взаимодействиях.

Кроме нейтралино другими возможными кандидатами на роль частиц темной материи являются снейтрино и гравитино. Однако экспериментальные данные исключают снейтрино из кандидатов в ТМ. Что же касается гравитино, то ввиду наличия лишь гравитационного взаимодействия, поиски этой частицы экспериментальным путем затруднительны.

Таким образом, суперсимметрия предсказывает существование тёмной материи.

*Теория суперструн*

Еще одной причиной введения суперсимметрии является теория суперструн, необходимая для объединения общей теории относительности и квантовой механики. В этой теории фундаментальными объектами выступают струны. Обычные частицы рассматриваются как моды возбуждения струн.

Для того чтобы быть самосогласованной, теория струн должна иметь стабильный вакуум, то есть безмассовые струнные возбуждения (частицы СМ) должны быть устойчивы. Это подразумевает отсутствие тахионов, состояний с мнимой массой, что можно гарантировать лишь в суперсимметричных струнных теориях.

В теории струн было показано, что способы вибрации возникают парами: для каждого способа колебаний со спином имеется ассоциированный способ колебаний со спином 0, а для каждого способа колебаний со спином 1 имеется ассоциированный способ колебаний со спином и т. д.

Теория струн доказала, что она является суперсимметричной теорией струн или теорией суперструн [29].

Низкоэнергетическим пределом струнной теории является супергравитация - локальной суперсимметричная теория. Она содержит новые взаимодействия и новые частицы, среди которых суперпартнер гравитона – гравитино.

*Экспериментальные поиски*

Для нахождения суперсимметрии применяется широкий спектр различных методов, часть поисков приходится на ускорительную физику.

Многочисленные попытки найти суперпартнеров на ускорителе LEP II не дали положительных результатов и позволили получить нижние ограничения на их массы [30]:

GeV, GeV, GeV, GeV, GeV, GeV, GeV. (12)

Стратегия поиска суперсимметрии на Тэватроне и LHC очень похожа и исходит из того, что спектр масс суперпартнёров лежит в районе 1 ТэВ, причём сечения будут достаточно велики, чтобы различить их на фоне рождения обычных частиц [31].

Существует много возможностей для рождения суперпартнёров на адронных коллайдерах (рис. 9). Помимо обычного аннигиляционного канала имеются многочисленные процессы глюонного слияния, кварк-антикваркового и кварк-глюонного рассеяния. Максимальные сечения порядка нескольких пикобарн дают процессы глюонного слияния.

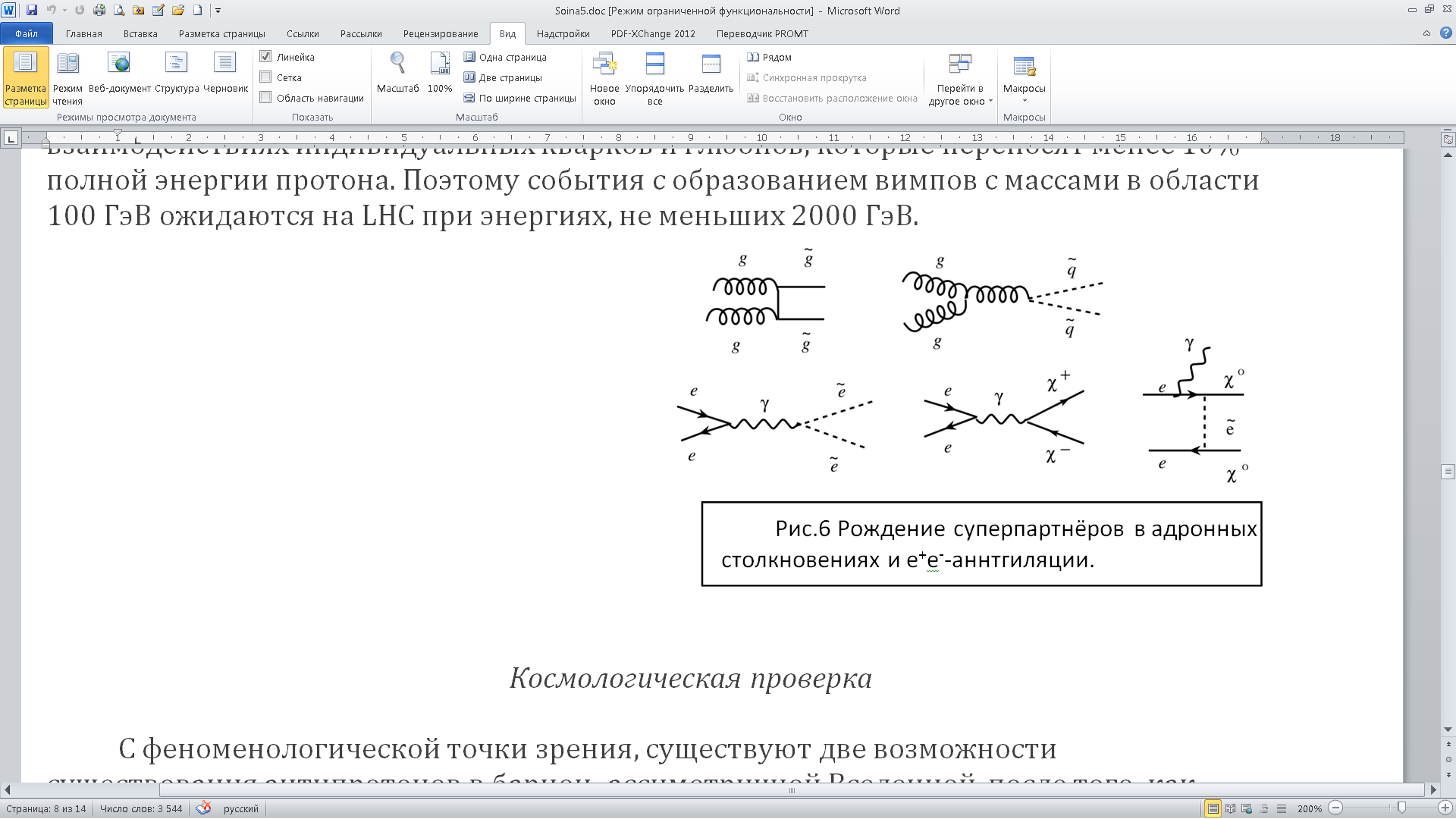
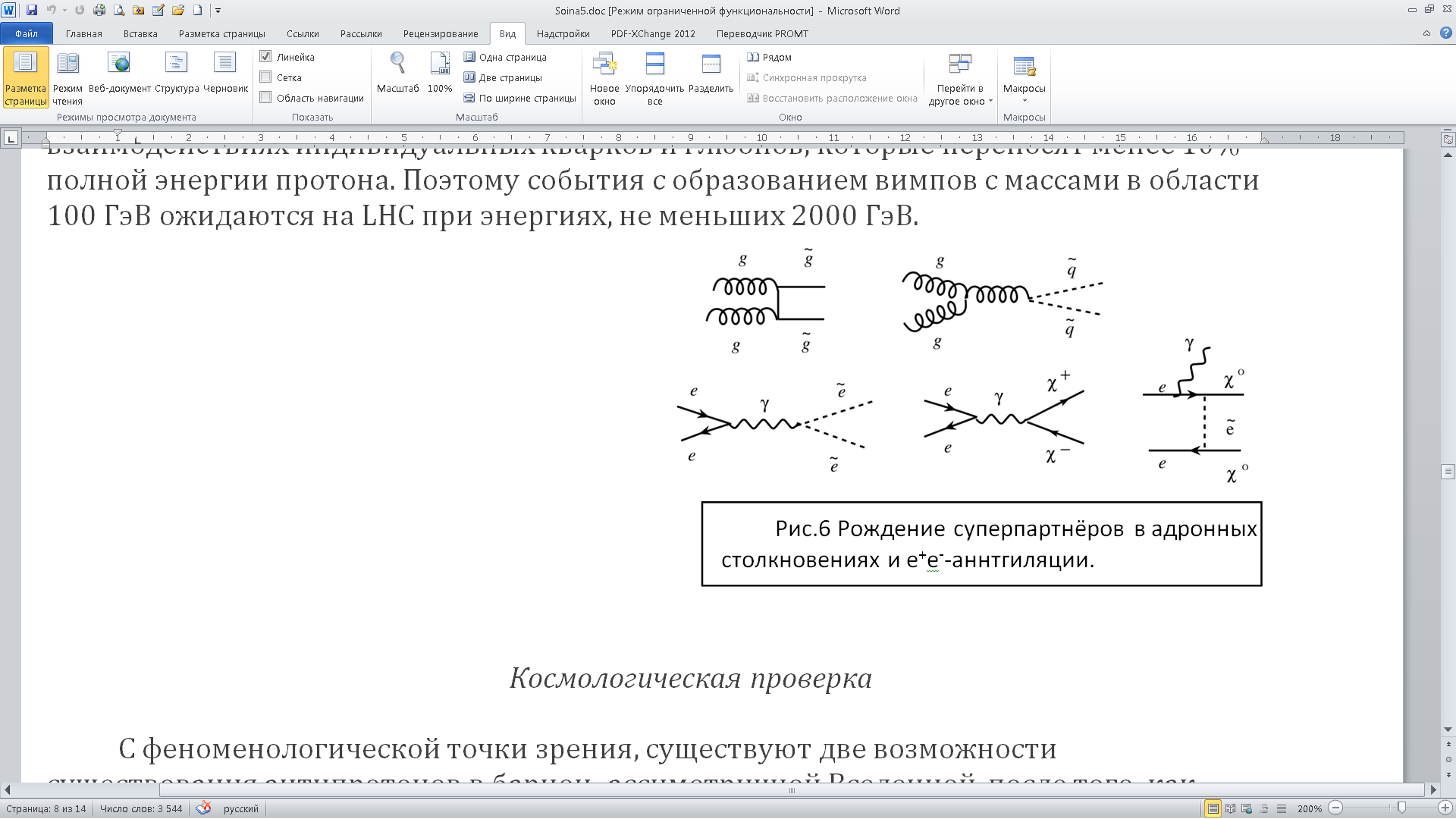
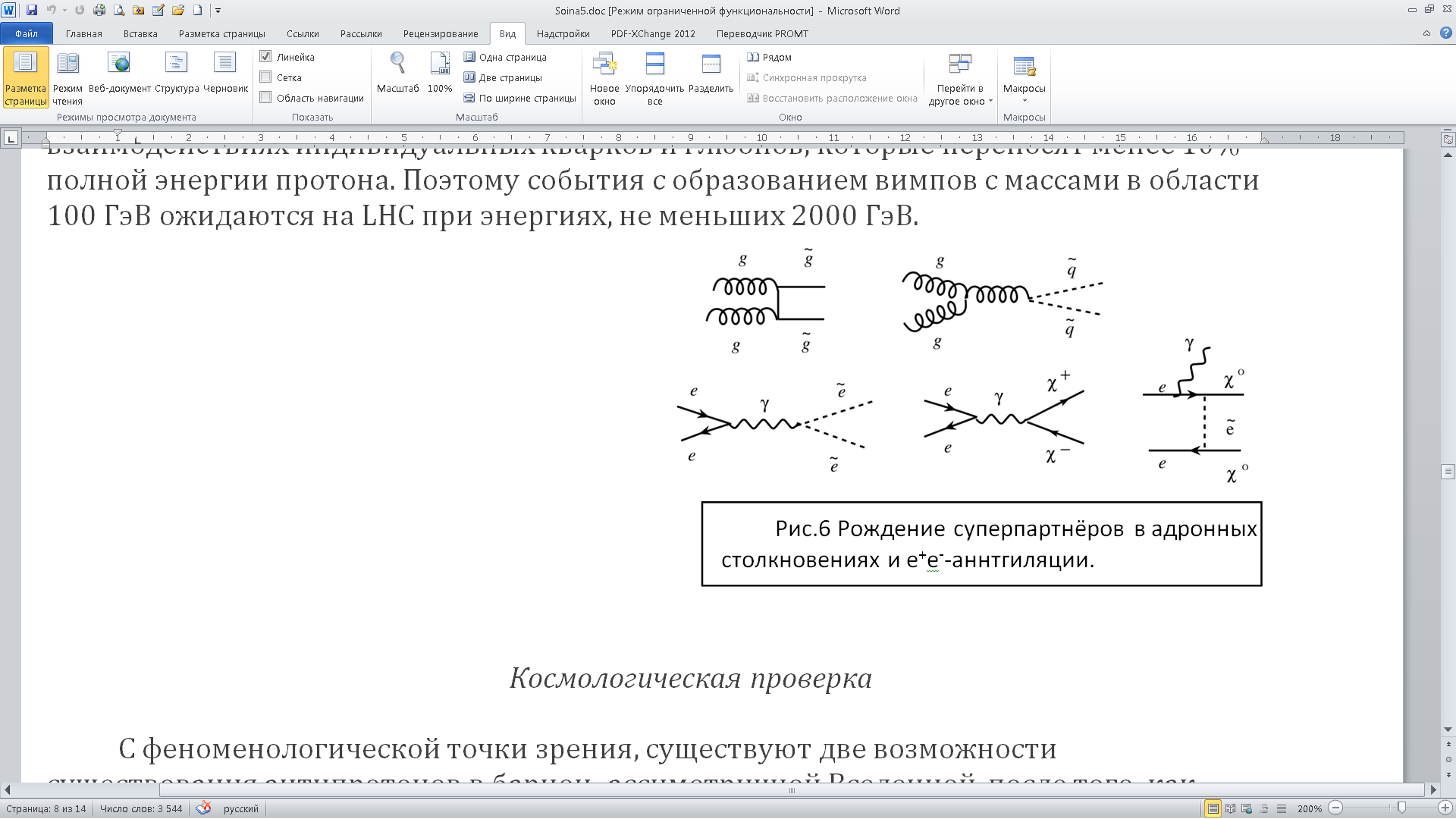


Рис. 9. Диаграммы рождения суперпартнёров в адронных столкновениях и -аннигиляции.

На Тэватроне были получены следующие ограничения на массы скварков и глюино: ≥ 300 ГэВ, ≥ 195 ГэВ [32].

Для описания областей достижимости LHC в различных каналах удобно использовать плоскость в пространстве параметров мягкого нарушения суперсимметрии и (положим массы всех частиц спина 0 равными универсальному значению , массы всех частиц спина 1/2 равными ). Так, например, на рис. 10 показаны области достижимости для различных каналов.

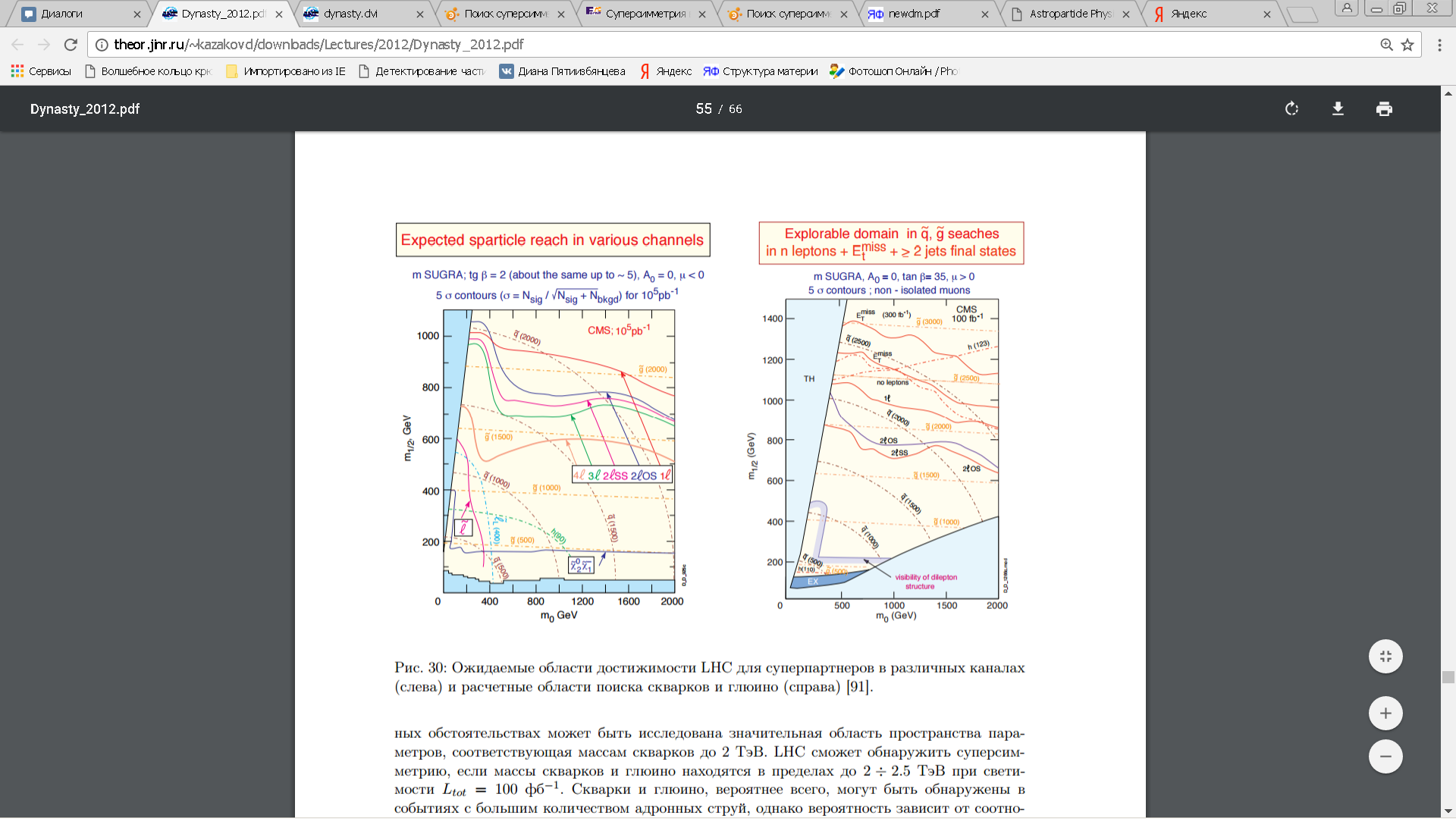


Рис. 10. Ожидаемые области достижимости LHC для суперпартнеров в различных каналах (слева) и расчетные области поиска скварков и глюино (справа) [33].

Данными LHC при энергии 7 ТэВ исключены скварки с массами менее 1.1 ТэВ и глюино легче 0.62 ТэВ. При энергии 14 ТэВ скварки с массами 1.7 ТэВ и глюино с массой 1.02 ТэВ могут оказаться в пределах досягаемости LHC.

На детекторе LHCb Большого адронного коллайдера была получена вероятность распада B-мезона на два мюона. Данное значение составило величину ~ вместо ожидаемых для SUSY .

Также для поисков суперпартнеров можно детектировать темную материю прямым и косвенным способом. Прямой способ предполагает, что частицы тёмной материи прилетают извне и взаимодействуют с ядрами мишени. Существуют несколько экспериментов такого типа: DAMA, Zeplin, CDMS и Edelweiss. Из них только DAMA видит эффект в сезонных модуляциях в области малых энергий 2–6 кэВ [34]. Все другие эксперименты его не наблюдают. Причина расхождения может заключаться в различие методик и мишени, так как сечение взаимодействия ядра с тёмной материей зависит от спина ядра. И всё же, сегодня не существует убедительного свидетельства в пользу прямого детектирования тёмной материи.

И, наконец, кроме этих экспериментов существуют и поиски частиц темной материи, которые дали отрицательные результаты. Например, эксперимент XENON100, работающий со 100 кг жидкого ксенона. Эти данные позволяют закрыть значительную область параметров на рис. 11, включая те значения, на которые намекают упомянутые выше «положительные» результаты экспериментов [35].

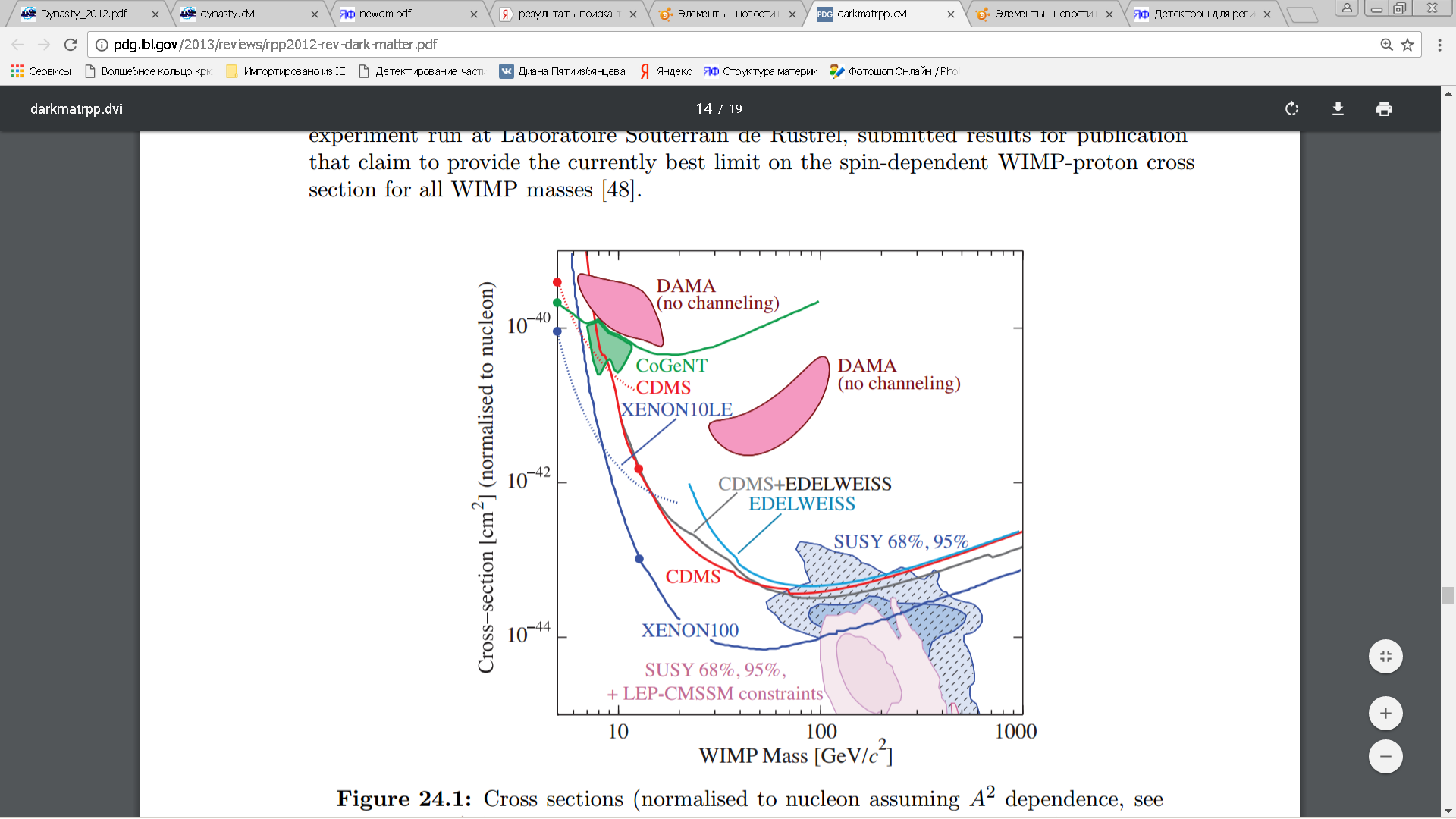


Рис. 11. Сечение взаимодействия частиц тёмной материи с ядрами как функция массы этих частиц и области достижения различных экспериментов.

Цветными пятнами показаны положительные результаты нескольких экспериментов. Линии указывают на ограничения сверху, установленные экспериментами с отрицательными результатами; область выше этих линий считается закрытой [36].

Косвенное детектирование направлено на поиск вторичных сигналов аннигиляции тёмной материи в виде дополнительных гамма лучей и заряженных частиц (антипротонов и позитронов) в космических лучах [37]. Такие частицы должны иметь энергетический спектр, отражающий их происхождение от аннигиляции массивных частиц и отличаться от фона, образованного от известных источников. Существуют несколько экспериментов такого типа: EGRET (диффузные гамма лучи), GLAST, HEAT, AMS01 (позитроны), PAMELA, BESS (антипротоны). Все эти эксперименты видят некоторые отклонения от фона, но экспериментальные неопределённости довольно велики.

Если объединить области, исключенные прямыми поисками суперсимметрии на LHC, количеством темной материи по данным WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) с сильными ограничениями на массу псевдоскалярного хиггсовского бозона A и данными эксперимента XENON100, мы получим исключенную область, изображенную на рис. 12. Нижний предел на массу WIMP составляет 230 ГэВ, а на массу глюино – 1370 ГэВ.

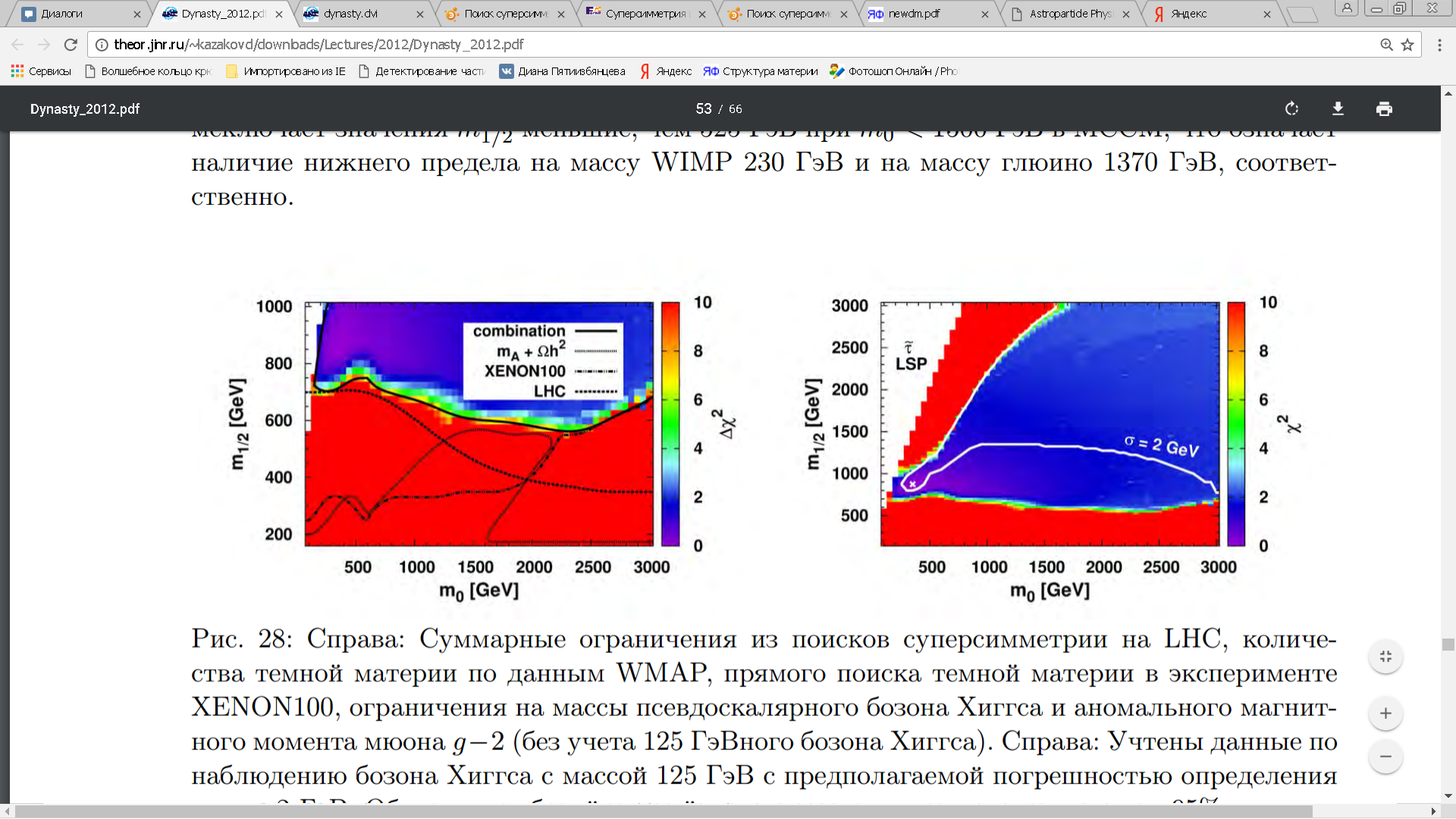


Рис. 12. Суммарные ограничения из поисков суперсимметрии на LHC, количества темной материи по данным WMAP, прямого поиска темной материи в эксперименте XENON100, ограничения на массы псевдоскалярного бозона Хиггса и аномального магнитного момента мюона g−2. Область под белой линией исключена на уровне достоверности 95%.

Таким образом, на данный момент нет достоверных экспериментальных доказательств существования суперпартнеров. Однако все еще есть вероятность, что данные частицы будут обнаружены на LHC при увеличении энергии в ближайшем будущем и на других экспериментах.

*Заключение*

Многие нерешенные в Стандартной модели проблемы привели к попыткам её расширения. Одним из вариантов данного расширения является Суперсимметрия. Она решает такие задачи, как объединение с гравитацией, проблема иерархий, объединение калибровочных констант связи; является ключевым моментом в создании теории Великого объединения; раскрывает явления инфляции и бариосинтеза. Однако экспериментальные поиски доказательств данной теории пока что не имеют успеха. Предполагая вырожденность между первыми двумя семействами сфермионов, имеется 25 масс неоткрытых состояний в Минимальной суперсимметричной стандартной модели (MSSM): 7 скварков и слептонов в первых двух семействах, 7 в третьем семействе, 4 хиггсовских состояния, 4 нейтралино, 2 чарджино и 1 глюино. MSSM имеет около сотни параметров, характеризующих мягкое SUSY нарушение, что является недостатком теории. Узнать, пошла ли природа по пути Суперсимметрии, можно будет при дальнейших поисках на экспериментах.

*Список использованных источников*

1. Гольфанд Ю. А., Лихтман Е. П., Расширение алгебры генераторов Пуанкаре и нарушение Р-инвариантности, Письма в ЖЭТФ, 1971, т. 13, вып.8, стр. 452—455.

2. Д. В. Волков, В. П. Акулов, О возможном универсальном взаимодействии нейтрино, Письма в ЖЭТФ, 1972, т.16, вып.11, стр. 621—624.

3. Wess J., Zumino В., A Lagrangian Model Invariant under Gauge Transformations, Phys. Lett. В., 1974, v. 49, pp. 52-54.

4. Wess J., Zumino В., Supergauge transformations in four dimensions, Nucl. Phys. В., 1974, v. 70, pp. 39-49.

5. Ramond P., Phys. Rev., 1971, D3, 2415. Neveu A. & Schwarz J. Nucl. Phys., 1971, B31, 86.

6. J. Wess and J. Bagger, Supersymmetry and Supergravity, Princeton Univ. Press, 1983.

7. R. Weiner, Spin-statistics-quantum number connection and supersymmetry. Physical Review D87, 2013.

8. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц – М.: Издательство ЛКИ, 2008.

9. Блохинцев Д. И., Гальперин Ф. М. Гипотеза нейтрино и закон сохранения энергии. «Под знаменем марксизма», 6 (1934) 147—157.

10. Горелик Г. Е. Матвей Бронштейн и квантовая гравитация. К 70-летию нерешенной проблемы // Успехи физических наук. — 2005. — Т. 175, вып. 10. — С. 1093—1108.

11. Грэхэм Л. Р. Глава XI. Релятивистская физика. Теории Великого Объединения // Естествознание, философия и науки о человеческом поведении в Советском Союзе — М.: Политиздат, 1991.

12. Васильев А. Н. Квантовополевая ренормгруппа в теории критического поведения и стохастической динамике. — СПб.: издательство ПИЯФ, 1998.

13. Емельянов В.М. Стандартная модель и ее расширения М.:Физматлит, 2007, стр. 374—378.

14. Д.И. Казаков, «Суперсимметричное расширение Cтандартной модели фундаментальных взаимодействий», труды летней школы фонда «Династия» «Физика фундаментальных взаимодействий», 2006, стр. 8—9.

15. Троицкий С. В. Нерешённые проблемы физики элементарных частиц УФН 182, стр. 77–103.

16. Хлопов М.Ю. Основы космомикрофизики. – М: УРСС, 2004, стр. 97.

17. Guth A., Phys. Rev. D23, 1981, 347.

18. Линде А.Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология, М.: Наука, 1990.

19. Линде А.Д. УФН 114, 1984, 177.

20. A. Chatterjee, A. Mazumdar. Tuned MSSM Higgses as an inflaton.

21. R. Kappl, H. P. Nilles, M. W. Winkler. Natural inflation and low energy supersymmetry. Physics Letters B, v. 746, 2015, pp. 15–21.

22. R. Allahverdi. Inflation and The Minimal Supersymmetric Standard Model. Mod.Phys.Let, 2008.

23. R. Allahverdi, A. Kusenko and A. Mazumdar, JCAP 0707, 018 (2007).

24. I. Affleck, M. Dine. A new mechanism for baryogenesis, Nuclear Physics B, Particle Physics B249, 1985.

25. Хлопов М.Ю. Основы космомикрофизики. – М: УРСС, 2004, стр. 105-106.

26. Jungman, Kamionkowski and Griest, Supersymmetric dark matter, Physics Reports, 1996.

27. M.J. Jee, H.C. Ford, G.D. Illingworth "Discovery of a Ringlike Dark Matter

Structure in the Core of the Galaxy Cluster Cl 0024+17" Astrophys.J.661. 728-

749, 2007.

28. Хлопов М.Ю. Основы космомикрофизики. – М: УРСС, 2004, стр. 108.

29. Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории: Пер. с англ. / Под ред. В. О. Малышенко. — Изд. 3-е. — М.: Едиториал УРСС, 2007. — 288 с.

30. ALEPH Collaboration, Phys. Lett. B499 (2001) 67.31. 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.

32. D. Acosta, et al. [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. 90 (2003); T. Affolder et al. [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. 87 (2003); T.Kamon, Proc. of IX Int. Conf. SUSY-01 WS 2001, p.196.

33. http://CMSinfo.cern.ch/Welcome.html- /CMSdocuments/CMSplots.34. R. Bernabei; et al. (2008). "First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI". European Physical Journal C. 56 (3): 333.

35. C. Strege, G. Bertone, F. Feroz, M. Fornasa, R. Ruiz de Austri, R. Trotta , Global Fits of the cMSSM and NUHM including the LHC Higgs discovery and new XENON100 constraints.

36. R.J.Gaitskell and V.Mandic at http://dmtools.brown.edu; W.de Boer, Proc. XXXX Rencontre de Moriond, 2005.

37. Зельдович Я.Б., Клыпин А.А., Хлопов М.Ю., Чечеткин В.М. (1980). Ядерная физика. 31, 1286.