

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Թումանյան Ռաֆաել Վոլոդյայի

ԲԱՐՁՐ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐԻ ԼԻՑԵՎՈՐՎԱԾ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ  
ԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ԵՎ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ՈՐՈՇ ՀԱՐՑԵՐ

Ա.04.20 – «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա  
և արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի  
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2003

---

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Туманян Рафаел Володязич

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ И УПОРЯДОЧЕНИЯ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01-04-20 «Физика пучков  
заряженных частиц и ускорительная техника»

ЕРЕВАН-2003

**Общая характеристика работы**

Ատենախոսության թեման հաստատված է Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում գիտական ղեկավար - ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածու Լ. Ա. Չևորգյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտոր Է. Ղ. Գազարյան - ԵրՖԻ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածու Բ. Վ. Խաչատրյան - ԵՊՀ

Առաջատար կազմակերպություն ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտ, Երևան

Պաշտպանությունը կայանալու է 27 հունվարի 2004 ժամը 14/00 -ին ԲՈԿ-ի 024 մասնագիտական խորհրդում, որը գործում է Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում (Երևան-36, Ալիխանյան Եղբայրներ փող. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵրՖԻ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 27 դեկտեմբերի 2003թ.

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար ֆ.մ.գ.թ. Վ.Մ. Ա. Թ. Մարգարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте. Научный руководитель - кандидат физико-математических наук, Л. А. Геворгян

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Э.Д. Газазян - ЕрФИ кандидат физико-математических наук Б.В. Хачатрян - ЕГУ

Ведущая организация : Институт прикладных проблем физики, НАН АР

Защита состоится 27 января 2004 г. в 14.00 часов на заседании специализированного совета ВАК-а 024, действующего в Ереванском физическом институте (Ереван-36, ул. Братьев Аликсаян 2)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ.

Автореферат разослан 27 декабря 2003г.

Ученый секретарь спец. совета к.ф.-м.н. Վ.Մ. Ա. Թ. Մարգարյան

**Актуальность темы.** Исследования динамики и упорядочения заряженных частиц высоких энергий вошли в последние годы в новый этап развития, связанный с получением и использованием сверхплотных сгустков релятивистских заряженных частиц в сильных полях, как для экспериментальных исследований в области физики элементарных частиц, так и для прикладных целей. Особый интерес в настоящее время проявляется к лазерам на свободных электронах (ЛСЭ) как к интенсивным и перестраиваемым источникам для исследований в медицине, биологии и др. За последние два десятилетия особенно ощутимые теоретические, экспериментальные и прикладные результаты получены в длинноволновых (больше 0.01мм) и коротковолновых (инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом) диапазонах. Теоретические исследования в этой области в основном ограничивались линейным приближением, пренебрегая различными нелинейными явлениями. Однако, ондуляторные поля и плотности банчей, используемые для обеспечения проектируемых мощностей и длин волн (рентгеновский диапазон), сделали актуальным в последние годы исследования различных нелинейных явлений в динамике и упорядочении банчей ЛСЭ. В их числе нелинейности движения частиц в ондуляторе и в авторезонансном лазере, а также влияние собственных полей банча на динамику частиц.

Интересен также вопрос динамики и упорядочения частиц сгустка из-за обратного влияния волны. Такое воздействие может быть использовано как для охлаждения пучков, так и для понимания процессов усиления в ЛСЭ. В настоящее время отсутствуют эффективные методы охлаждения пучков линейных ускорителей и тяжелых релятивистских частиц. Нахождение метода охлаждения с малым временем охлаждения позволит увеличить время жизни пучка на орбите, светимость ускорителя и уменьшить размеры сгустков.

Большой интерес в последнее время вызывают исследования динамики и упорядочения частиц сгустка в собственных полях сгустка. Возможность получения экзотического состояния материи - упорядоченных и кристаллических сгустков, открывает новые пути как в лазерной технике, так и в других областях.

**Целью диссертационной работы является**

1. Развитие теории ондуляторного излучения при наклонном пролете частицы.
2. Теоретическое исследование динамики и упорядочения заряженных частиц в разных типах ЛСЭ.
3. Изучение нелинейных явлений в ЛСЭ с учетом упорядочения частиц в сгустке как во внешних, так и в собственных полях сгустка.
4. Исследование возможности эффективного охлаждения пучка заряженных частиц вынужденным излучением в ЛСЭ.

**Научная новизна работы.** В ходе выполнения работы получены: --аналитическое выражение для нелинейных колебаний заряженных частиц в спиральном ондуляторе при произвольном угле влета, --спектрально-угловые характеристики интенсивности ондуляторного излучения при наклонном пролете и для пучка с малой угловой расходимостью,

--корреляционные функции банчей заряженных частиц высоких энергий,  
--одночастичная корреляционная функция релятивистского пучка вблизи циклотронного резонанса,

-- нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее динамику сгустка в поле электромагнитной волны, вблизи циклотронного резонанса методом кинетического уравнения,

--решения этого уравнения:

1. для модулированного сгустка,

2. в случае максимального охлаждения сгустка при равенстве расстройки от циклотронного резонанса со средним поперечным импульсом,

3. при постоянной расстройке много меньшей среднего поперечного импульса сгустка,

--продуктивный метод охлаждения пучков заряженных частиц, названным резонансно- лазерным, применимый на всех типах ускорителей,

--аналитическое выражение для эффективного потенциала заряженной частицы в собственном поле пространственного заряда сгустка с учетом дискретности зарядов при компенсации средней силы внешним полем,

--корреляционные функции в упорядоченном (жидком) состоянии сгустка в классическом и квантовом случаях,

--формфакторы и условия когерентности излучения одномерно-упорядоченных и одномерно-кристаллических сгустков.

#### Научная и практическая ценность.

Исследование свойств плотных сгустков заряженных частиц, их динамики, упорядочения и электромагнитного излучения важны и могут быть использованы

1. При проектировании и оптимизации лазеров на свободных электронах.
2. Для охлаждения пучков заряженных частиц, с целью существенного увеличения его эффективности. Предложенный метод представляет особый интерес для линусов и ускорителей релятивистских тяжелых частиц.
3. При технической реализации нового типа ЛСЭ на основе когерентного излучения упорядоченных и кристаллических сгустков. Предложенный ЛСЭ может стать вполне конкурентоспособным и, даже, существенно превзойти существующие по параметрам, особенно, в рентгеновской области частот.

#### Научные положения выносимые на защиту

1. Корреляционные функции ансамблей с направленным релятивистским движением описывают упорядочение сгустков заряженных частиц.
2. Динамика заряженных частиц в спиральном ондуляторе при наклонном пролете является нелинейной.
3. Наклонность пролета частицы и, следовательно, угловая расходимость сгустка изменяет частотно-угловое распределение интенсивности излучения.
4. Динамика сгустка вблизи циклотронного резонанса со внешней лазерной волной описывается средней скоростью изменения импульса с учетом интеграла движения.

5. Взаимодействие сгусток- волна вблизи циклотронного резонанса изменяет поперечный импульс сгустка и при определенных условиях приводит к его охлаждению.

6. Потенциал частицы сгустка вблизи положения равновесия квадратичен при учете дискретности заряда сгустка и компенсации внутреннего поля внешним.

7. Релятивистский сгусток пространственно упорядочивается при определенных плотностях и температурах.

8. Пространственно-упорядоченный сгусток является перестраиваемым источником лазерного излучения.

Апробация работы Результаты этих работ обоснованы аналитически и получили положительные отзывы международных специалистов. Они доложены на международных научных конференциях (Karlsruhe 1988, Nor-Hamberd 2001, FEL' 2002) и семинарах ЕрФИ.

Публикации Основные результаты изложены в 10 публикациях, в том числе четыре статьи в иностранных и отечественных научных журналах, три доклада на международных научных конференциях и три препринта.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы.

#### Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы по изучению динамики и упорядочения в релятивистских сгустках и сделан обзор работ по тематике диссертации. Изложено краткое содержание работы.

#### Глава 1. Теория упорядочения и корреляций

В данной главе рассмотрена применимость обычной статмеханической теории ансамблей частиц к ансамблям релятивистских заряженных частиц одного знака заряда. Разработан статистико-механический метод описания упорядочения в ансамблях частиц, основанный на расчете корреляционных функций частиц ансамбля.

В 1.1 рассмотрены основы статистико-механического рассмотрения ансамблей  $N$  частиц в объеме  $\Omega$  и с обратной температурой  $\beta = (kT)^{-1}$  в термодинамическом пределе с использованием статсуммы  $Q_N$  и свободной энергии  $F_N$

$$Q_N(\Omega, \beta) = \exp \{-\beta F_N(\Omega, \beta)\}.$$

В 1.2 показано, что в случае релятивистских частиц с направленным движением, гамильтониан частицы  $H_i = c\sqrt{(\vec{P}_i - \frac{e}{c}\vec{A}_i)^2 + m_i^2 c^2} + e\phi_i$  представим в виде суммы кинетической  $E$  и потенциальной  $U$  энергий, что возможно в случае направленного релятивистского движения сгустка, а также при некоторых частных видах векторного потенциала, что даст возможность применить статмеханическую теорию упорядочения к заряженным частицам высокой энергии [7].

**В 1.3** сделан обзор трех основных методов определения корреляционных функций:

1. корреляционной функции  $g(\mathbf{r})$  через двухчастичную

$$n^2 F_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2) = \frac{N!}{(N-2)!} \int d\mathbf{r}^{N-2} d\mathbf{p}^{N-2} \rho_N(\mathbf{r}^N, \mathbf{p}^N) = n^2 \varphi(p_1) \varphi(p_2) g(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|),$$

где  $n$  - плотность частиц, а  $\varphi(p)$  - одночастичная функция распределения по импульсам.

2. Прямой корреляционной функции  $c(\mathbf{r}) = -\beta(V(\mathbf{r}) + K_c^{(v)}(\mathbf{r}))$  через  $v$ -частичные корреляционные потенциалы

$$K_c^{(v)}(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_v) = \frac{\delta_v^* F_c[n(\mathbf{r})]}{\delta n(\mathbf{r}_1) \dots \delta n(\mathbf{r}_v)} \Big|_{n(\mathbf{r}) \rightarrow n}$$

3. Корреляционной функции, как средней от произведения токов  $\langle j_i j_j \rangle_t \equiv \langle j_i(t_1, \mathbf{r}) j_j(t_2, \mathbf{r}) \rangle$ .

**В 1.4** полученные корреляционные функции через флуктуационно-диссипативную теорему  $\varepsilon_{ij}^a(\omega, k) = \frac{i}{2\omega T \varepsilon_0} \langle j_i j_j \rangle_{\omega, k}^0$ , определяют мнимую

часть диэлектрической проницаемости и, следовательно, усиление или затухание электромагнитной волны в данной среде.

**Глава 2. Динамика и упорядочение сгустка в поле спирального ондулятора**

В данной главе рассматривается динамика и упорядочение в сгустках при наличии периодического магнитного поля спирального ондулятора [1], [3-5].

**В 2.1** сделан обзор работ в этой области и обоснована актуальность исследования случая наклонного пролета через ондулятор.

**В 2.2** рассматривается динамика заряженной частицы массы  $m$  и заряда  $(-e)$  в аксиальном поле ондулятора

$$\mathbf{H} = H_m [\hat{i} \cos(nz + \Phi) + \hat{j} \sin(nz + \Phi)],$$

где  $n = 2\pi/l$  - волновое число,  $H_m$ ,  $\Phi$  и  $l$  - соответственно амплитуда, фаза и пространственный период магнитного поля спирального ондулятора,  $\hat{i}$  и  $\hat{j}$  - единичные орты в направлениях, соответственно,  $x$  и  $y$ . Выводятся уравнения движения частицы со скоростью  $\beta = V/c = \sqrt{1 - \gamma^{-2}}$  в единицах скорости света с при произвольном угле влета в ондулятор с начальными условиями

$$\mathbf{V}_0 = c\{(\beta_n - \beta_\perp) \cos \Phi, (\beta_n - \beta_\perp) \sin \Phi, \beta_\parallel\},$$

$$\beta_\parallel = \sqrt{\beta^2 - (\beta_n - \beta_\perp)^2},$$

где  $\beta_n$  - поперечная скорость частицы,  $\beta_\perp = q/\gamma$  - амплитуда поперечных колебаний скорости частицы в ондуляторе, а  $q = eH_m l / 2\pi m c^2$  - параметр ондулятора.

**В 2.3** получена точная траектория в виде эллиптических функций Якоби с параметром  $\mu = 4\beta_\perp \beta_n / \beta$  и аргументом  $u = \Omega t / 2$

$$x(t) = x_0 + c(\beta_n - \beta_\perp) t \cos \Phi + 4c\beta_\perp / \mu \Omega [\sin \Phi (1 - dnu) + \cos \Phi (u - E(u))],$$

$$y(t) = y_0 + c(\beta_n - \beta_\perp) t \sin \Phi - 4c\beta_\perp / \mu \Omega [\cos \Phi (1 - dnu) + \sin \Phi (u - E(u))],$$

$$z(t) = \frac{l}{\pi} am(u),$$

здесь  $\Omega = 2\pi c \beta_\parallel / l$  - частота колебаний частицы в ондуляторе

**В 2.4** на основе этой траектории при малом угле пролета через ондулятор получены аналитические выражения для спектрально-углового распределения интенсивности излучения с частотой  $\omega$  под углом  $\vartheta$  к оси ондулятора при

наклонном пролете частицы ( $\bar{\beta} = \sqrt{\beta^2 - \beta_n^2 - \beta_\perp^2}$ )

$$\frac{dI}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \omega^2}{4\pi^2 c^3} \sum_{p=0}^{\infty} \delta(\omega(1 - \cos \vartheta \bar{\beta} - \beta_n \sin \vartheta \cos \vartheta) - p\Omega) *$$

$$\{J_p^2(\bar{\beta} \sin \vartheta - \beta_\perp \cos \vartheta p/\alpha)^2 + J_p'^2 \beta_\perp^2 + \beta_n^2 (1 - \sin^2 \vartheta \cos^2 \vartheta) - 2\beta_n \cos \vartheta (\bar{\beta} \sin \vartheta - \beta_\perp \cos \vartheta p/\alpha) \cos \vartheta\},$$

где получены дополнительные, по сравнению с обычным случаем, слагаемые, как в дельта-функции, так и рядом с функциями Бесселя с аргументом  $\alpha = \beta_\perp \omega \sin \vartheta / \Omega$ .

Эта же траектория использована для вычисления спектрально-углового распределения интенсивности излучения пучка с малой угловой расходимостью описываемой гауссовской функцией распределения с дисперсией  $\beta_0$ .

рассмотрения в диссертации.

В 3.2 рассмотрена динамика замагниченного сгустка в поле электромагнитной волны с длиной волны  $\lambda$ . На основе интеграла движения  $I = \gamma - p_z$  получено уравнение для усредненного поперечного импульса сгустка ( $m = c = 1$ )

$$\frac{d}{dt} \langle p_{\perp}^2 \rangle = 2 \langle I \dot{\gamma} \rangle,$$

где усреднение производится по функции распределения с учетом внешней электромагнитной волны.

В 3.3 рассмотрено упорядочение в данном случае, используя решение кинетического уравнения вблизи циклотронного резонанса

$$\delta f = \sum g_s(p_{\perp}, p_z) e^{is\varphi},$$

$$g_s = \frac{Q_s}{i(s + \alpha)}; Q_s = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\tau e^{-is\tau} Q(p_z, p_{\perp}, \tau); Q = \frac{e}{\omega_B} \frac{\partial f_0}{\partial P} \left( \bar{E} + \frac{1}{\omega} [\bar{v} [\bar{k} \bar{E}]] \right),$$

где  $\alpha = (kv_z - \omega) / \omega_B$ ,  $\omega_B = eB_0 / \gamma$  - ларморовская частота,  $\tau$  - фаза

интегрирования и использована связь  $\omega \bar{B} = [\bar{k} \bar{E}]$  для поля волны. Такое упорядочение в банчах заряженных частиц высокой энергии связано с наличием детерминированного периодического движения частиц банча во внешнем поле, в данном случае частицы движутся по спиральным траекториям, параметры которой определяются магнитным полем. Используя такую одночастичную корреляционную функцию нетрудно получить нелинейное уравнение для динамики сгустка ( $\xi = eE\omega$ )

$$\frac{d}{dt} \langle p_{\perp}^2 \rangle = -\xi \frac{\pi\omega}{2p_0^2 \langle p_{\perp}^2 \rangle} \Delta_{\square} (1 + \Delta_{\square}) e^{-\Delta_{\square} / \langle p_{\perp}^2 \rangle},$$

$$\Delta_{\square} = 2 \frac{\Omega}{\omega} p_0 - 1; \Omega = \omega_B \gamma.$$

Максимум правой части в случае малости  $\langle p_{\perp}^2 \rangle$  (продольный импульс  $p_0 \approx const$ ) достигается в точке  $\Delta_{\square} = \langle p_{\perp}^2 \rangle$ , и его решением является

$$\langle p_{\perp}^2 \rangle = \left( \langle p_{\perp 0}^2 \rangle^2 - \frac{2\pi^2}{e} \xi^2 \frac{z}{2\lambda p_0^2} \right)^{1/2}.$$

$$\left\langle \frac{dI}{d\omega d\Omega} \right\rangle_{\beta_{\perp}} = \frac{e^2 \omega^2}{4\pi^2 c^3} \sum_{\rho=0}^{\infty} \frac{e^{-\rho^2 / \beta_{\perp}^2 \sin^2 \vartheta}}{\beta_0 \sin \vartheta} \left\{ J_{\rho}^2 \left( \bar{\beta} \sin \vartheta - \beta_{\perp} \frac{P}{\alpha} \cos \vartheta \right)^2 + J_{\rho}^2 \beta_{\perp}^2 - \right. \\ \left. - a_{\rho} - \frac{\beta_0^2}{2} + \frac{a_{\rho}^2}{\sin^2 \vartheta} - 2 \frac{\cos \vartheta}{\sin \vartheta} a_{\rho} \left( \bar{\beta} \sin \vartheta - \beta_{\perp} \frac{P}{\alpha} \cos \vartheta \right) \right\},$$

где  $a_{\rho} = 1 - \bar{\beta} \cos \vartheta - \rho \Omega / \omega$ . Как видно, дельта-функция перешла в экспоненту, которая, естественно, в пределе  $\beta_0 \rightarrow 0$  переходит в дельта-функцию, а все выражение в целом в известные выражения. Поправками к этим выражениям можно пренебречь при малости  $2\pi q n \beta_n \max(\beta_n, \gamma^{-1})$ . Здесь  $n$  - число периодов ондулятора.

В 2.5 вычислена корреляционная функция для сгустка с дисперсией  $V_{n0}$

$$\langle j_i j_j \rangle_{\omega, k}^0 = \begin{pmatrix} \rho_{\perp}, \rho_{\perp}, 0 \\ \rho_{\perp}, \rho_{\perp}, 0 \\ 0, 0, 1 \end{pmatrix},$$

$$\rho_{\perp} = \frac{\pi}{k_x} e^2 m^2 c^2 \gamma^2 (V_{n0}^2 + \delta^2) e^{-\delta^2 / V_{n0}^2},$$

$$\rho_{\parallel} = 2\pi \frac{k_x k_y}{k_{\perp}^2} (emc\gamma)^2 (V_{n0}^2 - \frac{k_y^2}{k_{\perp}^2} \delta^2) e^{-\frac{k_y^2 \delta^2}{2k_{\perp}^2 V_{n0}^2}},$$

где  $\delta = \frac{\omega - k_z V_z}{k_y}$ , а  $k_{\perp}$  - поперечная компонента волнового вектора. Анализ

показывает наличие неустойчивости на частоте  $\omega_{cor} \equiv \omega(1 - n_z \beta_z) = \frac{2\omega}{\gamma^{-2} + \vartheta^2}$ , совпадающая с известной неустойчивостью в ЛСЭ.

Глава 3. Динамика и упорядочение сгустка высокой энергии в поле лазера.

В этой главе рассматривается [2,10] динамика и упорядочение замагниченного банча заряженных частиц высокой энергии в поле плоской электромагнитной волны.

В 3.1 сделан обзор работ в этой области и обоснована актуальность

В случае, когда  $\Delta_0 = const$  и много меньше  $\langle p_{\perp}^2 \rangle$ , получим ( $z$ -длина взаимодействия):

$$\langle p_{\perp}^2 \rangle = \langle p_{\perp 0}^2 \rangle^3 - \xi^2 \frac{6\pi^2 z}{2\lambda p_0^2} \Delta_0^{1/3}.$$

Особый интерес представляет случай сгустка, модулированного с глубиной  $0 < \varepsilon \leq 1$

$$f(p_{\perp}, p_z, \varphi) = f_0(1 - \varepsilon \cos \varphi).$$

В этом случае уравнение динамики имеет вид

$$\frac{d}{dt} \langle p_{\perp} \rangle = -\varepsilon \xi \frac{\omega}{2p_0^2} \left(1 + \frac{6}{\pi} \langle p_{\perp} \rangle^2\right), \quad \text{а его решение есть}$$

$$\langle p_{\perp} \rangle = p_{\perp 0} - \varepsilon \xi \pi \frac{z}{2\lambda p_0^2}.$$

Полученные решения указывают на возможность уменьшения поперечного импульса сгустка при взаимодействии с электромагнитной волной вблизи циклотронного резонанса. Для пучка с  $p_0 = 100$  и  $\mathcal{G} = 10^{-3}$  и  $CO_2$  лазера с  $\xi = 10^{-2}$  длина пути, на котором  $\langle p_{\perp} \rangle$  изменяется на 100%, составляет 80 см, при этом длина релаксации порядка 20 см.

Такое уменьшение импульса сгустка применим для резонансно-лазерного охлаждения пучков всех типов ускорителей. Достижимые сейчас значения параметра  $\xi \geq 1$  дают возможность использовать резонансно-лазерное охлаждение пучков в линейных ускорителях, для которых отсутствуют какие-либо методы охлаждения. При энергиях пучков тяжелых частиц  $\gamma \geq 100$  предложенный метод имеет значительно меньшее время охлаждения, чем известные методы.

#### Глава 4 Динамика и упорядочение сгустков в собственных полях.

**В 4.1** обоснована важность рассмотрения роли сил пространственного заряда и взаимодействия между частицами при больших плотностях сгустков. Показано, что эти силы увеличиваются и по характеру воздействия на свойства сгустка при определенных условиях могут превзойти применяемые и достижимые внешние силы. При этом начинаются коллективные эффекты и упорядочение из-за сильного межчастичного взаимодействия. Сделан обзор работ по плотным кулоновским системам.

**В 4.2** исследовано межчастичное взаимодействие в сверхплотных сгустках [6]. Получена аналитическая формула для потенциала заряженной частицы в поле остальных в приближении малых отклонений от поперечных плоскостей равновесия при компенсации среднего поля сгустка внешними полями.

**В 4.3** рассмотрен вопрос упорядочения кулоновских ансамблей на основе формулы для потенциала. Получена [7] корреляционная функция для сильнокоррелированного состояния в квантовом случае

$$\langle \rho(z) \rho(0) \rangle = \cos \left( 2\pi \frac{z}{a} \right) \exp \left\{ -b \sqrt{\ln(z)} \right\},$$

где  $b = \lambda_c / a \delta \sqrt{\Gamma \gamma^3}$  и много меньше единицы для частиц высокой энергии.

Здесь  $\lambda_c = h/mc$  - комптоновская длина волны, а  $\delta$  - относительный разброс по энергии в банче. Здесь  $\Gamma$  - отношение потенциала к температуре. В классическом случае получается

$$g(z) = \frac{\Gamma}{2\pi^2} (1 - \cos(2\pi \frac{z}{a})).$$

В этом случаях формфактор когерентности равен

$$F_{sc} = \frac{N_t^2 \sin^2 N_l x}{N^2 x^2},$$

где  $N_t$  - число частиц в поперечной плоскости,  $N_l$  - число плоскостей равновесия.

При выполнении условия кристаллизации  $\Gamma > 172$ , когда сгусток может кристаллизоваться, его одночастичная корреляционная функция, или плотность распределения частиц, становится дельтаобразной с периодом  $a$  вдоль направления движения (ось  $Z$ ). Для такого сгустка формфактор когерентности равен [8]

$$F_{cr} = \frac{N_t^2 \sin^2 N_l x}{N^2 \sin^2 x},$$

которое имеет резкие максимумы в точках  $x = ka = l\pi$ , где  $l$  - целое.

Такой механизм когерентного направленного излучения может быть использован как альтернативный лазер на свободных электронах, позволяющий получать усиление в  $N^{2/3}$  раз в случае упорядоченного сгустка и  $N$  раз для кристаллического сгустка [9].

#### Выводы

1. Корреляционные функции ансамблей с направленным релятивистским движением. описывают упорядочение сгустков заряженных частиц.
2. Колебания заряженных частиц в ондуляторе при наклонном пролете нелинейны и выражаются через эллиптические функции Якоби.
3. Наклонность пролета изменяет частотно-угловое распределение интенсивности излучения частицы в спиральном ондуляторе. Развита теория излучения с учетом упорядочения в сгустке на основе точно решенных траекторий заряженной частицы при наклонном пролете.

4. Динамика релятивистского сгустка при взаимодействии с электромагнитной волной вблизи циклотронного резонанса описывается системой нелинейных уравнений для среднего импульса с учетом интеграла движения. Найденные точные решения в трех частных случаях дают изменение импульса сгустка.

5. При определенных условиях средний поперечный импульс сгустка уменьшается, что может быть использовано для охлаждения пучков высоких энергий. Предложенный метод охлаждения применим на всех типах ускорителей, но особенно важен для линейных ускорителей и ускорителей тяжелых релятивистских частиц.

6. Потенциал частицы сгустка квадратичен по отклонению от положения равновесия, с учетом дискретности заряда и компенсации среднего поля сгустка внешним полем. Периодичность среды позволяет вводить модельный потенциал в виде косинуса.

7. Релятивистский сгусток пространственно упорядочивается при определенных плотностях и температурах, поскольку абсолютный минимум энергии такого ансамбля достигается при нулевых отклонениях от плоскостей равновесия. В упорядоченном состоянии классическая и квантовая корреляционные функции сгустка периодичны вдоль направления движения.

8. Пространственно-упорядоченный сгусток является источником лазерного излучения.

#### Список опубликованных работ по теме диссертации

1. L.A. Gevorgian, R.V. Tumanian, «Dynamics and radiation of a charged particle at inclined passage through the undulator», Radiation Effects, 91(1986)283-286.
2. Р.В. Туманян, «Уменьшение поперечного эмиттанта релятивистского электронного пучка при авторезонансном взаимодействии», ЕФИ-926(77)-86, ЦНИИ Атоминформ, 1986.
3. Р.В. Туманян, Л.А. Геворгян, «Влияние наклона пролета заряда через ондулятор на спектральные характеристики ондуляторного излучения», Известия АН Арм.ССР, Физика, т. 21, вып. 1(1986)46-47.
4. Р.В. Туманян, С.Г. Арутюнян, М.Р. Маилян, «Когерентное излучение частиц с траекториями инвариантными относительно продольных сдвигов», Журнал Техн. Физики, 60(1990)59-66.
5. Р.В. Туманян, С.Г. Арутюнян, М.Р. Маилян, «Когерентное излучение частиц с траекториями инвариантными относительно продольных сдвигов», доклад. Труды 7-ого Междун. Совещания по мощным пучкам заряженных частиц, Karlsruhe, 1988.
6. L.A. Gevorgian, R.V. Tumanian, "Coherent radiation of crystalline beams", Eprint: xxx.lanl.gov-physics/0102050.
7. L.A. Gevorgian, R.V. Tumanian, "Effect of density correlations on the coherency of relativistic bunch radiation", Report, Proc. of NATO Workshop "Electron-photon interaction in dense media", Nor-Hamberd, Armenia.
8. R.V. Tumanian, "Resonant laser cooling of charged beams", E-print: physics/0201041.

9. L.A. Gevorgian, R.V. Tumanian, "Ordering and coherent radiation of charged particle beams", Report, Abstracts of Intern. Conference FEL'02, Chicago, USA, Sept. 2002.

10. R.V. Tumanian, "Resonant laser cooling of relativistic charged-particle beams", Jour.Opt. Soc. Of America, vol. 20, N 5, May 2003.

#### ԱՄՓՈՓՈՒԳԻՐ

Ատենախոսությունը նվիրված է լիցքավորված մասնիկների դինամիկայի և կարգավորման որոշ հարցերի ուսումնասիրությանը:

Աշխատանքում ստացված հիմնական արդյունքները հետևյալն են.

Հետազոտված է հայտնի ստատ-մեխանիկական և կորեյացիոն տեսությունների կիրառելիությունը ուղղորդված ռելյատիվիստիկ շարժման առկայության դեպքում:

Չարգացվել է օնդուլյատորային ճառագայթման տեսությունը պարուրածն օնդուլյատորով մասնիկների թեք անցման դեպքում: Կորեյացիոն ֆունկցիայի հաշվարկումով ստացվել է մասնիկների համախմբի անկայունություն այն հաճախության վրա, որը օնդուլյատորային տպտանման հաճախության նկատմամբ ունի դոպլերյան շեղում: Արդյունքը լիովին համընկնում է ազատ էլեկտրոններով լազերի (ԱԷԼ) հայտնի տեսության հետ:

Կինետիկ հավասարման լուծմամբ գտնվել է փնջի միամասնիկային կորեյացիոն ֆունկցիան ցիկլոտրոնային ռեզոնանսի շրջակայքում Դրա հիման վրա շարժման ինտեգրալի հաշվառմամբ ստացվել է փնջի միջին ընդլայնական իմպուլսի փոփոխությունը նկարագրող ոչ-գծային դիֆֆերենցիալ հավասարում: Գտնվել են այս հավասարման լուծումները 3 դեպքերում:

Առաջարկվել է փնջերի սառեցման ռեզոնանսալազերային մեթոդ, որն աչքի է ընկնում իր արդյունավետությամբ և գործնականորեն բոլոր տեսակի արագացուցիչներում կիրառելու հնարավորությամբ: Այս մեթոդն առավել արժեքավոր է գծային և ծանր ռելյատիվիստիկ մասնիկների արագացուցիչների համար:

Դուրս է բերվել մասնիկի պոտենցիալի անալիտիկ բանաձև, փնջի մասնիկների միջին դաշտում լիցքի դիսկրետության հաշվառմամբ և փնջի միջին դաշտն արտաքին դաշտով չեզոքացնելու դեպքում:

Հետազոտվել են փնջերի միաչափ-կարգավորված (հեղուկ) և միաչափ-բյուրեղային վիճակները, գտնվել են կորեյացիոն ֆունկցիաներն ու ճառագայթման ֆորմֆակտորները:

Առաջարկված է նոր տիպի ԱԷԼ, կարգավորված փնջի կոհերենտ ճառագայթման երևույթի հիման վրա:

#### Resume

In the dissertation some problems of dynamics and ordering of high energy charged particle beams are investigated. The obtained basic results are.

The applicability of the known statistico-mechanical theory of ordering and correlations to high energy charged particle beam physics has been proven.

The nonlinearity of the particle oscillations in the spiral undulator has been proven and trajectories in the form of Jacoby functions has been found.

The undulator radiation theory has been developed in case of inclined passage of the particles through the spiral undulator.

The one-particle correlation function of the beam close to cyclotron resonance is obtained by solving the kinetic equation.

The nonlinear equation of beam transverse momentum exchange close to cyclotron resonance has been derived and solved in three cases.

The resonant laser cooling of charged particle beams has been proposed. This method is suitable to all types of accelerators and especially for linear and heavy particle accelerators.

Accounting for the beam charge discreteness, the analytic formula for a particle potential in the averaged field of the beam has been obtained in a case of beam self field compensation by external field.

The one dimensional ordered (liquid) and one dimensional crystalline states of the beam has been investigated. The correlation functions and formfactors of radiation has been found.

The new type of free electron laser has been proposed, based on the coherent radiation of an ordered beam.

*J. M. D. [Signature]*