

На правах рукописи



*Stepina* —

**Степина Светлана Петровна**

**АВТОРЕЗОНАНСНЫЙ И ПОНДЕРОМОТОРНЫЙ  
МЕХАНИЗМЫ УСКОРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

01.04.02 – теоретическая физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

26 Ноя 2009

Москва 2009

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики  
факультета физико-математических и естественных наук  
Российского университета дружбы народов

Научный руководитель:  
Доктор физико-математических наук,  
профессор

Владимир Петрович Милантьев

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
кандидат физико-математических  
наук

Валерий Борисович  
Красовицкий  
Рамаз Ревазович Рамазашвили

Ведущая организация:  
ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и  
термоядерных исследований

Защита диссертации состоится «15 » декабря 2009 г. в 15ч.30мин  
на заседании диссертационного совета  
По адресу: 115419, г.Москва, ул.Орджоникидзе, 3.

С диссертацией можно ознакомится в Научной библиотеке Российского  
университета дружбы народов по адресу:

115419, г.Москва, ул.Орджоникидзе, 3.  
Автореферат диссертации разослан « 0 » ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



С.А.БУДОЧКИНА

## *Общая характеристика работы*

### Актуальность темы

Современные источники заряженных частиц высоких энергий – ускорители – являются самыми дорогостоящими физическими установками. Поэтому уже длительное время ведутся поиски новых, альтернативных методов ускорения заряженных частиц, не связанных с чрезмерными энергетическими и финансовыми затратами. Кроме того, создание ускорителей на основе новых эффективных механизмов имеет самостоятельный научный и практический интерес. Исследование механизмов ускорения частиц важно также для решения разнообразных астрофизических задач. В связи со сказанным, поиск альтернативных методов ускорения заряженных частиц является одним из актуальных направлений современной физики как в чисто научном, так и прикладном отношении. Тематика данной диссертационной работы находится в русле этого направления. Работа посвящена исследованию одного из перспективных новых механизмов лазерного ускорения электронов, основанного на явлении циклотронного авторезонанса. Авторезонансный режим ускорения лазерным излучением может быть эффективным для ультраколлимативистских электронов. В настоящей работе рассматривается такой механизм ускорения.

### Цели и задачи

Настоящая диссертационная работа посвящена дальнейшему исследованию авторезонансного механизма ускорения мощным лазерным излучением.

1. Поиск высокоэффективных механизмов авторезонансного ускорения электронов гауссовым лазерным излучением низшей и первой мод.
2. Изучение влияния излучения первой моды на механизм ускорения.
3. Вычисление пондеромоторных сил мощного электромагнитного излучения, действующих на коллимативистский электрон.

## Научная новизна и практическая ценность

Найдены новые эффективные режимы авторезонансного ускорения ультрапрелятивистских электронов в поле лазерного гауссова излучения различных мод. Впервые показано, что при авторезонанском ускорении электронов гауссовым излучением низшей моды образуется трубчатый пучок, радиус которого не превосходит сужения ускоряющего гауссова пучка. Впервые проведен анализ авторезонансного ускорения электронов гауссовым лазерным излучением первой моды, из которого следует, что с использованием излучения первой моды можно существенно повысить эффективность ускорения. При этом, однако, уменьшается интервал ускорения, и повышаются требования к параметрам инжекции ускоряемых электронов. Впервые проведено исследование авторезонансного ускорения электронов коротким лазерным импульсом моды TEM (1,0). Показано, что форма ультракоротких импульсов не может задаваться произвольно. Найдено, что темп ускорения электронов импульсом моды TEM (1,0) в авторезонансном режиме мало отличается от темпа пондеромоторного ускорения, рассмотренного в работе Miyazaki S., Kong Q. et al. – Micro electron bunch generation by intense short pulse laser //J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V.36. P.2878-2882. Однако авторезонансный режим ускорения не требует выполнения довольно жестких условий инжекции ускоряемого электронного пучка. Получено также новое общее выражение для релятивистской пондеромоторной силы в поле мощного излучения на основе математически последовательного метода усреднения Боголюбова.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для дальнейших поисков высокэффективных механизмов ускорения, а также при создании новых ускорителей и инжекторов электронов.

## Апробация работы и публикации

Результаты представленные в диссертации докладывались на Всероссийских научных конференциях по проблемам математики, информатик, физики и химии (2002, 2003, 2004, 2006, 2009), Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (2003,

2005, 2006, 2009) и научных семинарах кафедры экспериментальной физики РУДН. По материалам диссертации опубликовано 3 статьи в реферируемых журналах.

### **Объем и структура диссертации.**

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 106 страницах, включая 29 рисунков.

### ***Содержание работы***

Во Введении обоснована актуальность выбранной темы, ее цель и кратко описана характеристика работы.

В первой главе исследуется авторезонансный механизм ускорения частиц в поле гауссова пучка низшей и первой мод. Получены точная система уравнений и в квазиоптическом приближении упрощенная система уравнений движения частицы в ГП низшей моды. Проведено численное решение этих систем. Показано, что при выполнении циклотронного резонанса в начальный момент времени частица набирает энергию более чем в 10 раз. При ускорении частица раскручивается по спирали, пока не достигнет предельного цикла (на расстоянии менее двух рэлеевских длин) и так как радиус предельного цикла меньше сужения ГП, то частица не покидает ускоряющий ГП. Показано, что с учетом кулоновского поля ускоряющегося пучка набор энергии на рассматриваемом промежутке снижается.

Были получены уравнения движения в поле ГП первой моды и проведено их численное решение. Показано, что характер изменения энергии существенно зависит от начальных соотношений между быстрыми фазами. Расчеты, проведенные при различных начальных значениях быстрых фаз, показали, что в подавляющем большинстве случаев происходит ускорение частиц на расстоянии порядка рэлеевской длины, и лишь при некоторых «неблагоприятных» фазах резонанс срывается на сравнительно большом расстоянии. Частицы с такими фазами выбывают из режима синхронного ускорения.

Анализ ускорения проводился при условии, что электроны инжектируются в плоскости сужения ГП при циклотронном резонансе. Синхронность взаимодействия электронов с излучением обеспечивается тем, что условие циклотронного резонанса почти сохраняется на расстоянии порядка рэлеевской длины. Были рассмотрены также частицы, для которых заведомо существует начальная расстройка частот.

Показано, что при определенных условиях темп ускорения пучком первой моды может быть выше, чем в случае пучка низшей моды.

Во второй главе рассматривается движение электронов в поле комбинированного гауссова пучка. Проведенные вычисления показывают, что характер набора энергии существенно зависит от соотношений между амплитудами пучков низшей моды и первой моды, а также от начальных фаз. Движение носит сложный характер и по мере ускорения частица довольно быстро смещается в поперечном направлении. Показано, что существует область параметров, в которой электроны набирают значительную энергию на достаточно малом расстоянии – порядка половины рэлеевской длины. Более эффективным является использование комбинированного гауссова излучения, составленного из гауссова пучка низшей моды и пучка первой моды с относительно небольшой интенсивностью.

В третьей главе проведено исследование ускорения электронов лазерным импульсом моды TEM (1,0) в режиме циклотронного авторезонанса при различных интенсивностях излучения и длительности импульса. Предполагается, что длительность импульса  $L \gg \lambda$ . В этом случае, форма импульса может задаваться произвольно. На основе численного решения релятивистских уравнений движения электрона по методу Рунге-Кутта показано, что начальное условие циклотронного авторезонанса практически не нарушается при движении электрона на расстоянии порядка рэлеевской длины. Этим обеспечивается высокий темп ускорения.

Четвертая глава посвящена общему выводу выражения для релятивистской пондеромоторной силы в рамках одночастичной модели на основе последовательной схемы усреднения Боголюбова.

Получены усредненные уравнения движения релятивистской заряженной частицы в поле достаточно мощной поперечной квазимохроматической волны, распространяющейся вдоль постоянного магнитного поля вне области резонансного взаимодействия волны с частицей. Показано, что в первом приближении возникает эффект нелинейного сдвига частот (волны и гирочастоты), имеющий чисто релятивистское происхождение и вызванный ВЧ-полем.

Получено общее выражение для релятивистской пондеромоторной силы, действующей в направлении распространения волны. Получено выражение для обобщенного релятивистского квазипотенциала Миллера, которое зависит от интенсивности волны, от соотношения между гирочастотой и частотой волны (с доплеровским сдвигом), между фазовой скоростью волны и скоростью частицы в направлении распространения волны, а также от ее поляризации. Показано, что при соответствующих условиях полученное выражение для квазипотенциала переходит в формулу Миллера.

Рассмотрено выражение для квазипотенциала в частных случаях. В случае циклотронной волны, распространяющейся со скоростью света, возможно как втягивание частицы в область сильного поля волны, так и выталкивание из нее в зависимости от направления движения вдоль магнитного поля.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**Приложение** содержит основную часть компьютерной программы, с помощью которой сделаны все расчеты, приведенные в работе.

#### На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты исследования авторезонансного ускорения электронов в поле гауссова лазерного излучения низшей и первой мод:
  - начальное условие циклотронного резонанса с достаточной точностью сохраняется на промежутке ускорения.

- в отличие от пондеромоторного механизма ускорения авторезонансный режим ускорения слабо чувствителен к начальным фазам инжектируемых частиц.

- при авторезонансном ускорении в ГП низшей моды в поперечной плоскости частицы достигают предельный цикл, в результате чего образуется трубчатый пучок ультрарелятивистских электронов.

- определены условия, при которых ускорение электронов в поле ГП первой моды происходит с большей эффективностью, чем в случае ГП низшей моды.

- в поле комбинированного гауссова излучения нулевой и первой мод при сравнительно небольшой относительной интенсивности излучения первой моды достигается более высокая эффективность ускорения, чем при авторезонансном ускорении гауссовым излучением низшей или первой мод.

- найдены условия эффективного ускорения электронов лазерным импульсом моды ТЕМ (1,0) в режиме циклотронного авторезонанса.

2. Усредненные уравнения движения, полученные по методу Боголюбова для релятивистской заряженной частицы в поле мощной квазимонохроматической волны, распространяющейся вдоль внешнего постоянного магнитного поля вне области резонансного взаимодействия волны с частицей, включающие общее выражение для релятивистской пондеромоторной силы, действующей в направлении распространения волны, и его анализ.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. *Милантьев В.П., Степина С.П.* - Авторезонансное ускорение электронов лазерным комбинированным гауссовым излучением //Тезисы докладов XXXVIII Всерос. конф. по проблемам математики, информатики, физики и химии, Москва, РУДН, 17-21 апреля 2002.
2. *Милантьев В.П., Степина С.П* - Ускорение электронов гауссовым пучком первой моды.//XXXIX Всероссийская научная конференция по проблемам математики, информатики, физики, химии и методики преподавания естественнонаучных дисциплин. 2003.
3. *Милантьев В.П., Степина С.П.* - Авторезонансное ускорение электронов лазерным гауссовым излучением //Тезисы докладов XXX Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС, февраль, 2003
4. *Милантьев В.П., Степина С.П.* - Авторезонансное ускорение электронов гауссовым пучком //Вопросы атомной науки и техники. 2003. №4. С.40-44.
5. *Милантьев В.П., Степина С.П.* – Авторезонансное ускорение электронов комбинированным гауссовым излучением.// XL Всероссийская научная конференция по проблемам математики, информатики, физики, химии. 2004.
6. *Милантьев В.П., Степина С.П.* - Повышение эффективности авторезонансного ускорения электронов лазерным гауссовым излучением //ЖТФ. 2005. Т.75(9). С.95-100.
7. *Милантьев В.П., Степина С.П.* - Об эффективности авторезонансного ускорения электронов лазерным гауссовым излучением //Тезисы докладов XXXII Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС, 14-18 февраля 2005 г. С.144.

8. Милантьев В.П., Степина С.П. - Усредненная сила давления мощной ВЧ волны, действующая на релятивистскую заряженную частицу в сильном магнитном поле //Тезисы докладов XXXIII Междунар. Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС, 13-17 февраля 2006 г. С.136.
9. Милантьев В.П., Степина С.П. - Релятивистская теория движения электронов в поле мощной ВЧ волны и в сильном магнитном поле //Тезисы докладов 42-ой Всерос. конф. по проблемам математики, информатики, физики и химии, Москва, РУДН, 17-21 апреля 2006 г. С.21.
10. Милантьев В.П., Степина С.П. - Усредненная сила давления мощной ВЧ волны, действующая на релятивистскую заряженную частицу в сильном магнитном поле //Прикладная физика. 2006. № 6. С. 90-97.
11. Милантьев В.П., Степина С.П. - Ускорение электронов сфокусированным лазерным излучением в режиме циклотронного авторезонанса //Тезисы докладов XXXVI Междунар. Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС, 9-13 февраля 2009 г. С133.
12. Милантьев В.П., Степина С.П. - Релятивистская теория движения электронов в поле гауссова лазерного излучения в сильном магнитном поле //Тезисы докладов XLV Всерос. конф. по проблемам матем., информатики, физики и химии. 20-24 апреля, 2009 г. С.107-108.

## **АННОТАЦИЯ**

**Степина Светлана Петровна**

### **Авторезонансный и пондеромоторный механизмы ускорения заряженных частиц лазерным излучением**

Проведено исследование ускорения электронов лазерным гауссовым излучением низшей и первой мод в режиме авторезонанса. Показано, что начальное условие циклотронного резонанса частицы с волной с достаточной точностью сохраняется на интервале ускорения. Показано, что при авторезонансном ускорении в гауссовом пучке низшей моды образуется трубчатый пучок ультрарелятивистских электронов. Найдены условия, при которых происходит авторезонансное ускорение электронов с высокой эффективностью. Получено общее выражение для релятивистской пондеромоторной силы.

## **ABSTRACT**

**Stepina Svetlana Petrovna**

### **Autoresonant and ponderomotive mechanisms of acceleration of charged particles by laser radiation**

Study of acceleration of electrons by laser Gaussian radiation of lowest and first modes is performed. It is shown that the initial cyclotron resonance condition is conserved with the reasonable accuracy in the region of acceleration. It is shown that during autoresonant acceleration by Gaussian Beam of the lowest mode the ring beam of ultrarelativistic electrons is formed. The conditions are found which allow effective autoresonant acceleration of electrons. General formula for the relativistic ponderomotive force is obtained.

18

Подписано в печать 05.11.09. Формат 60x84/16.  
Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 0,75. Заказ 1126

Типография Издательства РУДН  
117923, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д.3