

На правах рукописи

Салехи Карим

**ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ  
СУПЕРСТРУН**

Специальность 01.04.02 - теоретическая физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2006

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физическо-го факультета Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
профессор Д.В. Гальцов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
А.Я. Буринский  
кандидат физико-математических наук  
Д.Г. Орлов

Ведущая организация: Томский государственный университет,  
г. Томск

Защита состоится "21" декабря 2006 г. в 16 час. на Специализированном Совете К.501.001.17 при Московском Государственном Университете им. М.В.Ломоносова (119992, г. Москва, Воробьевы горы, физический факультет, ауд. СФА ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" ноября 2006г.

Ученый секретарь  
Специализированного Совета К.501.001.17  
д.ф.-м.н.

П.А. Поляков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Гипотеза космических струн была предложена для объяснения наблюдаемой иерархии космических структур (галактик, скоплений галактик, крупномасштабной ячеистой структуры) как альтернатива стандартной модели, основанной на росте возмущений плотности. Эта гипотеза способна объяснить наблюдения в рамках теории, содержащей единственный параметр — плотность массы (натяжение) струны. В основе этих представлений лежало предсказание возможности образования дефектов при фазовых переходах в ранней вселенной в рамках полевых моделей великого объединения. В этих моделях характерная плотность массы имеет (в энергетических единицах) масштаб  $10^{15} - 10^{16}$  Гэв. Однако, новые данные по анизотропии микроволнового излучения несовместны со столь большим значением характерной массы, поэтому гипотеза космических струн полевого происхождения вероятно должна быть отвергнута. Тем не менее, в последнее время активно изучается возможность космических струн в рамках суперструнной модели объединения фундаментальных взаимодействий. Предсказываемые свойства космических суперструн, в отличие от струн, ранее изучавшихся в полевых моделях объединения, не противоречат данным по микроволновому фону.

Диссертационная работа посвящена исследованию динамики космических суперструн с учетом излучения безмассовых полей. Характерным для суперструнной модели космических струн является их взаимодействие с дилатоном и полем два-формы, а также иной характер процессов перезамыкания. Космологическая эволюция сети струн существенно зависит от процессов излучения ими безмассовых полей. Ранее в литературе обсуждалось излучение от осциллирующих струнных петель. В данной работе исследуется другой механизм излучения: черенковское излучение, которое должно возникать когда прямолинейные невозбужденные струны движутся под углом друг к другу так, что точка пересечения имеет сверхсветовую скорость. Ранее подобный механизм обсуждался для глобальных струн, взаимодействующих с полем аксиона, и было показано, что он играет важную роль в их динамике в ходе космологической эволюции. В данной рабо-

те черенковский механизм изучается применительно к космическим суперструнам, взаимодействующим с дилатоном, полем два-формы и гравитационным полем. Развита пертурбативная техника вычислений, позволяющая рассчитывать излучение для ультрарелятивистских струн, а также других протяженных объектов (мембран) рассматриваемых в теории суперструн.

**Актуальность проблемы** обусловлена существенным развитием современной космологии в последние годы, в частности, появлению гипотезы космических суперструн. Их эволюция в ходе космологического расширения должна сопровождаться излучением, которое играет важную роль для последующего сравнения с экспериментом. Основным механизмом излучения, который рассматривался ранее, является излучение безмассовых полей (часть из которых в ходе последующей эволюции становятся массивными) осциллирующим петлями замкнутых струн. Однако, для космических суперструн должна быть велика доля прямолинейных невозбужденных струн, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью. Исследование возможности черенковского излучения в такой системе необходимо для построения более полной картины эволюции сети космических струн.

**Целью диссертационного исследования** было исследование излучения сопровождающего движение прямолинейных космических суперструн, взаимодействующих посредством скалярного поля (дилатона), поля антисимметричной формы второго ранга и гравитации. Ранее было показано, что в случае чисто гравитационного взаимодействия излучение не возникает, однако в случае взаимодействия струн посредством поля формы в плоском пространстве-времени излучение имеет место. В данной работе рассматривался общий случай взаимодействия с тремя указанными полями, который является типичным для теории суперструн, с целью выснить существование эффекта черенковского излучения при движении струн под углом со сверхсветовой скоростью точки пересечения. Кроме того проводилось исследование излучения двух движущихся по углом  $p$ -бран в размерности  $D + 3$  с целью изучения возможности обобщения черенковского механизма на другие протяженные объекты, присутствующие в теории су-

перструн.

**Научная новизна.** В работе впервые исследовано черенковское излучение безмассовых полей дилатона и два-формы прямолинейными струнами движущимися с постоянной скоростью под углом друг к другу. Этот механизм должен вносить существенный вклад в динамику космических суперструн в ранней Вселенной. Новым является также указание на возможность черенковского излучения движущихся  $p$ -бран в пространствах различной размерности, существование которых предсказывается суперструнными моделями объединения фундаментальных взаимодействий.

**Научная и практическая ценность работы.** Полученные в работе результаты имеют важное значение для дальнейшего развития теории космических суперструн в современной космологии, а также для более полного понимания динамики суперструн в объединенных моделях фундаментальных взаимодействий.

Результаты диссертации могут быть использованы в НИИЯФ МГУ, ИЯИ, ЛТФ ОИЯИ, ФИАН, ИТЭФ, МИАН, ТГУ и других научных центрах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на конференции Ломоносов-2006 (Москва, 2006г.), International Europhysics Conference on High Energy Physics HEP-EPS2005 (Lisbon, 2005г.), 2nd International Conference on Quantum Theories and Renormalization Group in Gravity and Cosmology IRGAC2006 (Barcelona, July 11-15 2006), 11-th Marcel Grossmann meeting (Berlin, July 2006), а также на семинарах кафедры теоретической физики МГУ.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 работ.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав

основного текста, заключения и списка цитируемой литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе I “Введение” обсуждаются новые представления, сложившиеся в теории космических струн и космических суперструн, а также дается обоснование выбранной темы исследований и коротко формулируется содержание диссертации. Введение состоит из трех разделов. В первом обсуждаются общие положения теории космических струн, образование которых происходит при фазовых переходах (механизм Киббла) с последующими процессами перезамыкания и образования петель [1]. В последние годы выяснилось, что масштаб массы в полевых моделях космических струн слишком высок, и такие струны будут порождать неоднородности, величина которых не согласуется с данными по микроволновому излучению.

Во втором разделе обсуждается гипотеза космических суперструн, которая была предложена как альтернатива полевым моделям [2]. Первоначально сформулированная Виттеном двадцать лет назад, эта гипотеза долгое время считалась неприемлемой из-за слишком большой (близкой к планковской) плотности массы такой струны в традиционной теории суперструн. Последняя, однако, претерпела существенные изменения в ходе последнего десятилетия, и выяснилась возможность дефектов в струнной теории с плотностью массы существенно более низкой (за счет компактификаций с “большими” дополнительными измерениями, а также в гипербранных моделях). Соответствующая плотность массы может быть на один-два порядка меньше массы, ассоциируемой с фазовым переходом в полевых моделях великого объединения. Такие космические струны не противоречат данным по микроволновому излучению и в последнее время активно обсуждаются в литературе как жизнеспособная альтернатива традиционной теории космических струн. Основными кандидатами на роль космических суперструн являются так называемые  $F$  и  $D$  струны, которые образуются в ходе инфляции в рамках гипербранной космологической модели. Эволюция космических суперструн в целом аналогична эволюции калибровочных струн, однако вероятность перезамыканий для них меньше.

В третьем разделе введения дан обзор работ по излучению от космических струн. Излучение струнами безмассовых полей (некоторые из которых в ходе дальнейшей космологической эволюции могут стать массивными) играет важнейшую роль в теории и позволяет получить ограничения на ее параметры. В основном излучение ассоциировалось с релаксацией возбуждений струнных петель [3].

Далее сформулирована основная задача диссертации: изучить процессы излучения при движении невозбужденных струн под углом друг другу. Ранее было замечено [4], что при таком движении скорость проекции точки пересечения струн может быть произвольной, и в частности, выше скорости света, поэтому можно ожидать возникновения черенковского излучения. Однако расчет показал, что излучения гравитационных волн все же не происходит. С другой стороны, в рамках теории в плоском пространстве-времени было найдено, что имеет место черенковское излучение фотонов сверхпроводящими струнами [5] и излучение аксионов глобальными струнами [6]. В связи с этим была поставлена задача исследования общего случая взаимодействия струн со скалярным полем (дилатон), полем антисимметричного тензора второго ранга (два-форма) и гравитацией, что представляет собой типичный набор струнных взаимодействий в контексте теории суперструн.

**Во второй главе** "Классическая теория возмущений для взаимодействующих струн" сформулирована теория возмущений для описания взаимодействия струн Намбу-Гото посредством скалярного безмассового поля  $\phi$  (дилатон), поля антисимметричного тензора второго ранга  $B_{\mu\nu}$  (поле Калб-Рамона в теории космических струн или поле Невё-Шварца в фундаментальной теории суперструн), и гравитационного поля в 4-мерном пространстве-времени. Действие для системы струн, заметающих мировые листы  $x^\mu = X^\mu(\tau, \sigma)$ , имеет вид:

$$S = - \sum \int \left\{ \frac{\mu}{2} X_a^\mu X_b^\nu g_{\mu\nu} \gamma^{ab} \sqrt{-\gamma} e^{2\alpha\phi} + 2\pi f X_a^\mu X_b^\nu \epsilon^{ab} B_{\mu\nu} \right\} d^2\sigma + \int \left\{ 2\partial_\mu \phi \partial_\nu \phi g_{\mu\nu} + \frac{1}{6} H_{\mu\nu\rho} H^{\mu\nu\rho} e^{-4\alpha\phi} - \frac{R}{16\pi G} \right\} \sqrt{-g} d^4x \quad (1)$$

где  $\gamma = \det \gamma_{ab}$ ,  $\gamma_{ab}$  — метрика на мировом листе, рассматриваемая как

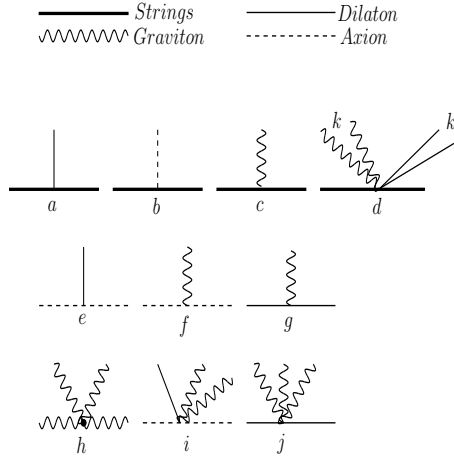


Рис. 1: Вершины, ассоциируемые с действием (1): диаграммы  $a, b, c$  представляют вершины низшего порядка струна-дилатон, струна-два форма и струна-гравитон; диаграмма  $d$  изображает взаимодействие струны с дилатоном и гравитоном всех высших порядков  $k \geq 1, k' \geq 1$ ; диаграммы  $e, f, g$  – полевые вершины низшего порядка, и диаграммы  $e, f, g$  – сопутствующие им мультигравитонные вершины.

независимая переменная,  $\mu$  – натяжение струны,  $\alpha$  – константа связи дилатона,  $f$  – константа связи два-формы,  $g_{\mu\nu}$  – метрика пространства-времени,  $R$  – скаляр Риччи,  $G$  – ньютоновская постоянная,  $H_{\mu\nu\rho} = \partial_{\{\mu} B_{\nu\rho\}}$ , символ  $\{\dots\}$  означает циклическую перестановку индексов.

Для этого действия строится классическая теория возмущений, в которой за нулевое приближение принимается действие (1) при  $\alpha = f = G = 0$ , причем внешние поля отсутствуют  $\phi = 0$ ,  $B_{\mu\nu} = 0$ , и метрика плоская  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu}$ . Строится формальное разложение по степеням констант связи, которое изображается диаграммной техникой. Струна изображается толстой сплошной линией, дилатон – тонкой сплошной линией, поле два-формы пунктирной линией и возмущение метрики волнистой линией. Действию отвечают вершины изображенные на рис. 1. Классическая теория возмущений строится по аналогии с квантово-полевой и состоит в разложении функций погружения  $X^\mu(\tau, \sigma)$ , полей дилатона  $\phi(x)$ , два-формы  $B_{\mu\nu}(x)$  и метрики пространства-времени  $g_{\mu\nu}(x)$  по степеням констант взаимодействия  $\alpha, f, G$ , причем в нулевом приближении присутствуют только невозбужденные струны в пространстве Минковского, метрика на мировых листах которых также является плоской.

В системе возникают классические ультрафиолетовые и инфракрасные расходимости, в низшем приближении теории возмущений они описывают-



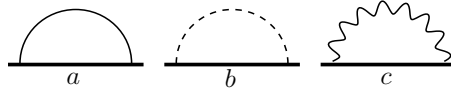


Рис. 2: Диаграммы самодействия в низшем порядке теории возмущений. Вклады, соответствующие диаграммам  $a, b$  расходятся и имеют разные знаки. Вклад гравитационной диаграммы (с) обращается в нуль.

ся диаграммами изображенными на рис. 2. Как показано в разделе 3 главы 2, устранение соответствующих бесконечностей осуществляется перенормировкой параметра натяжения струны. При этом гравитационная расходимость отсутствует вовсе, а расходимости за счет дилатона и два-формы имеют противоположные знаки и сокращаются в пределе Богомольного-Прасада-Соммерфилда. Устранение ультрафиолетовых и инфракрасных расходимостей происходит одновременно.

Третья глава посвящена расчету излучения, сопровождающего движение прямолинейных струн под углом со сверхсветовой скоростью проекции точки пересечения. Излучение возникает во втором порядке теории возмущений. В первом порядке струны генерируют поля дилатона, два-формы и гравитационное поле, которые исчезают на массовой поверхности  $k^2 = 0$  излучения. Они вызывают деформацию мировых листов струн, при этом в уравнения второго порядка для полевых переменных входят эффективные токи, часть из которых локализована на мировых листах струн, а часть во всем пространстве. Эти токи зависят от переменных обеих струн и по существу являются коллективными возбуждениями. Они формируют эффективные источники полей второго порядка, которые уже не обращаются в нуль на массовой поверхности излучения.

В целом излучение в низшем неисчезающем порядке теории возмущений описывается тринадцатью диаграммами, показанными на рис. 3 для случая излучения дилатона. Первые шесть диаграмм  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  отвечают обмену дилатоном, полем формы и гравитоном (здесь термин "гравитон" употребляется для обозначения линеаризованного гравитационного поля). Внешняя линия дилатона на этих диаграммах может исходить из каждой струны, при этом подразумевается, что "виртуальная частица" испускается другой струной. Следующие четыре диаграммы также отвечают части эффективного источника локализованной на мировых по-

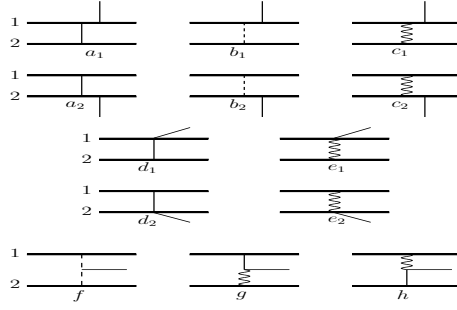


Рис. 3: Диаграммы, описывающие излучение дилатонов в низшем порядке теории возмущений:  $a_1, b_1, c_1$  соответствуют вкладу в излучение от возбуждения первой струны второй струной;  $a_2, b_2, c_2$  вкладу второй от возбуждения ее первой;  $d, e, f$  отвечают вершинам взаимодействия струн с полями более высокого порядка (такие диаграммы отсутствуют для излучения поля два-формы), остальные диаграммы отвечают нелокальному вкладу полей первого порядка в эффективный источник.

верхностях струн. Они возникают благодаря вершинам типа  $d$  на рис. 1. Наконец, оставшиеся три диаграммы описывают неклокальный вклад полей первого порядка в эффективный источник излучения. Используя квантовую аналогию, их можно понимать как слияние виртуальных квантов в реальный.

В случае движения струн с ультрарелятивистской относительной скоростью излучение имеет характерный пик в направлении движения одной струны в системе покоя другой. Для спектрально-углового распределения дилатонов в этом случае получена формула:

$$\frac{d\mathcal{P}^{(\phi)}}{d\omega d\beta} = \frac{64\pi^4 \kappa^2 (\Omega_1 + \Omega_2 \kappa^2 \beta^2)^2}{\omega \frac{1}{4}(1 + \kappa^2 \beta^2)^4} \exp\left(-\frac{\omega d(1 + \kappa^2 \beta^2)}{\gamma \kappa}\right), \quad (2)$$

где  $\Omega_{1,2}$  параметры, выражающиеся через константы связи,  $\beta$  — угол отсчитываемый от направления максимума,  $\kappa = \gamma \cos \alpha$ , где  $\gamma$  — релятивистский фактор,  $\alpha$  — угол наклона струн, в рассматриваемом предделе  $\kappa \gg 1$ . Спектр имеет характерную инфракрасную расходимость со стороны малых частот, и он обрезается сверху (в направлении вперед) на частоте  $\omega \sim \omega_{\max}$ , где  $\omega_{\max} = \frac{\gamma \kappa}{d}$ ,  $d$  — прицельное расстояние. Обозначая через  $\Delta^{-1}$  параметр обрезания по частоте, и интегрируя получаем угловое распределение излучения

$$\frac{d\mathcal{P}^0}{d\beta} = 64\pi^4 \kappa^2 \frac{(\Omega_1 + \Omega_2 \kappa^2 \beta^2)^2}{\frac{1}{4}(1 + \kappa^2 \beta^2)^4} \text{Ei}\left(1, \frac{d(1 + \beta^2 \gamma \kappa)}{\gamma \kappa \Delta}\right), \quad (3)$$

где используется интегральная показательная функция. Поскольку послед-

няя экспоненциально спадает при больших значениях аргумента, получаем что угловое распределение сосредоточено в области углов  $\beta \lesssim \sqrt{\gamma k}$  вокруг направления  $\beta = 0$ .

Излучение поля два-формы описывается девятью диаграммами аналогичными показанным на рис. 3, кроме диаграмм типа  $d, e$ . Его свойства качественно аналогичны описанным выше. Излучение гравитонов отсутствует вовсе, это можно связать с фактом отсутствия дважды поперечных гравитационных возбуждений в размерности  $2+1$ . Действительно, как было показано в [4], выбором системы отсчета и определенной параметризации мировых листов можно доказать эквивалентность рассматриваемой задачи задаче о движении точечных частиц, взаимодействующих со скалярным и векторным полем в трехмерном пространстве-времени.

В третьей главе также сделана оценка полной генерации черенковского излучения в процессе эволюции сети космических суперструн, которая показывает, что эффект имеет тот же порядок величины, что и излучение от осциллирующих петель.

В **главе IV** “*Излучение при столкновении мембран*” изучается вопрос о существовании черенковского механизма для гипербран более высокой размерности, движущихся в пространствах с дополнительными измерениями, которые присутствуют в теории суперструн. На примере мембраны (2-браны) в пятимерном пространстве-времени рассчитано черенковское излучение поля 3-формы. Рассматривается случай двух плоских мембран, движущихся в непересекающихся объемах. Наклон мембран относительно друг друга определяется двумя углами  $\alpha$  и  $\beta$ . В этом случае многообразием (проекцией) пересечения плоскостей является прямая, которая, аналогично точке пересечения струн, может перемещаться со сверхсветовой скоростью. Как и в случае струн, рассмотренном в предыдущей главе, во втором приближении по полю возникает черенковское излучение. Его свойства фактически повторяют свойства излучения поля два-формы для струн в четырехмерии. Этот результат уже не имеет места при произвольной ориентации движущихся гиперплоскостей в пространствах, в которых последние имеют координатность более двух.

В **главе V** “*Излучение в  $2+1$  теории*” рассматривается задача об излуче-

нии точечного заряда в трехмерном пространстве-времени, и обсуждается связь с черенковским излучением струн в четырехмерии. Показано, что эта задача эквивалентна случаю параллельных струн, тем самым устанавливается связь черенковского механизма излучения протяженных объектов с тормозным излучением частиц. Эта задача возможно может иметь и другие приложения (тонкие пленки). В более общем случае излучение точечного заряда в трехмерном пространстве-времени моделирует излучение протяженных объектов любой пространственной размерности при их движении в пространстве, в котором они имеют координатность два.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

1. Развита классическая пертурбативная техника вычислений, позволяющая рассчитывать взаимодействие струн в терминах разложений по степеням констант связи с безмассовыми полями. Построена соответствующая диаграммная техника.
2. Показано, что ультрафиолетовые и инфракрасные расходимости, возникающие при учете самодействия в уравнениях движения в низшем приближении теории возмущений, устраняются перенормировкой натяжения струны. При этом гравитационная расходимость отсутствует, а расходимости для дилатона и поля два-формы коенцируют друг друга в пределе Богомольного-Прасада-Соммерфилда.
3. Показано, что для прямолинейных струн, движущихся под углом со сверхсветовой скоростью проекции точки пересечения, возникает черенковское излучение, описываемое членами второго (и выше) порядков теории возмущений. Получены формулы для спектрально-углового распределения излучения дилатонов и поля два-формы. Показано, что в ультрарелятивистском пределе излучение имеет резкий максимум в направлении движения движущейся струны в системе покоя струны-мишени.

4. Показано, что черенковское излучение полей дилатона и анизимметричных форм также возникает для протяженных объектов более высокой размерности ( $p$ -бран) в многомерных пространствах, причем для коразмерности два его свойства аналогичны свойствам излучения струн в четырехмерном пространстве-времени.
5. Рассмотрено излучение точечных частиц в трехмерном пространстве-времени и продемонстрирована его связь с излучением струн и мембран в пространствах более высокой размерности, в которых соответствующие объекты имеют коразмерность два.

### Цитируемая литература

1. M. B. Hindmarsh, T. W. B. Kibble, *Cosmic strings*, Rept. Prog. Phys. **58** 1995 477 [arXiv:hep-ph/9411342].
2. J. Polchinski, *Cosmic strings revisited*, AIP. Conf. Proc. **743** (2004) 331; Int. J. Mod. Phys. **A20** (2004) 3413 [arXiv:hep-th/0410082].
3. T. Vachaspati and A. Vilenkin, *Gravitational radiation from cosmic strings*, Phys. Rev. D **31** (1985) 3052.
4. D. V. Gal'tsov, Yu. V. Grats, and P. S. Letelier, *Post-linear formalism for gravitating strings: crossed straight strings collision*, Ann. of phys. **224** (1993) 90.
5. Д.В. Гальцов, Ю.В. Грац и А.Б. Лаврентьев, *Черенковское излучение сверхпроводящих космических струн*, Письма в ЖЭТФ, **59** No. 6 (1994) 359-363;
6. D. V. Gal'tsov, E. Yu. Melkumova and R. Kerner, *Axion bremsstrahlung from collisions of global strings*, Phys. Rev. D **70** (2004) 045009 [arXiv:astro-ph/0310718].

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *E. Yu. Melkumova D. V. Gal'tsov and K. Salehi* Form-field bremsstrahlung under collision of p-branes. // *Сборник тезисов Международной конференции по физике высоких энергий HEP-EPS, Лиссабон, 2005* p.158, 2005. [arXiv:hep-th/0512328].

2. *Д. В. Гальцов, Е. Ю. Мелкумова, К. Салехи* Тормозное излучение дилатонов при столкновении космических струн. // *Сборник тезисов Международной конференции Ломоносов-2005*, Изд-во физического факультета МГУ, Москва, 2005, т.2, стр.148-149.

3. *E. Yu. Melkumova D. V. Gal'tsov and K. Salehi* Form-field bremsstrahlung under collision of p-branes. // *POS HEP2005*, p.147-151, 2006.

4. *E. Yu. Melkumova D. V. Gal'tsov and K. Salehi* Dilaton and axion bremsstrahlung from collisions of cosmic (super)strings. // *J. Phys. A: Math. Gen.* (принято к печати).

5. *D. V. Gal'tsov E. Yu. Melkumova and K. Salehi* Cerenkov radiation from moving intersecting strings. // *Препринт физического факультета МГУ, 10/2006*