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.

*Введение*

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

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

Другое развитие суперсимметрии связано с теорией струн, которую предложили Пьер Рамон, Джон Шварц и Андре Невё. **[refs to original papers]**

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

* стремление к созданию теории Великого объединения (ВО);
* проблема иерархий;
* скрытая масса и темная материя; **[and dark energy ?]**
* нарушение электрослабой симметрии;
* отсутствие ограничения сверху на массу бозона Хиггса;
* проблема перенормируемости → теория струн; **[string theory pretends to be finite, not simply renormalizable]**
* попытка объединения с гравитацией;
* число поколений; **[in SUSY? Without superstrings ?]**
* масса нейтрино, нейтринные осцилляции и др.

SUSY является ключом к решению данных проблем. **[refs to original papers]**

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.

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 гравитации переносчиком является гравитон, имеющий спин 2. **[Note that it’s not GR but relativistic theory of gravity in flat space-time]** 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. **[in flat space-time]**

Таким образом, из попытки объединить гравитацию с другими взаимодействиями естественным образом вытекает объединение фермионов и бозонов. **[It’s just the opposite : local unification of bosons and fermions unfies gravity with other inetractions]**

*Объединение калибровочных констант связи*

Согласно гипотезе Великого объединения, 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. Так как в СМ сильные и слабые константы взаимодействия убывают с увеличением энергии **[po-raznomu]**, а электромагнитная - возрастает, возможен тот факт, что при некоторой энергии они становятся равными.

Сравниваемые константы связи определяются следующим образом:

,

, (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.

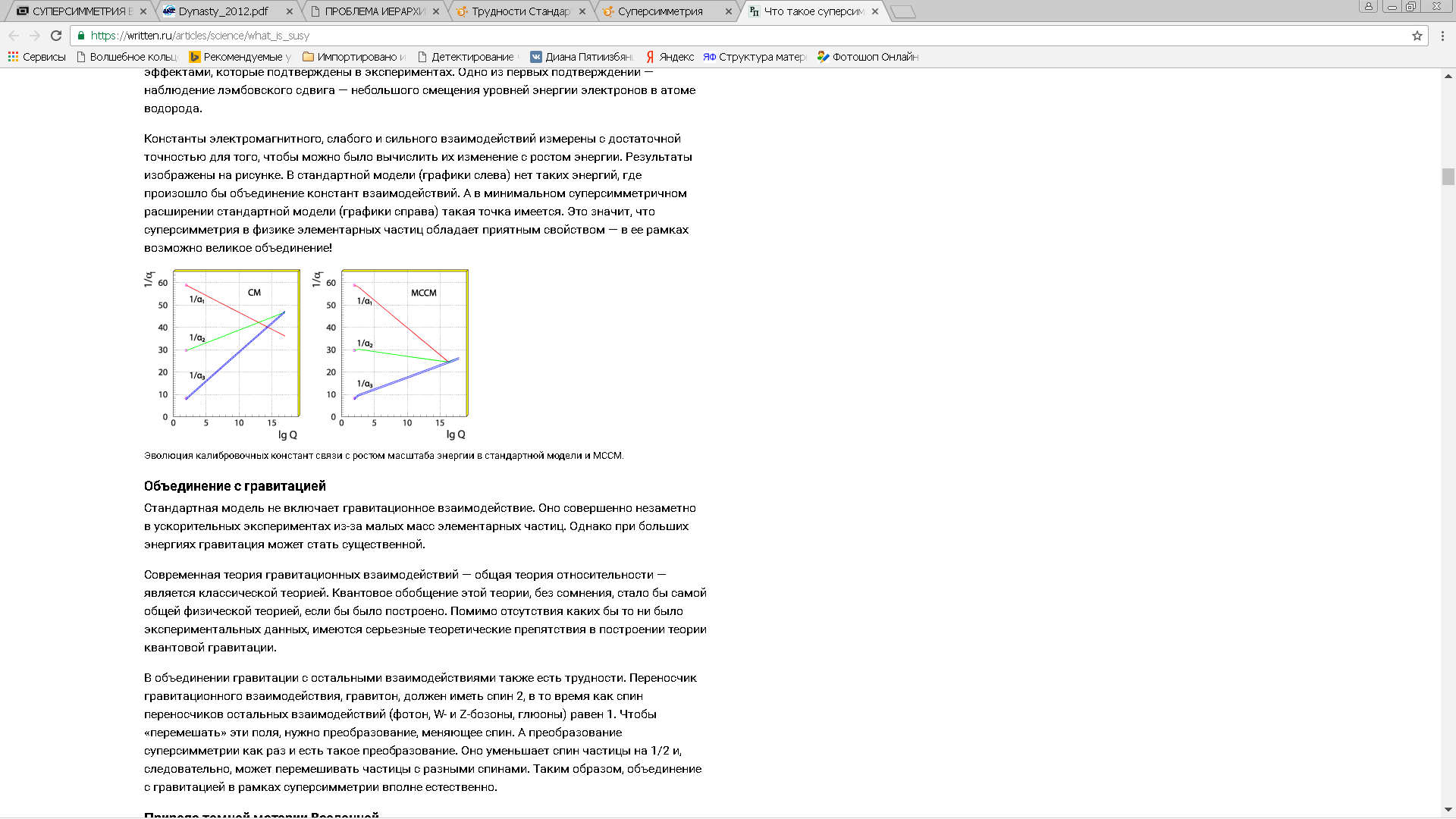


Рис. 1. Эволюция калибровочных констант связи с ростом масштаба энергии в Стандартной модели и её суперсимметричном расширении.

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. 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.

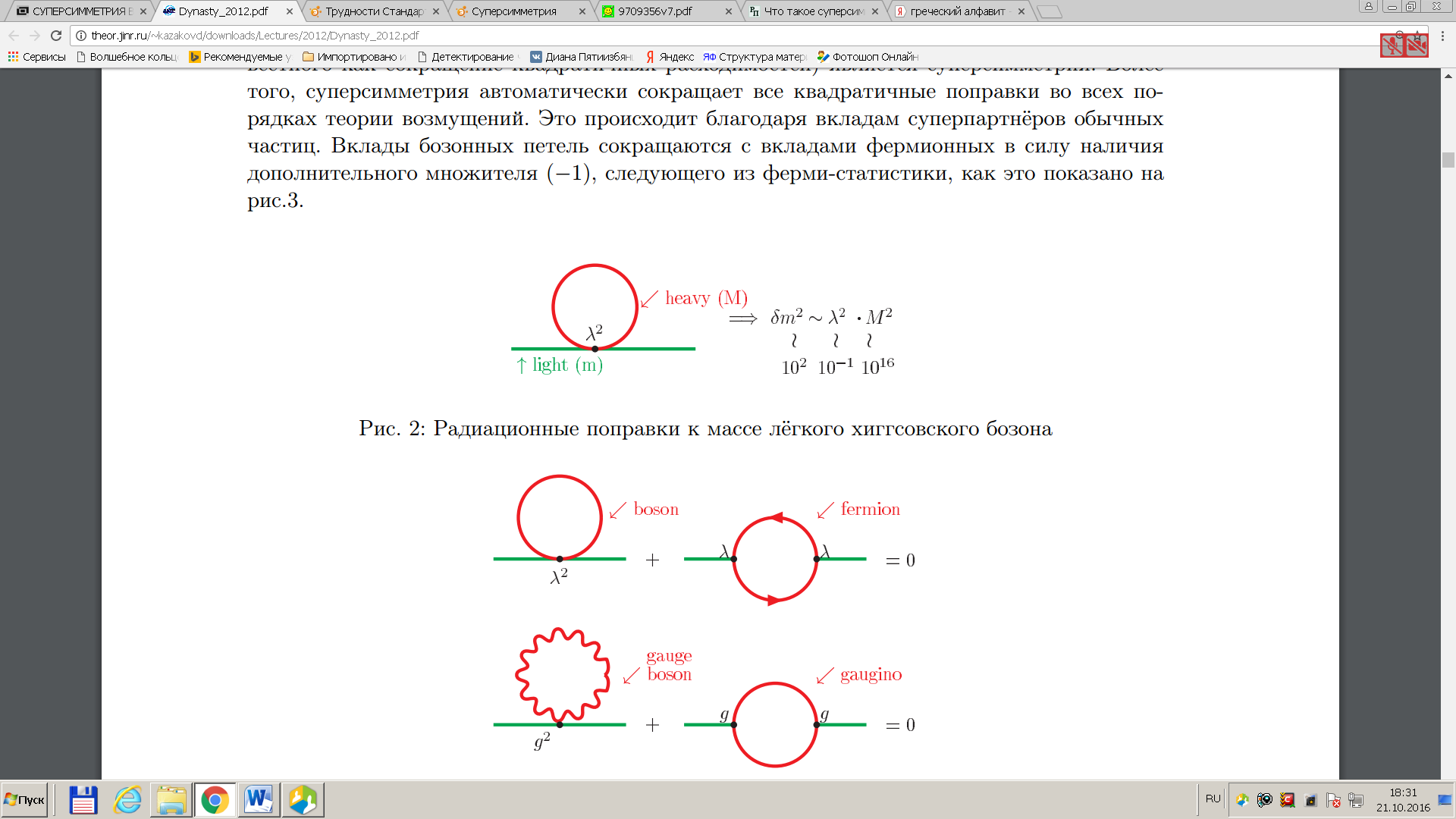


Рис. 2. Радиационные поправки к массе лёгкого хиггсовского бозона.

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.

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

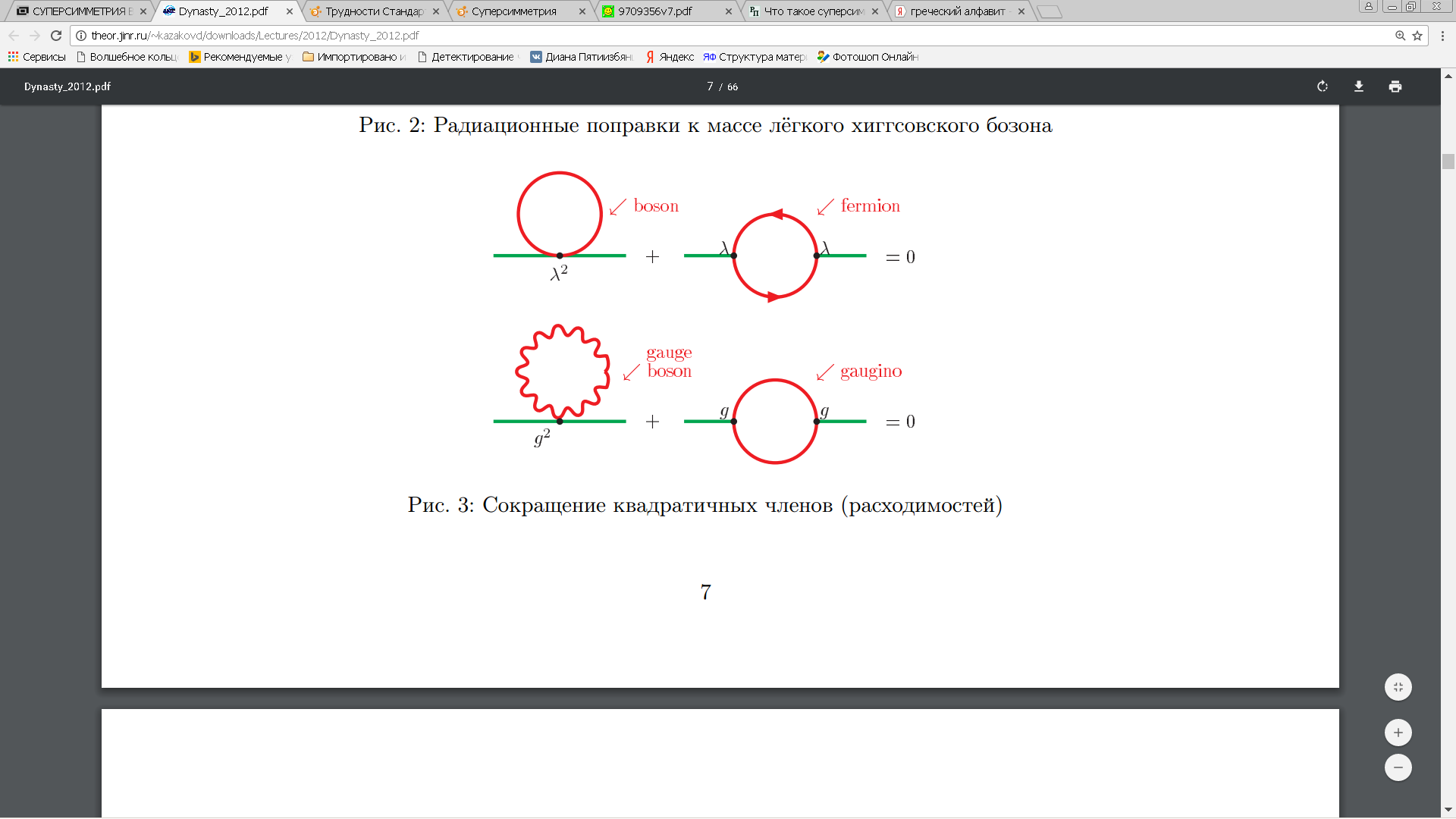


Рис. 3. Сокращение квадратичных расходимостей.

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*

Согласно теории Великого объединения, между электричеством и магнетизмом должно быть «устранено различие»: необходимо существование магнитных монополей. **[If U(1) symmetry of electromagnetic interaction is embedded within the compact GUT group, GUT theory predicts existence of magnetic monopole solutions]**  Для массы магнитного монополя ГэВ концентрация первичных монополей превосходит барионную плотность, **[concentrations of baryons]** так что плотность магнитных монополей оказывается на 16 порядков больше, чем барионная плотность. Чтобы решить проблему перепроизводства монополей, была предложена инфляционная космологическая модель, 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.

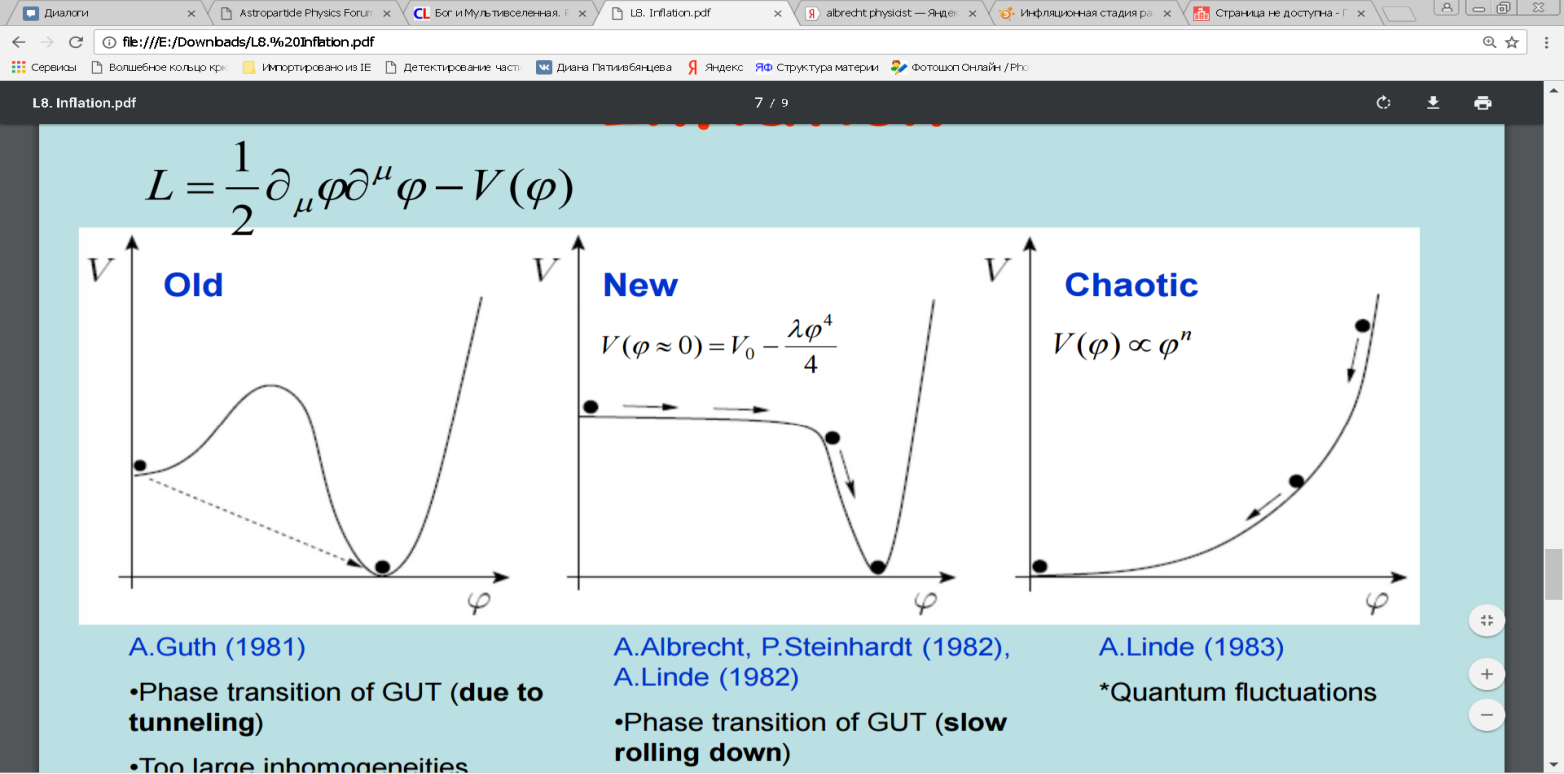
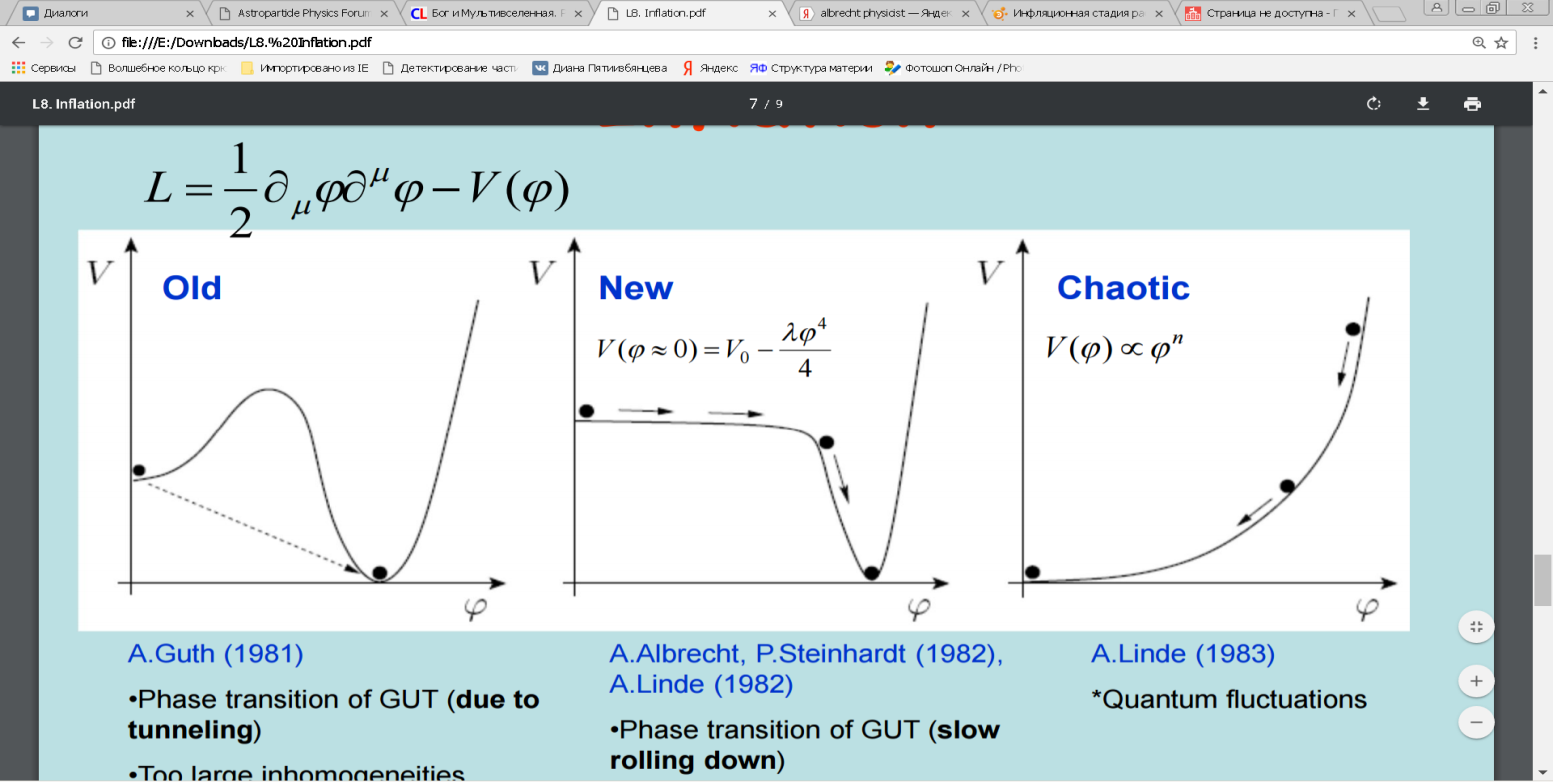
Тогда зависимость масштабного фактора от времени задается экспоненциальным законом:

, (8)

где – постоянная Хаббла.

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

Также 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» и хаотическом 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).

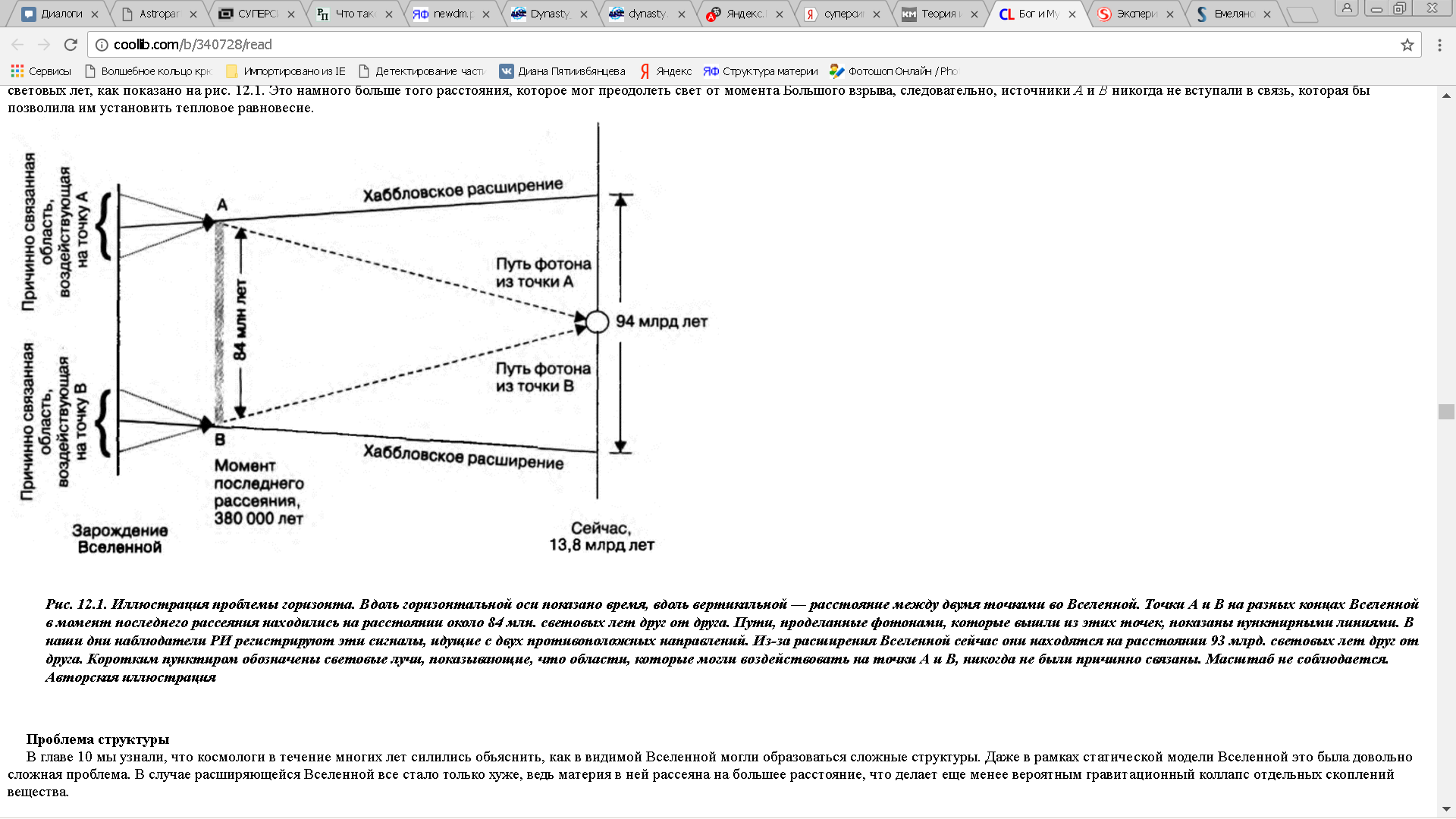


Рис. 5. Иллюстрация проблемы горизонта.

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 установилось тепловое квазиравновесие. **[there may be no thermal equilibrium, it’s causality that is established]**

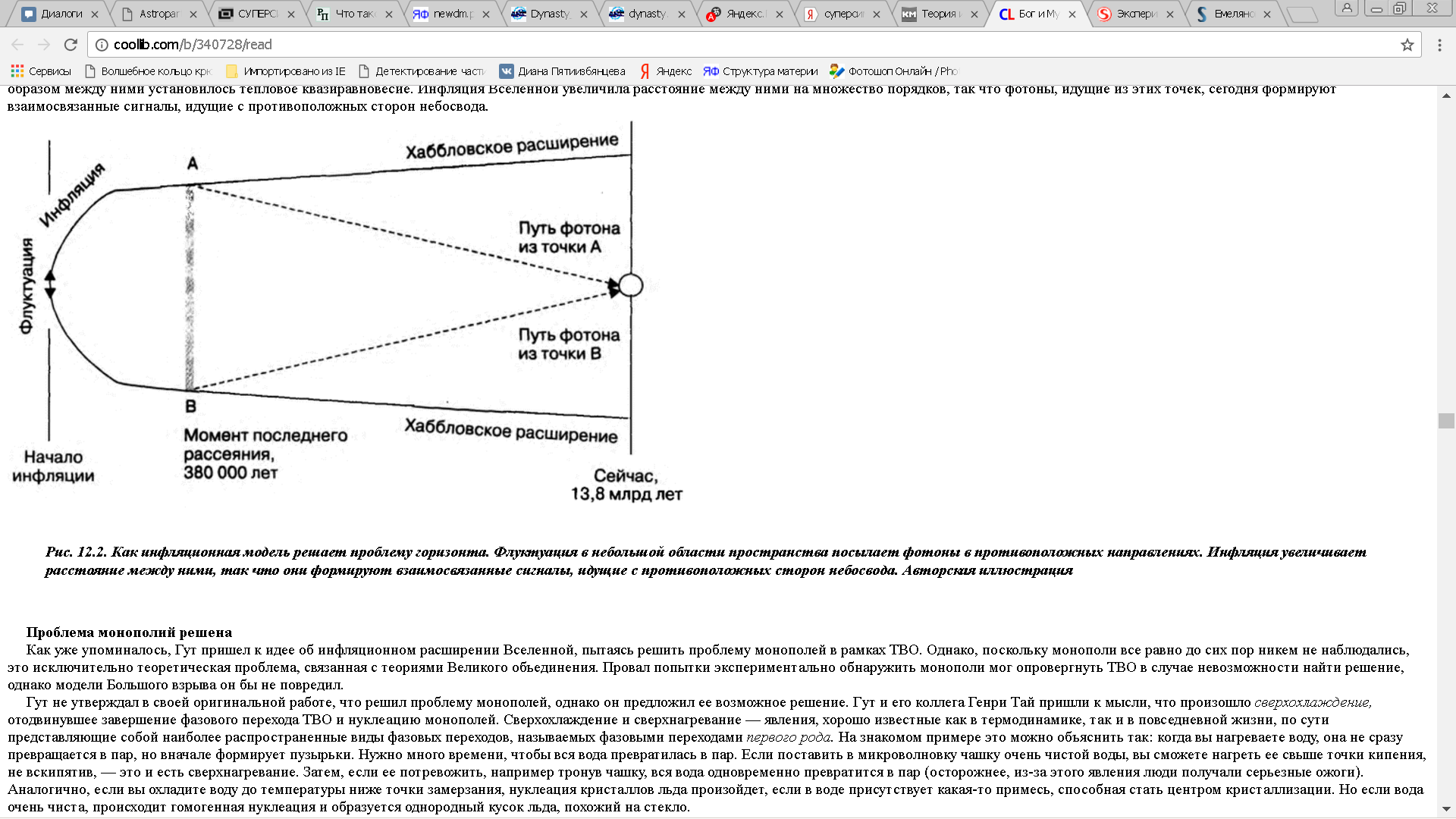


Рис. 6. Иллюстрация решения проблемы горизонта с помощью инфляции.

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 . **[and in more evolved SUSY models ? e.g. recent works of A.D. Linde et al?]**

*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.

Рассмотрим распады некоторых вышедших из равновесия частиц концентрации и их античастиц той же концентрации. 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.

Прямым указанием на существование тёмной материи являются ротационные кривые. **[krivye vrascheniya]**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).

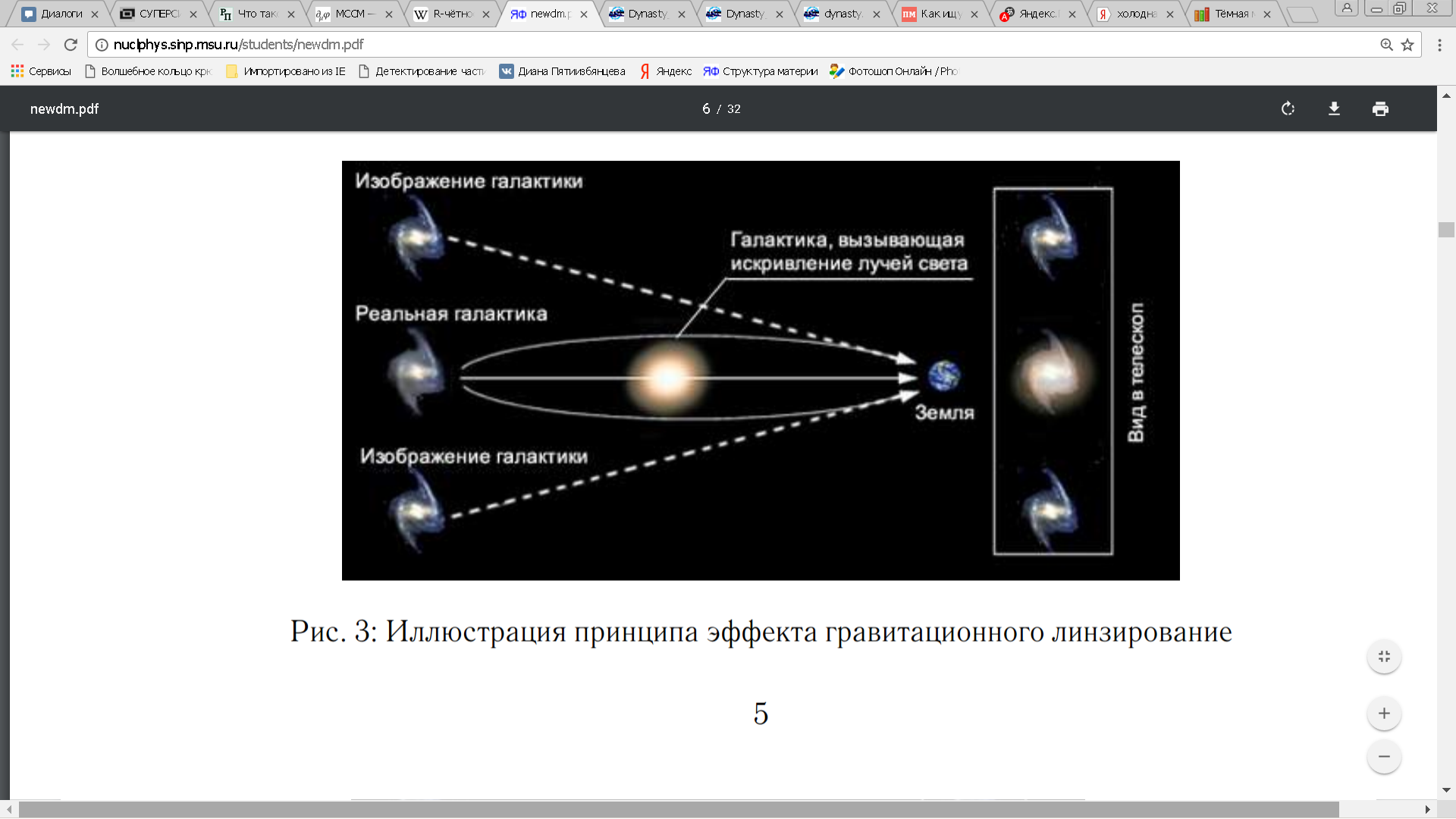


Рис. 7. Иллюстрация гравитационного линзирования.

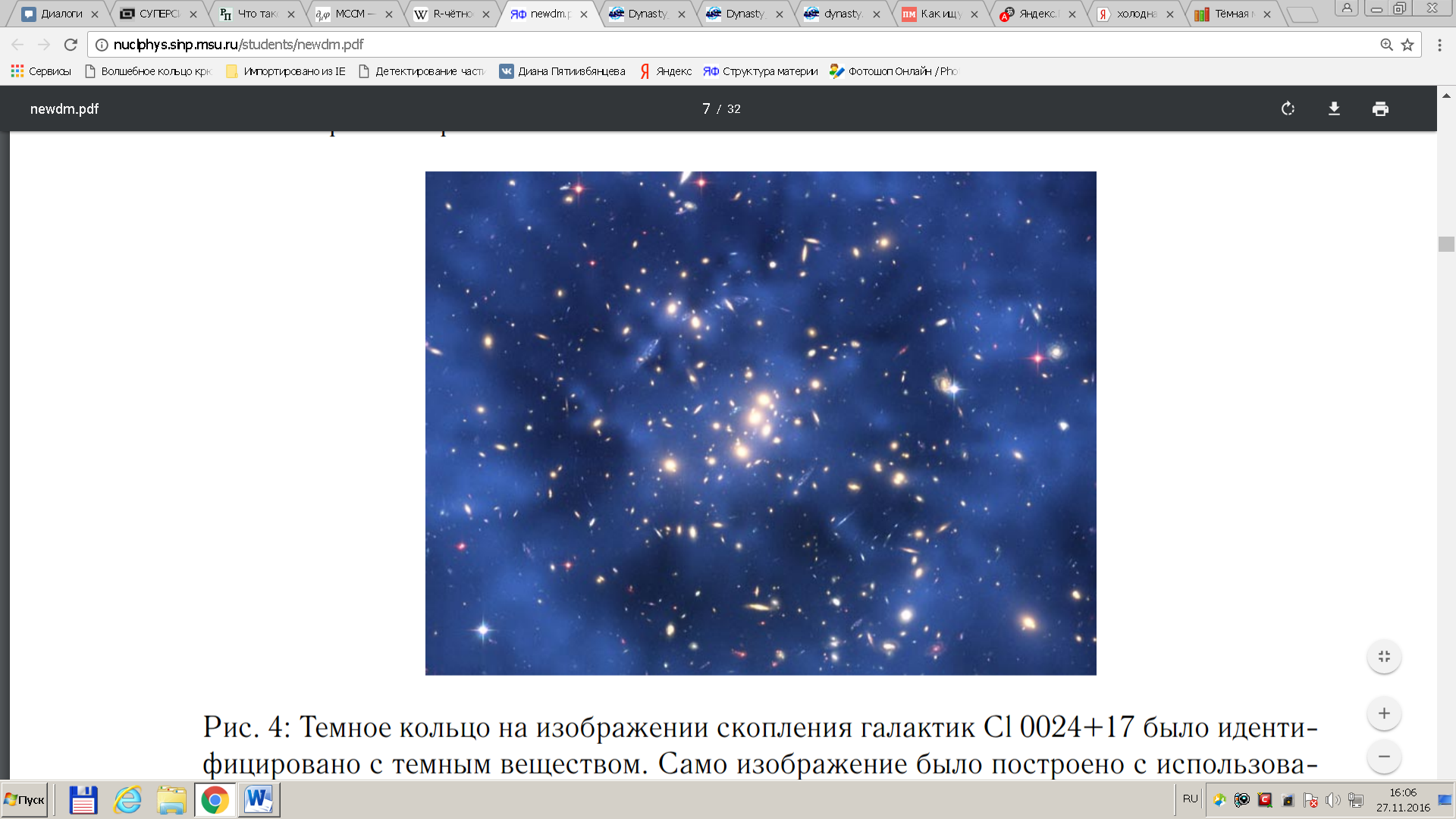


Рис. 8. Изображение “кольца” темной материи в скоплении галактик C1 0024+17, полученное с помощью космического телескопа Hubble.

В СМ нет подходящего кандидата для холодной темной материи. **[What makes us to consider nonbaryonic dark matter? Gravitational lensing and rotation curves can be explained by non-luminous baryonic matter.]** 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 гравитирующего взаимодействия, он является не слишком хорошим кандидатом для экспериментов по поиску частиц ТМ.

Таким образом, суперсимметрия предсказывает существование тёмной материи. Более того, можно так подобрать параметры мягкого нарушения суперсимметрии, чтобы получить правильное количество 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. Именно с этим связан результат взаимного уничтожения аномалий.

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