

5/8-06.

Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՏԻԿԱՅԻ ԻՆՏԻՏՈՒՏ

Քաղաքայան Դավիթ Քաղաքարի

ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՓՆՁԵՐՈՎ ԲԵՌՆԱԿՈՐԿԱԾ ԷԼԵԿՏՐՈՂԻԱՄԻԿԱԿԱՆ  
ՀԱՄԱԿԱՐՁԵՐԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐ

Ա.04.20-«Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և  
արագացուցչային տեխնիկա» և Ա.04.03-«Ռադիոֆիզիկա»

մասնագիտություններով

ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների  
թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂԱԳԻՐ

Երևան -2006

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.И. Алиханяна

Калантарян Давид Калантарович

ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ В СИСТЕМАХ, ЗАГРУЖЕННЫХ  
ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальностям: 01.04.20—“Физика пучков  
заряженных частиц и ускорительная техника”,  
01.04.03-“Радиофизика”.

Ереван-2006

**Ереванский Физический  
Институт  
научно-техническая  
библиотека**

## Общая характеристика работы

Ատենախոսության թեման հաստատված է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական ղեկավարներ - ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր, պրոֆեսոր Է.Ռ. Գազազյան, ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր Վ.Մ. Ցականով

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր Ս.Գ. Հովհաննիսյան ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր Ռ.Օ. Ավագյան

Առաջատար կազմակերպություն ՀՀ ԳԱԱ ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է հունիսի 6-ին 2006 թ. ժամը 14:00-ին Երֆի-ում գործող ԲՈՀ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում (375036, Երևան, Ալիխանյան Եղբայրների փող. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է մայիսի 5-ին 2006 թ.

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար, ֆիզ. մաթ. գիտությունների թեկնածու Վ.Մ. Սահարյան Ա.Բ. Սահարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор Э.Д. Газазян доктор физико-математических наук В.М. Цаканов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук С.Г. Оганесян доктор физико-математических наук Р.О. Авакян

Ведущая организация: Институт Физических Исследований НАН РА

Защита состоится 06 июня 2006 г. в 14:00 ч. на заседании специализированного совета ВАК 024, действующего при Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна, (375036, ул. Братьев Алиханян 2, г. Ереван )

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института им. А.И. Алиханяна.

Автореферат разослан 05 мая 2006 г.

Ученый секретарь спец. совета, к.ф.м.н. Վ.Մ. Սահարյան А.Т. Маргарян

## Актуальность исследования

Генерация электромагнитного излучения с высокой яркостью в широком диапазоне длин волн от ультрафиолета до жесткого рентгена является одним из актуальных направлений современного развития ускорительной физики и техники. В последние десять лет новый импульс получили в мире работы по генерации когерентного излучения с помощью самоиндуцируемого лазера на свободных электронах (САСЭ) [1,2] и разработке источников синхротронного излучения (СИ) третьего поколения на промежуточные энергии [3,4].

Учитывая жесткие требования на качество электронного пучка в таких ускорителях (эмиттанс, энергетический разброс, стабильность) в режиме генерации излучения, особую актуальность приобретают вопросы более глубокого исследования динамики электронного пучка при взаимодействии с плоской электромагнитной волной в случае САСЭ и исследования динамики и стабильности электронного пучка в накопителях электронов для генерации СИ с точки зрения развития неустойчивостей.

Целью диссертационной работы является исследование некоторых аспектов динамики электронного пучка при взаимодействии с плоской электромагнитной волной и исследование вопросов устойчивости электронного пучка в накопителях электронов с учетом эффектов пространственного заряда. В диссертации рассмотрены следующие основные проблемы:

- Исследована задача динамики заряженной частицы (электрона) в поле монохроматической электромагнитной волны (лазера) в вакууме в общем случае поляризации волны и произвольных начальных параметров частицы (координата, импульс).
- Исследована и предложена схема развертки электронного пучка в поле плоской линейно-поляризованной волны, для измерения продольного распределения частиц в сгустке.
- Исследована поперечная и продольная динамика и стабильность электронного пучка в накопителях электронов при наличии связи между колебаниями, обусловленной пространственным зарядом.

- Исследована динамика электронного пучка в 6-мерном фазовом объеме и разработана методика анализа устойчивости на основе матричного подхода.

### Научная новизна.

Вопросы динамики заряженной частицы в поле плоской электромагнитной волны были рассмотрены и решены для ряда частных случаев поляризации электромагнитной волны и начальных координаты и импульса частицы (см. напр. [5,6]). В диссертационной работе исследован общий случай взаимодействия заряженной частицы с плоской электромагнитной волной. Получены аналитические выражения для траектории частицы, которые в частном случае совпадают с известными результатами. Разработанный подход позволяет исследовать динамику электронного пучка с произвольным начальным распределением частиц в сгустке по координатам и импульсам, и, соответственно, исследовать вопросы микро-банчировки электронного пучка в поле лазера, что является основным механизмом при генерации СЛСЭ.

На основе полученных результатов исследована динамика электронного пучка в поле плоской линейно-поляризованной волны и волны с круговой поляризацией и предложен новый метод развертки электронного пучка в плоскости поперечного сечения. Поперечная развертка сгустка при взаимодействии с полем лазера позволяет определить продольное распределение частиц для ультракоротких сгустков.

В диссертационной работе получили дальнейшее развитие вопросы связанного движения частиц в накопителях электронов с учетом пространственного заряда. Получен ряд новых результатов как по методике исследования этих эффектов, так и по эволюции наклона электронного пучка в накопителе и устойчивости пучка вблизи разностного резонанса горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний. Исследованы синхро-бетатронные колебания частиц пучка при наличии пространственного заряда и получены выражения для деформации сепаратрисы синхротронных колебаний.

На основе канонических уравнений движения частиц в накопителе, применен новый подход для анализа динамики частиц в 6-мерном фазовом объеме. Получены аналитические выражения для матриц перехода отдельных элементов ускорителя с учетом эффектов пространственного заряда и исследованы вопросы уменьшения времени жизни пучка вблизи нелинейных резонансов.

### Практическое значение.

Полученные результаты по взаимодействию электронных пучков с плоской электромагнитной волной позволят глубже исследовать процесс банчировки пучка в поле лазера, что очень важно для проектируемых в настоящее время источников СЛСЭ. Прямой практический выход полученных в диссертации результатов – новый метод измерения продольного распределения ультракоротких сгустков.

Работы по динамике пучка в источниках синхротронного излучения непосредственно связаны с обеспечением стабильной работы ускорителя, что очень важно при проектировании источников СИ нового поколения. Полученные в этой части результаты непосредственно применены для анализа устойчивости пучка в проекте источника синхротронного излучения CANDLE [7]. Проведена практическая оценка возмущения сепаратрисы синхротронных колебаний, допустимые отклонения частот бетатронных колебаний для предотвращения резонансного разбухания пучка и уменьшения времени жизни пучка в накопителе.

### Основные положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Получено аналитическое выражение для траектории частицы в поле плоской электромагнитной волны в общем случае поляризации волны и начальных условий для координаты и импульса частицы.
2. Предложен и исследован новый метод измерения продольного распределения частиц в сгустке на основе поперечной развертки сгустка в поле плоской электромагнитной волны линейной или круговой поляризации.
3. Получены выражения для эволюции наклона пучка, возмущения сепаратрисы синхротронных колебаний и условия стабильности пучка вблизи разностного резонанса в накопителях электронов с учетом эффектов пространственного заряда.
4. Получено аналитическое выражение для времени жизни пучка в накопителе электронов с учетом эффектов пространственного заряда.

- Исследована динамика электронного пучка в 6-мерном фазовом объеме и получены аналитические выражения для матриц перехода при учете пространственного заряда.

### Апробация работы.

Основные результаты работы обсуждались на семинарах, проводимых в CANDLE, и на заседаниях Научного совета Радиофизического факультета ЕГУ. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях и рабочих совещаниях:

- "Физика-2003", Третье национальное научное собрание молодых физиков, ЕГУ, Ереван, Армения, 4-8 Ноябрь, 2003.
- European Particle Accelerator Conference EPAC'04, Lucerne, Switzerland, 5-9 July, 2004.
- NATO Advanced Research Workshop "Advanced Photon Sources and Their Application", Nor Amberd, Armenia, Aug 29 –Sept 02, 2004.
- Particle Accelerator Conference, PAC'05, Knoxville, Tennessee, USA, 16-20 May, 2005.

### Публикации

По материалам работы опубликовано 12 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Личное участие автора в выполнении работы выразилось в проведении основной части исследований и численного моделирования для конкретных установок. Автором рассмотрены все вошедшие в диссертацию аналитические исследования по взаимодействию электронного пучка с плоской электромагнитной волной, исследования по динамике пучка в накопителях электронов. В части нового метода развертки пучка автором проведены все теоретические выкладки, численное моделирование и оптимизация параметров предлагаемой установки для измерения продольного распределения частиц ультракоротких сгустков.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 130 страницы, в том числе 49 рисунков, 2 таблиц и 71 литературных ссылок. К диссертации прилагается дополнение, в котором приведены аналитические выражения для координат заряженной частицы движущейся в среде под воздействием лазерного поля. В дополнении также приведены элементы 6x6 матриц перехода для всех компонент ускорителя.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обсуждаются основные задачи, поставленные и решенные в данной работе. Приведены актуальность темы, научная новизна проделанной работы, цель работы и краткое описание способов решения поставленных задач. Также приведено краткое описание четырех глав, включая основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе исследовано взаимодействие заряженной частицы с плоской, эллиптически поляризованной электромагнитной волной при произвольных начальных параметрах (координата, импульс) частицы.

Приведены уравнения движения заряженной частицы при наличии внешнего электромагнитного поля. Для эллиптически поляризованного поля получены общие выражения, которые в дальнейшем используются в диссертации. При получении решений во всех уравнениях движения производные по времени  $t$  заменяются производными по  $\eta$ , где  $\eta = \omega t - kx$  определяет фазу волны. Далее производная по времени записывается в виде

$$\frac{d}{dt} = \omega \frac{\sqrt{m_0^2 c^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} - p_x}{\sqrt{m_0^2 c^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}} \cdot \frac{d}{d\eta} \quad (1)$$

Используя это выражение, получены решения для компонент импульсов частицы  $p_y$  и  $p_z$ , которые имеют вид

$$p_y = p_{y0} + \frac{eE_{y0}}{\omega} [\sin(\eta + \varphi_{y0}) - \sin(-kx_0 + \varphi_{y0})]$$

$$p_z = p_{z0} + \frac{eE_{z0}}{\omega} (\sin(\eta + \varphi_{z0}) - \sin(-kx_0 + \varphi_{z0}))$$
(2)

Для получения решения для импульса  $p_x$  показана справедливость соотношения

$$\frac{dp_x}{dt} = \frac{d\sqrt{m_0^2 c^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}}{dt},$$
(3)

откуда следует, что

$$\sqrt{m_0^2 c^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} - p_x = \text{const} \equiv \frac{1}{2B}$$
(4)

и выводится интеграл движения в виде

$$\frac{E}{c} - p_x = \frac{E_0}{c} - p_{x0} = \text{inv},$$
(5)

где  $E$  - полная энергия частицы в момент  $t$ , а  $E_0$  - энергия частицы в момент времени  $t=0$ . Инвариант (5) показывает, что при взаимодействии заряженной частицы, движущейся в направлении распространения волны, полная энергии частицы и ее продольный импульс  $p_x$  меняются строго пропорционально друг другу. В результате выражение для импульса  $p_x$  принимает вид

$$p_x = p_{x0} + B[(p_y^2 - p_{y0}^2) + (p_z^2 - p_{z0}^2)].$$
(6)

Полученные аналитические решения для координат и импульсов позволяют проследить за траекториями ансамбля частиц в поле плоской эллиптически поляризованой волны. На рис.1 приведен характерный вид траекторий 9 частиц с разбросом по поперечным импульсам в поле волны круговой поляризации.

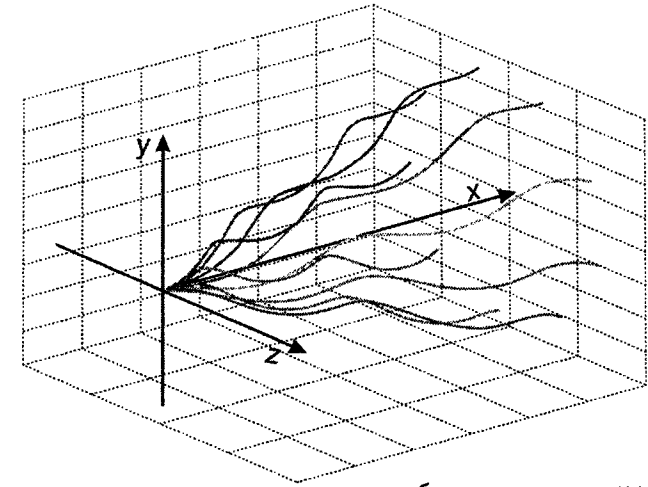


Рис.1. Траектории частиц с начальным разбросом по импульсам в поле электромагнитной волны с круговой поляризацией.

Далее в работе показано, что из полученных общих выражений в частном случае линейно-поляризованной волны результаты сводятся к известному решению [6]. В частном случае для электрона, который в среднем находится в состоянии покоя, результаты сводятся к траектории движения электрона в виде восьмерки [5]. Далее в этой главе детально исследован случай волны с круговой поляризацией. Показано, что если импульс частицы в некоторый момент времени параллелен магнитному полю, а модуль равен  $|\vec{p}| = \frac{eE_0}{\omega}$ , то направление импульса всегда

останется параллельным магнитному полю, а его модуль будет сохраняться. В этом случае магнитное поле не действует на частицу, так как оно параллельно скорости частицы, а электрическое поле придает только центростремительное ускорение, которое меняет лишь направление скорости частицы (но не модуль).

Рассмотрен также случай взаимодействия частицы с волной в однородной диэлектрической среде. Получены явные выражения импульсов, тогда как выражения для координат представляются в интегральной форме. Приведены несколько примеров траекторий в виде рисунков. Приведены аналитические выражения для квазивакуума  $(\epsilon\mu - 1) \ll 1$ . Показано, что в случае среды также существует интеграл движения, который является обобщением интеграла движения в вакууме и записывается в виде

$$\sqrt{m_0^2 c^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} - \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} p_x = const \quad (7)$$

Во второй главе исследована развертка частиц в лазерном поле с круговой и линейной поляризацией. Показано, что с помощью лазера  $CO_2$  можно получить развертку фемтосекундного электронного сгустка в виде дуги окружности с радиусом порядка нескольких сантиметров. На основе полученных результатов предложен новый метод измерения продольного распределения частиц ультракоротких сгустков. Общая схема предлагаемой установки представлена на рис. 3.

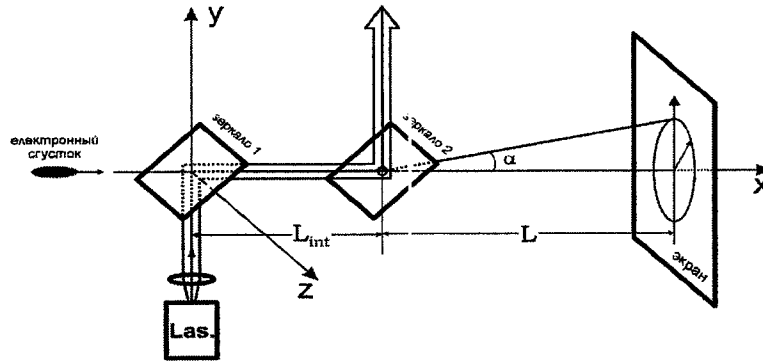


Рис.3 Устройство для развертки сгустка

Траектории частиц начального сгустка в поле электромагнитной волны исследованы как для случая волны с линейной поляризацией, так и для случая волны с круговой поляризацией. Найдены условия на параметры установки (энергия и длительность сгустка, амплитуда поля и частота лазера), при которых развертка позволяет однозначно связать положение частиц на экране с начальным продольным положением частицы в сгустке. Получено аналитическое выражение для коэффициента преобразования длины сгустка в радиус окружности образа на экране после взаимодействия пучка с лазерным полем. В частности, коэффициент преобразования для линейно-поляризованной волны имеет вид

$$L_{scr} = \frac{1}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \frac{eE_0 L l_b}{m_0 c^2 \beta} \left| \sin \frac{\eta_1}{2} \cdot \sin \left( \frac{\eta_1}{2} + \varphi_s \right) \right| \quad (8)$$

где  $E_0$  - напряженность поля,  $m_0$  - масса покоя,  $\varphi_s$  - фаза поля в момент влета сгустка в структуру, а  $\eta_1$  - пространственно-временной интервал между двумя зеркалами:  $\eta_1 = \omega \tau_{лем} - kL_{int}$ .

На рис. 4 приведена поперечная развертка электронного пучка после взаимодействия с  $CO_2$  лазером.

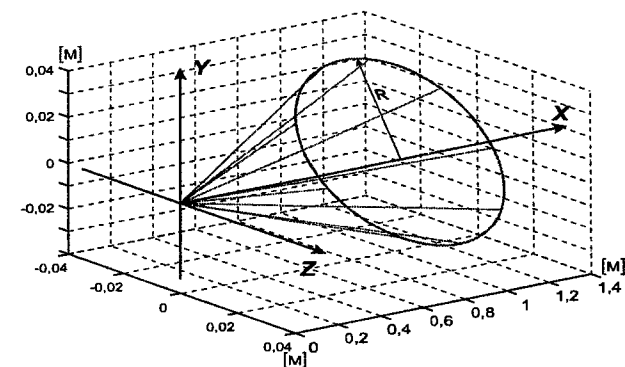


Рис.4. Развертка электронного пучка.

В работе найдена связь между распределением частиц на экране после развертки и начальным распределением частиц в сгустке, что позволяет восстановить начальное продольное распределение частиц на основе поперечного профиля сгустка на экране. Связь этих распределений задается соотношением

$$q_0(\xi) = q_2(y_2(\xi)) \left| \frac{dy_2(\xi)}{d\xi} \right|, \quad (9)$$

где  $q_0(\xi)$  начальное продольное распределение частиц в сгустке, а  $q_2(y_2)$  конечное распределение на экране.

Произведено численное моделирование для случая гауссовского сгустка и проведен сравнительный анализ для схем с линейно-поляризованной волной и волной с круговой поляризацией.

Третья глава посвящена некоррелированным (отдельно поперечные и отдельно продольные) эффектам пространственного заряда. Получены аналитические выражения матриц переходов для элементов ускорителей. Разработан метод определения угла поворота пучка в поперечной плоскости. Получено выражение для изменения сепаратрисы. Результаты исследований применены для численной оценки этих

эффектов в накопителе электронов проекта CANDLE. Перечислим задачи, рассмотренные в этой главе.

С использованием разработанного математического аппарата описана связь между степенями свободы частиц в сгустке, обусловленная влиянием пространственного заряда [8].

Получена система дифференциальных уравнений для поперечных координат, где независимая переменная – координата вдоль равновесной орбиты  $s$ . В этих уравнениях учтены также собственные электромагнитные поля сгустка. Эти уравнения получены из лагранжиана для заряженной частицы, полученного с помощью принципа Мопертюи [9]. В качестве независимой переменной использована координата вдоль равновесной орбиты  $s$ .

Решая систему дифференциальных уравнений для поперечных координат, были найдены двумерные  $4 \times 4$  матрицы передач для элементов ускорителя. Разработана методика определения угла поворота сгустка. Величина угла наклона эллипса поперечного сечения пучка в точке  $s$  вдоль орбиты определяется из характеристических параметров эллипса по формуле

$$\tan 2\Theta = \frac{2E_x G_x}{E_x^2 - E_y^2}, \quad (10)$$

где характеристические параметры эллипса  $E_x, E_y, G_x$  в свою очередь определяются вектором состояния частицы в заданной точке орбиты  $z_i = [x, x', y, y']_i, (i=1,2,3,4)$ .

На рис.5 графически показана зависимость угла поворота поперечного сечения сгустка вдоль одного периода магнитной системы накопителя CANDLE при разрешимой максимальной связи колебаний в 1%.

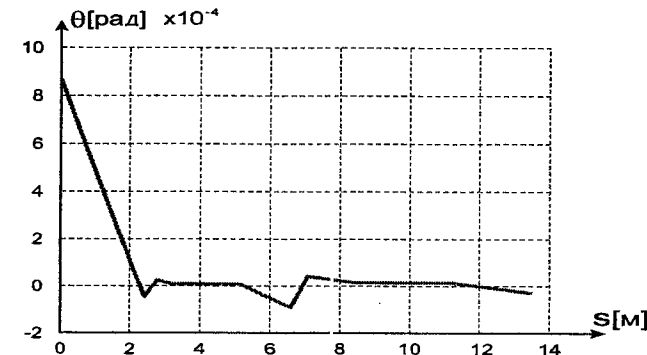


Рис.5. Зависимость угла поворота пучка от положения  $s$  в накопителе электронов CANDLE.

Далее в этой главе рассмотрен важный вопрос биения бетатронных колебаний в ускорителе при наличии пространственного заряда. Этот эффект обусловлен дефокусирующим воздействием сил пространственного заряда на поперечные колебания и может привести к раскачке нелинейных резонансов. На рис.6 приведено возмущение вертикальной бетатронной функции в накопителе CANDLE при учете сил пространственного заряда.

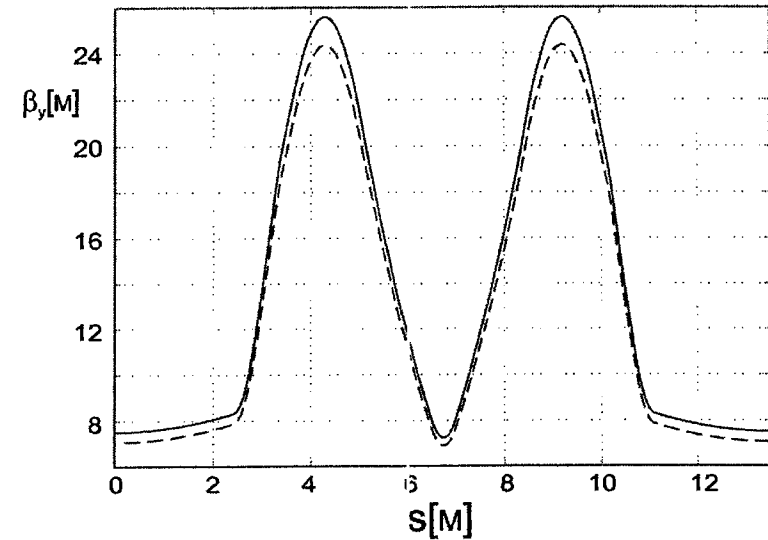


Рис. 6 Возмущение вертикальной бетатронной функции в накопителе CANDLE при учете сил пространственного заряда.

Исследована поперечная динамика пучка в накопителе CANDLE когда разница между числом бетатронных колебаний в горизонтальном и вертикальном направлениях равняется целому числу:  $\mu_x - \mu_y = N$ .

Найдены оценки для максимальной плотности частиц в сгустке, при которой эффект пространственного заряда доминирует при раскачке разностного резонанса.

Далее исследованы эффекты, связанные с синхротронными колебаниями частиц. Показано, что за счет эффектов пространственного заряда происходит деформация сепаратрисы синхротронных колебаний: Получено ограничение на максимальную плотность частиц в сгустке, при котором частота синхротронных колебаний приближается к его резонансному значению и сепаратриса синхротронных колебаний становится неустойчивой.

В четвертой главе рассмотрены поперечные и продольные связанные колебания. Для ряда случаев получены матрицы переходов для элементов ускорителя. В конце главы даны результаты аналитического выражения сокращения продолжительности жизни пучка в накопителе электронов в зависимости от пространственного заряда.

Исследована связь между горизонтальными бетатронными колебаниями и продольными синхротронными колебаниями из-за изогнутости магнитов. Пространственный заряд усиливает эту связь. По причине указанной связи между бетатронными и синхротронными колебаниями возникают ограничения на количество частиц в сгустке.

Получены уравнения для полностью скоррелированного движения. В этих уравнениях учтено также влияние пространственного заряда. Для линейных элементов получены шесть дифференциальных уравнений первой степени. Далее с их помощью получено одно дифференциальное уравнение 6-ой степени, которое решено с помощью характеристического уравнения. Само характеристическое алгебраическое уравнение решено с помощью формулы Кардано.

С помощью полученных результатов разработан метод построения матрицы перехода. Вид матрицы перехода для общего случая, из которого можно получить  $6 \times 6$  матрицы перехода для всех элементов ускорителя, приведен в приложении к диссертации.

Показано, что из-за пространственного заряда происходит модуляция энергетического разброса сгустка по бетатронным колебаниям, то есть энергетический разброс сгустка зависит от координаты сгустка в ускорителе. Для среднеквадратичного энергетического разброса получено следующее выражение

$$\langle \Delta E^2 \rangle = \frac{K\varepsilon_x^2 \beta_x^2(s)}{48a^2} + \frac{K\varepsilon_y^2 \beta_y^2(s)}{48b^2}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$ , соответственно, эмиттансы в  $x$  и  $y$  направлениях,  $\beta$  - бетатронная функция, а  $a$  и  $b$  полуоси эллипса поперечного сечения сгустка

Исследован эффект сокращения времени жизни пучка в накопителе из-за пространственного заряда. На рис. 6 приведен график зависимости сокращения времени жизни от плотности частиц в сгустке для параметров накопителя электронов CANDLE.

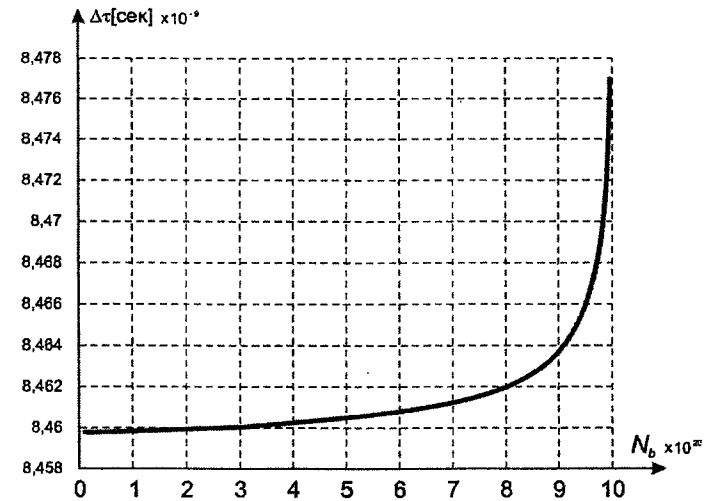


Рис.7. Зависимость сокращения времени жизни пучка в накопителе CANDLE от плотности частиц в сгустке.

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

1. Получено аналитическое выражение для траектории частицы в поле плоской электромагнитной волны в общем случае поляризации волны и начальных условий координаты и импульса частицы.
2. Предложен и исследован новый метод измерения продольного распределения частиц на основе поперечной развертки сгустка в поле плоской электромагнитной волны линейной и круговой поляризации.
3. Получены выражения для эволюции наклона пучка, возмущения сепаратрисы синхротронных колебаний и условия стабильности пучка вблизи разностного резонанса в накопителях электронов с учетом эффектов пространственного заряда.
4. Получено аналитическое выражение для сокращения времени жизни пучка в накопителях электронов с учетом пространственного заряда.

- Исследована динамика электронного пучка в 6-мерном фазовом объеме и получены аналитические выражения для матриц перехода при учете пространственного заряда.

#### Цитируемая литература

- LCLS CDR, SLAC Report No. SLAC-R-593, 2002.
- TESLA TDR, DESY Report No DESY-2001-011, 2001.
- J. Corbett, T. Rabedeau, Synch. Rad. News 12, 22, 1999.
- V. Tsakanov et al, Rev. Sci. Instrum. 73:1411-1413, 2002.
- Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, Теория поля, изд. Наука, М. 1968.
- Wideman, Lectures Notes on Topics in Accelerator Physics, Springer-Verlag, Berlin 1999.
- CANDLE- Conceptual Design Report, Yerevan, 2002
- I. Borchardt, et al, "Calculation of Beam Envelopes in Storage Rings and Transport Systems in Presence of Transverse Space Charge Effects and Coupling", DESY 87-161, 1987.
- Г. БРУК "Циклические ускорители заряженных частиц", Атом издат. М. 1970.

#### Список опубликованных работ

- Д.К. Калантарян, Ю.Л. Мартirosян, "Связанная неустойчивость электронов в сильноточных накопителях". Изв. НАН Армении, Физика, т.39, №5, с.293-300 (2004).
- Д.К. Калантарян, Ю.Л. Мартirosян, "Влияние пространственного заряда на продольную динамику пучка в накопительном кольце CANDLE". Изв. НАН Армении, Физика, т.40, №6, с.412-415 (2005).

- Т.А. Арутюнян, Д.К. Калантарян, "Электромагнитные колебания в тороидальном резонаторе". Изв. НАН Армении, Физика, т.40, №4, с.244-247 (2005).
- D. Kalantaryan and Y. Martirosyan, "Transfer Matrices for the Coupled Space Charge Dominated Six-Dimensional Particle Motion". Proc. of EPAC'04, pp.1135-1137.
- Y. Martirosyan, M. Ivanyan and D. Kalantaryan "Nonlinear Beam Dynamics Study with MATLAB". Proc. of EPAC'04, pp.1813-1815.
- V. Tsakanov, M. Aghasyan, G. Amatuni, V. Avagyan, A. Grigoryan, B. Grigoryan, D. Kalantaryan, V. Khachatryan, A. Vardanyan, M. Ivanyan, V. Jalalyan, E. Laziev, Y. Martirosyan, R. Mikaelyan, S. Minasyan, K. Sanosyan, S. Tatikyan, S. Tunyan, "Status of 3 GeV CANDLE Synchrotron Lights Facility Project". Proc. of EPAC'04, pp.2254-2256.
- D.K. Kalantaryan, E.D. Gazazyan, T.A. Harutyunyan and V.G. Kocharyan, "Toroidal Cavity Loaded with an Electron Beam". Proc. of EPAC'04, pp.2463-2465.
- E.D. Gazazyan, K.A. Ispirian, M.K. Ispirian, D.K. Kalantaryan and D.A. Zakaryan, "Femtosecond Deflection of Electron Beams in Laser Fields and Femtosecond Oscilloscopes". Advanced Radiation Sources and Application, NATO Science Series II, Vol. 199. Edited by H. Wiedemann, Springer, 2005, pp. 313-318.
- Д.К. Калантарян, "Влияние пространственного заряда на энергетический разброс электронов в сгустке". Изв. НАН Армении, Физика, т.40, №2, с.115-120 (2005).
- E.D. Gazazyan, K.A. Ispirian, E.M. Laziev, A.T. Margarian and D.K. Kalantaryan, "Preliminary Design of a Femtosecond oscilloscope". PAC'05, pp. 4054-4056.
- E.D. Gazazyan, K.A. Ispirian, M.K. Ispiryan, D.K. Kalantaryan and D.A. Zakaryan, "Transversal Deflection of Electrons Moving in Parallel with Linearly Polarized Laser Beam and Its Application". PAC'05, pp. 2944-2946.
- Э.Д. Газазян, Д.К. Калантарян, М.А. Ходжоян, "Развертка ультракороткого электронного сгустка в поле монохроматической волны". Изв. НАН Армении, Физика, т.41, №3, с.170-177 (2006).

## Ամփոփագիր

Ներկայումս հնարավոր է ստանալ մի քանի հարյուր ֆեմտովարկյան տևողությամբ մեծ քանակությամբ էլեկտրոններ պարունակող թանձրուկներ: Այսպիսի թանձրուկներում երկարության և նրանցում մասնիկների բաշխվածության չափումը կարևորվում է FEL-երում, գծային քոլայդերներում, նոր արագացման մեթոդների մշակման և գիտության ու տեխնիկայի շատ այլ բնագավառներում: Մի շարք ժամանակային և հաճախային տիրույթներում կարճ ժամանակային չափումների մեթոդները, որոնցում օգտագործում են  $P <$  դաշտեր կամ տարբեր տիպի կոհերենտ և ոչ կոհերենտ ճառագայթումներ, կիրառելի են մինչև մի քանի հարյուր ֆեմտովարկյանների տիրույթը: Արդեն մշակված մեթոդները ունեն տեսական սահման՝ մի քանի տասնյակ ֆեմտովարկյան, որից ավելի կարճ թանձրուկների վերլուծման համար անհրաժեշտ է նոր մոտեցում: Սրանով է հիմնավորվում ատենախոսության մեջ դիտարկված գերկարճ թանձրուկների վերծանման եղանակի ակտուալությունը: Մեթոդը հիմնված է լազերի դաշտում մասնիկների լայնական շեղման էֆեկտի վրա: Քանակական հաշվարկներ կատարելու համար օգտագործվել են մասնիկի հետագծի համար ատենախոսության մեջ ստացված արտահայտությունները: Ատենախոսության մեջ ստացվել են նաև մասնիկի շարժման հետագծերը միջավայրում լազերի դաշտի ազդեցության դեպքում: Ատենախոսության մեջ ստացված արդյունքները կարելի է օգտագործել էլեկտրոն-լազերային ալիք փոխազդեցությամբ տեղի ունեցող երևույթները ավելի խորությամբ ուսումնասիրելու համար: Նկարագրված փոքր չափսեր ունեցող և մեծ քանակությամբ էլեկտրոններ պարունակող թանձրուկներում մեծ են դառնում թանձրուկի սեփական լիցքով պայմանավորված էլեկտրամագնիսական դաշտերը: Դրանք կարող են էապես ազդել փնջի դինամիկայի վրա արագացուցիչներում: Ատենախոսության մեջ ուսումնասիրվել է այդ ազդեցությունը: Ստացվել են արտահայտություններ տարածական լիցքի պատճառով փնջի լայնական կտրվածքի հարթության մեջ պտույտների համար: Մշակված է տարածական լիցքի պատճառով աղավաղված սեպարատրիսան գտնելու եղանակ: Սինքրաբետատրոնային կապված տատանումների համար ստացվել են արագացուցիչ բոլոր էլեմենտների համար  $6 \times 6$  փոխանցման մատրիցների բոլոր էլեմենտների անալիտիկական արտահայտությունները: Ստացված ընդհանուր արտահայտությունները օգտագործվել են CANDLE-ի կուտակիչ օղակի համար թվային արդյունքներ ստանալու համար:

## SUMMARY

In the present dissertation the questions concerning dynamics of ultra-short bunches are studied. Motion of charged particles in plain monochromatic field, which describes the laser wave with great accuracy, is examined. There have been obtained analytical expressions for particle trajectory under laser field influence in homogenous medium. The opportunity to research on short bunches with the help of laser field has been examined. A method to analyze very short (up to femtosecond duration) bunches has been suggested.

The existing methods allow to examine bunches with duration up to several tens of femtoseconds. The method will make possible to examine and to analyze bunches with a duration of a femtosecond and shorter. In such bunches, the electromagnetic fields that are conditioned by self space charge are rather big and can make significant modifications in bunch dynamics.

The beam dynamics in storage rings taking into account the contribution of space charge is studied. There have been obtained expressions for beam tilted angle variation caused by space charge, for beta-tuning, for distortion of synchrotron oscillations separatrix. There has been examined synchro- betatron fully coupled motion; for such motion there have been obtained six canonical equations for three coordinates and their canonical impulses.  $6 \times 6$  transfer matrixes taking into consideration space charge have been obtained by solving these equations. The expression for modulation of r.m.s. energy spread by beta function has also been derived by using these equations and matrixes. The decrease of beam lifetime caused by space charge has been considered as well.