

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Վասիլի Արաչի Ցականով

ԼՅՅԱՆՎՈՐՎԱՅ ԽԱՍՆՈՐՆԵՐԻ ԲԱՐՁՐ-ԳՐԱԿԱՆՈՒՄՆԵՐՆԵՐԻ ԲԵՐՈՒՄՆԵՐԸ
ԱՐԿԱՆՅՈՒՄԻ Ե ՓՈՒՔ ԷՄՑԱՆՅՈՒՎ ՓՆՁԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱԿԱՆ

Ա.04.20- "մասնիկների վեցերի ֆիզիկա և տեխնիկա" մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների լիկտորի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

ԱՆՎԱԿԵՐ

ԵՐԵՎԱՆ - 1998

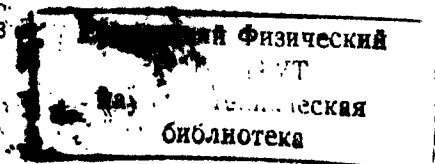
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Цаканов Василий Мкртычевич

ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЕ КИЛЬВАТЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И
ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С МАЛЫМ ЭМИТАНСОМ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности
01.04.20- "физика и техника пучков частиц".

ЕРЕВАН - 1998



Մանսխառնություն բնագիտական և Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում

Պաշտոնական բնութագրումներ

Ելանիկ գիտությունների դոկտոր
Թումանյան Ա.Ռ. (Եր.ՖԻ, ՀՀ)

Ֆիզմաթ գիտությունների դոկտոր
Պերելշտեյն Է.Ա. (ՄՀ(ԳԻՒ, Գերման, ՌԳ))

Ֆիզմաթ գիտությունների դոկտոր
Բրինկմանն Ռ. (ԴԵԶԻ, Համբուրգ, Գերմանիա)


Մասշտաբ կազմակերպություն

Գիտությունների Ազգային ֆիզիկայի Ինստիտուտ, Մասկվա, ՌԳ

Պաշտոնը կայանալու է 1998 թ. նոյեմբերի 24 -ին, ժամը 14.00 -ին Երևանի ֆիզիկայի
Ինստիտուտում 024 մասնագիտական խորհրդում (Երևան-36 Արիստանյան եղբայրների փ. 2) :

Մանսխառնության կարգի է ձևնորմալ ԵրՖԻ-ի գրադարանում:

Սնդագիրը անարված է 1998 թ. հոկտեմբերի 22 -ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար  Ա.Պ. Մարգարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор техн. наук, Ереванский
Туманян А.Р. (ЕрФИ, г. Ереван, РА)

доктор физ.-мат. наук
Перельштейн Э.А. (ОИЯИ, г. Дубна, РФ)

доктор физ.-мат. наук
Бринкманн Р. (ДЕЗИ, Гамбург, Германия)

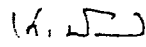
ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Физический Институт Академии Наук
им. П.Н. Лебедева, Москва, РФ

Защита состоится "24" ноября 1998 г. в "14.00" часов на заседании специализированного
совета 024 при Ереванском физическом институте (375036, г.Ереван, ул. Бр. Аликсаян 2)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института.

Автореферат разослан "22" октября 1998 г.

Ученый секретарь след. совета

 А.Т. Маргарян

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Достижение высоких градиентов ускорения пучков заряженных частиц с малым поперечным эмитансом традиционно является одним из основных направлений развития физики и техники ускорителей. В последние десятилетия эти вопросы стали в центре внимания практически всех электронных ускорительных лабораторий мира (SLAC, DESY, KEK, CERN и др.) в связи с необходимостью сооружения электрон-позитронного линейного столкновителя на энергию в системе центра масс до 0.5×0.5 ТэВ и светимостью сталкивающихся пучков порядка $10^{34} - 10^{35} \text{ cек}^{-1} \text{ м}^{-2}$. Ясно, что реализуемость такого проекта обусловлена двумя основными факторами: достижением высоких темпов ускорения частиц с сравнительно высокой эффективностью и получением высокоэнергетичных интенсивных электрон- и позитронных пучков с предельно малыми горизонтальным и вертикальным эмитансами.

Первое направление ознаменовалось развитием как традиционных методов ускорения заряженных частиц с использованием современных достижений ускорительной физики и техники (от сверхпроводящего линейного ускорителя TESLA' с частотой ускоряющего ВЧ поля 1 ГГц до двухпучкового ускорителя CLIC' с частотой 32 ГГц), так и развитием нетрадиционных методов ускорения заряженных частиц , к которым относится и высокоградиентное кильватерное ускорение заряженных частиц.

Второе направление, связанное с получением высокоэнергетичных электронных пучков с малым эмитансом, в основном связано с динамикой электронного пучка в основном линейном ускорителе, где сгустки электронов должны ускоряться от энергий нескольких GeV до ТэВ - ных энергий. Основная проблема здесь - сохранение естественного эмитанса пучка, которая спадает обратно пропорционально энергии частиц. Реальный среднеквадратичный эмитанс пучка по мере ускорения и фокусировки имеет тенденцию к уширению за счет дисперсионных и кильватерных эффектов , вызванных когерентными и некогерентными колебаниями пучка. И проблема состоит в ослаблении и подавлении дисперсионных и кильватерных эффектов уширения эмитанса пучка. Добавим, что решение проблемы сохранения естественного эмитанса пучка в основном линейном ускорителе будет одним из решающих факторов при выборе проекта будущего линейного коллайдера.

Целью работы, положенной в основу диссертации, явилось исследование генерации кильватерных полей с высоким коэффициентом трансформации в ускоряющих структурах и исследование проблем сохранения эмитанса пучка в линейных ускорителях на высокие энергии и методов подавления дисперсионных и кильватерных эффектов уширения эмитанса пучка.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые на основе проведенных исследований выдвинут и обоснован новый метод ускорения кильватерным полем с высоким коэффициентом трансформации, возбуждаемым последовательностью гауссовских сгустков в диафрагмированной ускоряющей структуре. Предложенный метод явился следствием исследования основных особенностей генерации кильватерных полей релятивистскими сгустками в замедляющих структурах. Доказано, что в общем случае, максимальный коэффициент трансформации энергии от ведущего пучка к ускоряемому заряду достигается в случае, когда все частицы ведущего пучка испытывают одинаковое торможение при пролете через замедляющую волноводную структуру. Как следствие, энергообмен между ведущим и ускоряемым сгустками оптимален. Показано, что для последовательности сгустков это условие выполняется, если середины сгустков испытывают максимальное торможение в структуре.

Впервые предложена и исследована концепция фокусировки вдоль линейного ускорителя на основе изменяющейся с энергией частиц набега фазы поперечных бетатронных колебаний. Получены аналитические выражения для эффектов уширения эмитанса и разработана методика определения параметров электронно-оптической системы ускорителя.

Впервые предложен и исследован метод подавления некоррелированного дисперсионного уширения эмитанса пучка при когерентных колебаниях сгустка в линейном ускорителе. Подход основан на предварительном перераспределении частиц сгустка на фазовой плоскости в бездисперсионной арке, включающей секстипольные линзы, для обеспечения положительной хроматичности пучка. Начальный уширенный эмитанс пучка стремится к естественному эмитансу по мере ускорения в линейном ускорителе за счет естественной отрицательной хроматичности фокусирующей системы.

Впервые исследован и предложен метод автофазировки частиц на основе изменяющейся с энергией частиц набега фазы бетатронных колебаний, позволяющей подавить односгустковую неустойчивость пучка с одновременной стабилизацией многопучковой неустойчивости. Найдены требования к фокусирующей системе ускорителя и коррелированному энергетическому разбросу частиц внутри сгустка,

имеющие существенные преимущества по сравнению с известными до сих пор подходами. Найден закон изменения хроматичности фокусирующей ячейки периодичности вдоль ускорителя при котором выполняется условие автофазировки частиц.

Автор выносит на защиту следующие *результаты и выводы работы*:

1. Исследованы условия оптимального энергообмена ультрарелятивистских частиц в кильватерных полях, возбуждаемых сгустками заряженных частиц в замедляющих структурах.
2. Предложен новый метод ускорения заряженных частиц в кильватерных полях, возбуждаемых последовательностью гауссовских сгустков в диафрагмированной ускоряющей структуре, с высоким коэффициентом трансформации.
3. Рассчитана реальная диафрагмированная ускоряющая структура с реальными гауссовскими сгустками для экспериментального исследования на базе линейного сильноточного ускорителя ЛУЭ-20
4. Выдвинута и исследована новая концепция фокусирующей системы линейного ускорителя на основе изменяющейся с энергией частиц набега фазы бетатронных колебаний.
5. Исследованы эффекты уширения среднеквадратичного эмитанса пучка, вызванные энергетическим разбросом и кильватерными полями, в зависимости от закона изменения частоты бетатронных колебаний вдоль ускорителя.
6. Создана компьютерная программа ЛАВИНА для трека частиц в линейных ускорителях с учетом дисперсионных и кильватерных эффектов, неточностей установки элементов ускорителя и т.д.
7. Исследован новый метод подавления некоррелированного дисперсионного уширения эмитанса пучка, одновременно подавляющий когерентные колебания пучка, вызванные начальными отклонениями центра тяжести сгустка электронов от оси ускорителя.
8. Найдены условия автофазировки частиц при варировании набега фазы бетатронных колебаний с энергией частиц, позволяющая одновременно избежать генерации многосгустковой неустойчивости пучка.
9. Найдены аналитические выражения для величины относительного увеличения среднеквадратичного эмитанса пучка в случае неточности установки квадрупольных линз и ускоряющих секций вдоль ускорителя.

Апробация работы и публикации Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ведущих отечественных и зарубежных центрах, таких как ФИАН (г.Москва), НИИЭФА им. Ефремова (г. Санкт-Петербург), ОИЯИ (г.Дубна), DESY (Гамбург), THD (Дармштадт) и др. Они также представлены и опубликованы в трудах следующих конференций:

- 1986 Linac conference ,1986 .
- 1988 High Energy Accel. Conf. (Новосибирск, 1988),
- 1992 High Energy Accel. Conf. (Гамбург, 1992)
- 1992 Intern. Workshop LC-92 (Гармеш-Патенкирхен, 1992)
- 1997 Intern. Workshop LC-97 (Звенигород,1997) и др.

По теме диссертации опубликовано 22 статей в препринтах, журналах и трудах конференций.

Содержание работы

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения , двух частей и заключения ; содержит 153 страниц печатного текста, включая 51 рисунок и список литературы из 84 наименований.

Первая часть посвящена генерации кильватерных полей релятивистскими сгустками в замедляющих структурах и исследованию процессов энергообмена заряженных частиц в кильватерных полях. Исследование проведено в терминах продольного кильватерного потенциала, определяющего прирост энергии пробного заряда при пролете частицы в замедляющей структуре.

В схемах ускорения кильватерным полем, низкоэнергетичный высокоинтенсивный ведущий сгусток заряженных частиц возбуждает в структуре кильватерные поля с продольной составляющей электрического поля , в соответствующей фазе которых ускоряется слабоинтенсивный высокоэнергетичный сгусток электронов. Важной концепцией такого ускорителя является коэффициент трансформации, определяющий возможный максимальный прирост энергии пробного заряда в кильватерном поле по отношению к начальной энергии частиц ведущего сгустка. Ясно, что коэффициент трансформации зависит как от геометрии ускоряющей структуры , так и от распределения частиц в ведущем пучке. Известная теорема нагруженного пучка дает ограничение на коэффициент трансформации ($k \cdot 2$) для точечного ведущего сгустка в произвольной замедляющей структуре и для

симметричного ведущего сгустка в одномодовой структуре. Исходя из четырех основополагающих принципов: закона сохранения энергии, принципа причинности, ортогональности возбуждаемых мод и принципа суперпозиции, в рассматриваемой главе исследованы основные свойства кильватерных полей, генерируемых ультрарелятивистскими сгустками в замедляющей структуре. Подробно рассмотрены случаи: сгусток - одномодовая структура, пучок -одномодовая структура, сгусток - многомодовая структура и общий случай генерации кильватерных полей в замедляющей структуре. Доказаны следующие утверждения:

- коэффициент трансформации последовательности симметричных идентичных сгустков в одномодовой структуре не может превосходить величины 2 для нечетного числа сгустков и величины $2\sqrt{2}$ для четного числа сгустков;
- коэффициент трансформации симметричного сгустка в многомодовой ускоряющей структуре не превосходит двойки;
- максимальный коэффициент трансформации в ускоряющей структуре достигается ведущим пучком , все частицы которого испытывают одинаковое торможение при пролете через структуру;
- для произвольной последовательности гауссовских сгустков максимальный коэффициент трансформации достигается, если частицы середины сгустков испытывают максимальное торможение при пролете через структуру.

На основе проведенных исследований выдвинуты две схемы ускорения кильватерным полем с высоким коэффициентом трансформации:

- последовательность N идентичных гауссовских сгустков с временным запаздыванием влета в структуру τ_n n-ого сгустка

$$\sin \frac{\omega}{\tau_n} = \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad n = 1, 2, 3 \dots N$$

обеспечивающим коэффициент трансформации $2\sqrt{N}$.

- периодическая последовательность N гауссовских сгустков с зарядом Q_n n-ого сгустка, меняющимся линейно от сгустка к сгустку как

$$Q_n = Q_1(2n-1), \quad n = 1, 2, 3 \dots N$$

Период следования сгустков T связан с частотой возбуждаемой моды ω как $\omega T = \pi$. Коэффициент трансформации при этом равен $k = 2N$.

Далее подробно исследована схема ускорения кильватерным полем, возбуждаемым последовательностью гауссовских сгустков с возрастающей плотностью заряда в реальной диафрагмированной ускоряющей структуре на частоте 3 ГГц (Рис.1). Кильватерное поле возбуждается последовательностью из пяти гауссовских сгустков (Рис.2). Среднеквадратичная длина каждого сгустка равна 8 мм, период следования сгустков $T = 4R/c$. Коэффициент трансформации отдельного сгустка 1.7, тогда как для пяти сгустков, как это видно из рисунка, коэффициент трансформации достигает величины 7.8.

При этом максимальные потери энергии испытывают частицы середины сгустков и они равны. Естественно, что такая схема обладает высокой эффективностью ($\approx 60\%$) трансформации энергии частиц в энергию электромагнитного кильватерного поля. Ускоряемый сгусток инжектируется в точку максимума S_z продольного кильватерного потенциала, где максимален прирост энергии пробного заряда. При числе частиц в последнем сгустке порядка $5 \cdot 10^{11}$ такая схема позволяет достигать темпов ускорения порядка 100 МэВ/м. Рассмотренная схема ускорения кильватерным полем численно смоделирована для экспериментального исследования на сильноточном линейном ускорителе ЛУЭ-20 в Ереванском физическом институте.

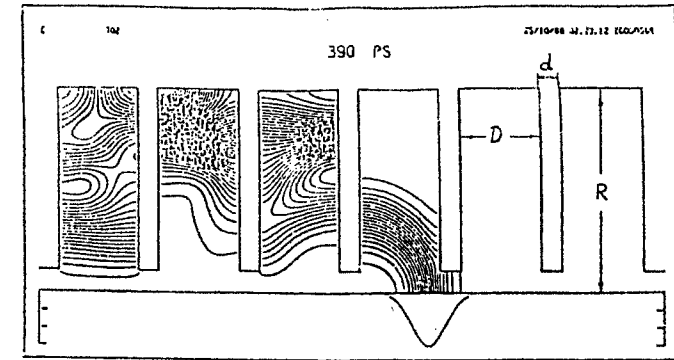


Рис.1 Кильватерные поля, возбуждаемые гауссовским сгустком в диафрагмированной ускоряющей структуре.

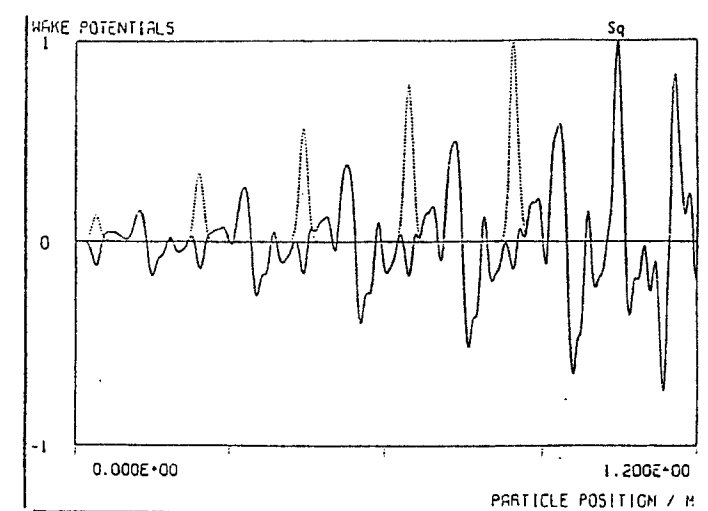


Рис.2 Генерация продольного кильватерного потенциала с высоким коэффициентом трансформации последовательностью пяти гауссовских сгустков в диафрагмированной структуре ЛУЭ-20.

Вторая часть диссертации посвящена актуальным проблемам динамики электронных пучков с малым поперечным эмитансом в линейных ускорителях на высокие энергии.

В первой главе даны и обоснованы основные подходы к проблеме фокусировки в линейных ускорителях на высокие энергии с точки зрения сохранения нормализованного эмитанса пучка, получены основные соотношения, описывающие электронно-оптическую систему ускорителя, описана модель пучка и найдены величины хроматичности электронного пучка.

Как обычно, предполагается, что ускоритель состоит из большого числа ФODO периодов с двумя ускоряющими секциями в одном периоде. Основная концепция фокусировки основана на изменении набеге фазы на период по мере ускорения частиц в линейном ускорителе

$$ig \frac{\mu_n}{2} = \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_n} \right)^\alpha ig \frac{\mu_1}{2}$$

где μ_n - набег фазы бетатронных колебаний в n -ой ячейке, γ_0 - равновесная энергия частиц в момент инжекции в ускоритель, $\gamma_n = \gamma_0 + n \cdot \Delta\gamma$ - энергия при влете в n -ую ФODO ячейку, $\Delta\gamma$ - прирост энергии частиц на один период в терминах Лоренц фактора частиц. Параметр α определяет закон изменения частоты бетатронных колебаний по мере ускорения частиц. Таким образом, начальный набег фазы бетатронных колебаний μ_1 и параметр α определяют однозначно всю фокусирующую систему ускорителя и линейную оптику электронного пучка в приближении отсутствия связи горизонтальных и вертикальных колебаний. Средняя амплитуда бетатронных колебаний при этом изменяется вдоль ускорителя как

$$\bar{\beta}_n = \frac{l_c}{2ig(\mu_1/2)} \left(g_n^{-\alpha} + g_n^\alpha ig \frac{\mu_1}{2} \right)$$

где $g_n = \gamma_0 / \gamma_n$. Заметим, что такой подход охватывает все возможные траектории пучка и эффекты уширения эмитанса пучка во многом обусловлены выбором набеге фазы в начале ускорителя и его изменением вдоль ускорителя.

Соответствующие параметры реальной фокусирующей системы (силы квадрупольных линз) могут быть определены посредством матрицы Твисса и матрицы перехода следующим образом:

Периодическое решение в первой ячейке

$$M_{11} - M_{22} = 2 \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_1} \right)^{1/2} \cos \mu_1,$$

и неперидические рекуррентные соотношения в n -ой ячейке

$$M_{11} - M_{22} = \left(\frac{\gamma_{n-1}}{\gamma_n} \right)^{1/2} (\beta_n \beta_{n-1})^{-1/2} [(\beta_n + \beta_{n-1}) \cos \mu_n + (\alpha_{n-1} \beta_n - \alpha_n \beta_{n-1}) \sin \mu_n].$$

где $\alpha_{n-1}, \beta_{n-1}$ и α_n, β_n параметры матрицы Твисса в начале и в конце n -ой ячейки, M - матрица перехода n -ой ячейки, μ_n - набег фазы в n -ой ячейке, γ_{n-1}, γ_n - Лоренц факторы равновесной частицы в начале и в конце n -ой ячейки. Такое задание магнитной оптики обеспечивает плавное изменение амплитудной бетатронной функции вдоль ускорителя. На рис.3 приведен типичный пример изменения амплитудной бетатронной функции для параметров основного ускорителя линейного коллайдера **SBLC** для случая изменения хроматичности фокусирующей системы как корень квадратный от относительного увеличения энергии частиц ($\alpha = 0.5$). Набег фазы бетатронных колебаний за ячейку медленно спадает от начального значения 125° до 50° по мере ускорения частиц от энергии инжекции 3.15 ГэВ до энергий 50 ГэВ (около 230 ячеек, рис.4). Заметим, что в общем случае, такой подход позволяет аналогично задать закон изменения набеге фазы вертикальных бетатронных колебаний вдоль ускорителя.

Далее найдены аналитические выражения для величины смещения набеге фазы бетатронных колебаний неравновесной частицы в линейном ускорителе при произвольном законе изменения хроматичности с энергией частиц. Исследована дисперсия фазы как при начальном некоррелированном разбросе частиц по энергиям, так и при коррелированном с продольной координатой энергетическом разбросе частиц, возбуждаемом в ускоряющих секциях. Точные выражения для смещения набеге фазы имеют вид: некоррелированный начальный энергетический разброс δ_0

$$\Delta\mu = -2\delta_0 \frac{\gamma_0}{\Delta\gamma} \frac{1}{\alpha} \left[1 - \left(\frac{\gamma_0}{\gamma} \right)^\alpha \right]$$

коррелированный энергетический разброс δ_c

$$\Delta\mu = -2\delta_c \frac{\gamma_0}{\Delta\gamma} \left[\frac{1}{\alpha} (1 - g^\alpha) - \frac{1}{\alpha - 1} (1 - g^{\alpha-1}) \right]$$

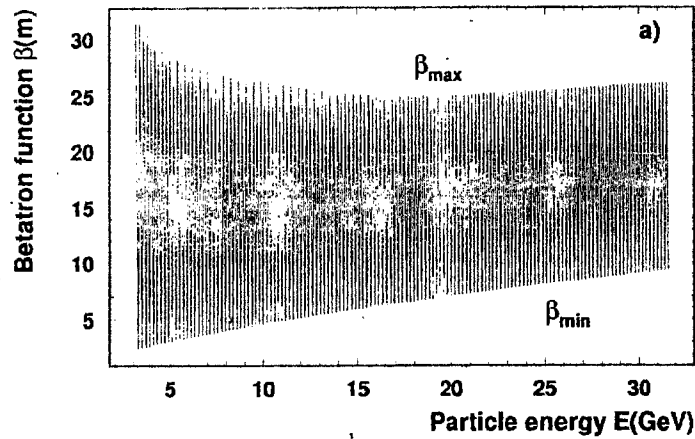


Рис.3 График бетатронной функции вдоль ускорителя при медленном спадании набега фазы бетатронных колебаний.

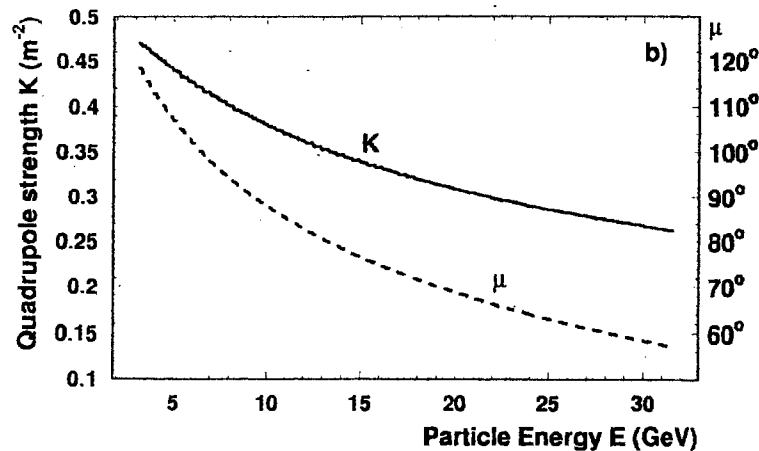


Рис.4 Изменение сил квадрупольных линз и набега фазы бетатронных колебаний по мере ускорения частиц.

Во второй главе, используя полустатистический, полудетерминистический подход, определено дисперсионное уширение среднеквадратичного эмитанса сгустка. Для начала, рассмотрен гауссовский сгусток с некоррелированным начальным гауссовским энергетическим распределением, влетающим в ускоритель с начальными поперечными амплитудами (x_0, x'_0) когерентных бетатронных колебаний.

Получено следующее выражение для изменения центра тяжести пучка вдоль ускорителя

$$x(z) = a_0 \left(\beta(z) \frac{\gamma_0}{\gamma(z)} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{i}{2} \Delta\mu_s(z)\right) \cos[\phi(z) - \phi_0]$$

где $\Delta\mu_s(z)$ есть среднее смещение фазы бетатронных колебаний неравновесной частицы со среднеквадратичным начальным энергетическим разбросом σ_s

$$\Delta\mu_s = -\frac{1}{2} \sigma_s \operatorname{tg} \frac{\mu_s}{2} \frac{\gamma_0}{\gamma} \frac{1}{\alpha} (1 - g^2)$$

Величина дисперсионного уширения эмитанса сгустка в ускорителе определена аналитически и имеет следующий вид

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_p = \frac{a_0^2}{2} \frac{\gamma_0}{\gamma} [1 - \exp(-\Delta\mu_s^2)]$$

где ε_p и ε есть естественный и среднеквадратичный текущий эмитансы пучка.

Учитывая, что величина a_0^2 соответствует площади начального центрального фазового эллипса, величина уширения эмитанса ограничена половиной площади эллипса когерентных бетатронных колебаний пучка

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{2} (\gamma_x x_c'^2 + 2\alpha_x x_c x_c' + \beta_x x_c'^2)$$

Заметим, что величина дисперсионного уширения пучка не зависит от естественного эмитанса пучка и при высокой степени расщепления пучка является критичным при ускорении пучков с малым вертикальным эмитансом т.к. машинный эллипс может значительно превосходить естественный эмитанс пучка.

В случае коррелированного энергетического разброса, хорошее аналитическое приближение дисперсионного уширения эмитанса можно получить в модели

равномерного сгустка и в предположении линейной зависимости энергии частиц вдоль сгустка. Для среднеквадратичного уширения эмитанса получено следующее выражение

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_p} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sin^2 \Delta \hat{\mu}}{\Delta \hat{\mu}^2} \right)$$

где

$$\Delta \hat{\mu} = -2\delta \left(g \frac{\mu_z}{2} \frac{\gamma_0}{\Delta \gamma} \left[\frac{1}{\alpha} (1 - g^\alpha) - \frac{1}{\alpha - 1} (1 - g^\alpha) \right] \right)$$

На рис.5 и 6 приведены результаты трека частиц и аналитического приближения величины дисперсионного уширения пучка, вызванного коррелированным энергетическим разбросом в сгустке, для основного ускорителя *SBLC*.

Далее в работе исследована зависимость дальних кильватерных полей, возбуждаемых в ускоряющих структурах, от степени деформации продольно-поперечного распределения частиц в сгустке, вызванного коррелированным энергетическим разбросом частиц.

Основные результаты, полученные в первых двух главах второй части:

- обоснован новый подход к заданию электронно-оптической системе ускорителя на основе изменяющейся с энергией частиц набега фазы бетатронных колебаний;
- разработана методика нахождения амплитудных функций вдоль всего ускорителя при заданном законе изменения набега фазы с энергией частиц;
- получены аналитические выражения для смещения набега фазы бетатронных колебаний, вызванного начальным некоррелированным и текущим коррелированным энергетическим разбросом частиц в сгустке;
- получены аналитические выражения для дисперсионного уширения эмитанса пучка, вызванного как коррелированным так и некоррелированным энергетическим разбросом;
- исследована зависимость дальних кильватерных полей в частотном интервале от степени деформации продольно-поперечного распределения частиц в сгустке;
- разработана программа для численного трека частиц вдоль ускорителя и получено хорошее согласие результатов трека частиц с аналитическими результатами дисперсионного уширения эмитанса пучка.

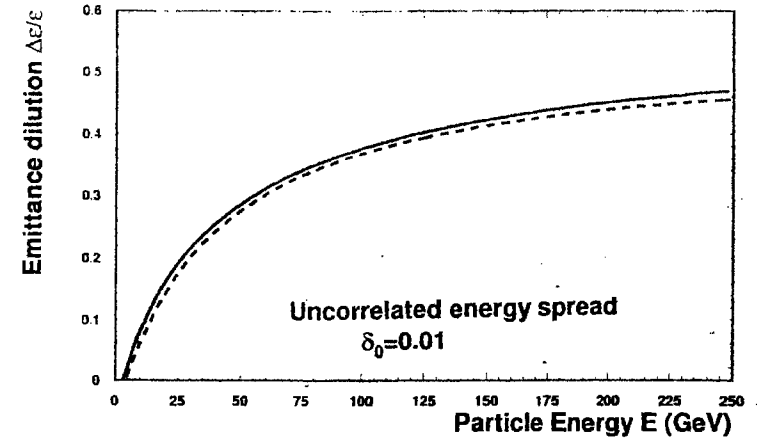


Рис.5 Относительное некоррелированное дисперсионное уширение эмитанса пучка в основном линейном ускорителе *SBLC*. Сплошная линия - результаты трека частиц, пунктирная линия - аналитический подход.

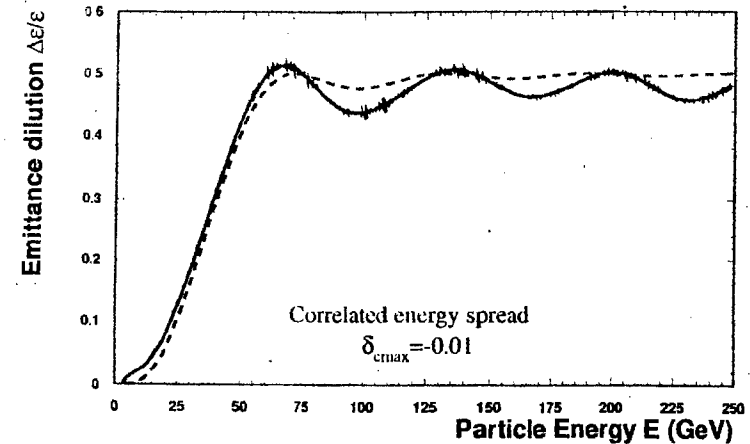


Рис.6 Относительное коррелированное дисперсионное уширение эмитанса пучка в основном линейном ускорителе *SBLC*. Сплошная линия - результаты трека частиц, пунктирная линия - аналитический подход.

В третьей главе исследован и предложен метод подавления некоррелированного дисперсионного уширения эмитанса пучка на основе начального перераспределения частиц сгустка на фазовой плоскости в бездисперсионной арке, включающей секступольные линзы. Суть метода заключается в следующем. Как известно, при когерентных колебаниях пучка, частицы сгустка с различными некоррелированными начальными отклонениями энергии от равновесной, имеют различные частоты бетатронных колебаний в ускорителе и поэтому расщепляются на фазовой плоскости поперечных бетатронных колебаний (рис.7а). Частицы с высокой энергией имеют меньшую частоту бетатронных колебаний, тогда как частицы с низкой энергией имеют частоту бетатронных колебаний выше частоты колебаний равновесной частицы. Это обусловлено естественной отрицательной хроматичностью фокусирующей системы линейного ускорителя. Причем среднеквадратичный набег фазы неравновесной частицы обычно не превосходит единицы. Тогда, пропустив начальный сгусток с некоррелированным начальным сгустком через бездисперсионную арку с положительной хроматичностью, обеспечиваемой секступольными линзами, частицы сгустка перераспределяются на фазовой плоскости поперечных колебаний обратно процессу расщепления пучка в основном ускорителе (рис.7б). По мере ускорения, неравновесные частицы на фазовой плоскости будут стремиться к равновесной частице за счет отрицательной хроматичности фокусирующей системы основного ускорителя.

Положительный набег фазы $\Delta\mu$ в бездисперсионной арке обеспечивается парой секступольных линз, расположенных за фокусирующими квадрупольными линзами. Набег фазы между квадрупольными и силами секступольных линз связаны при этом соотношениями

$$R_1 \eta_1 \beta_1 = R_2 \eta_2 \beta_2$$

$$\sigma, R_1 \eta_1 \beta_1 I_{\text{сек}} = \Delta\mu$$

$$\phi(z_2) - \phi(z_1) = \frac{\pi}{2}$$

где R - сила секступольной линзы, η - функция дисперсии, β - бетатронная функция, ϕ - фаза бетатронных колебаний. Поведение среднеквадратичного эмитанса в основном ускорителе при предварительном перераспределении пучка показано на рис. 8.

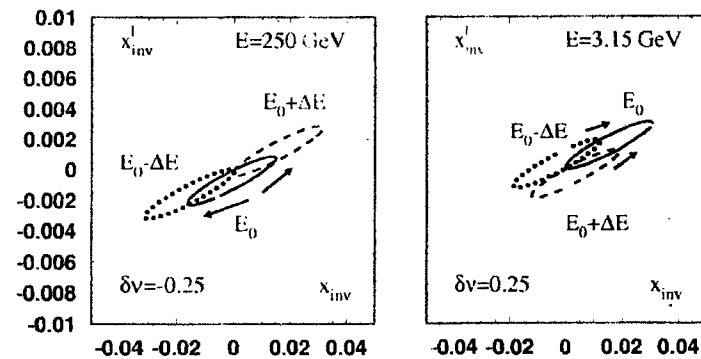


Рис.7 Фазовые эллипсы равновесной и неравновесных частиц: а) уширение эмитанса пучка в конце линейного ускорителя, б) начальное перераспределение фазовых эллипсов в ахроматичной системе с положительной хроматичностью.

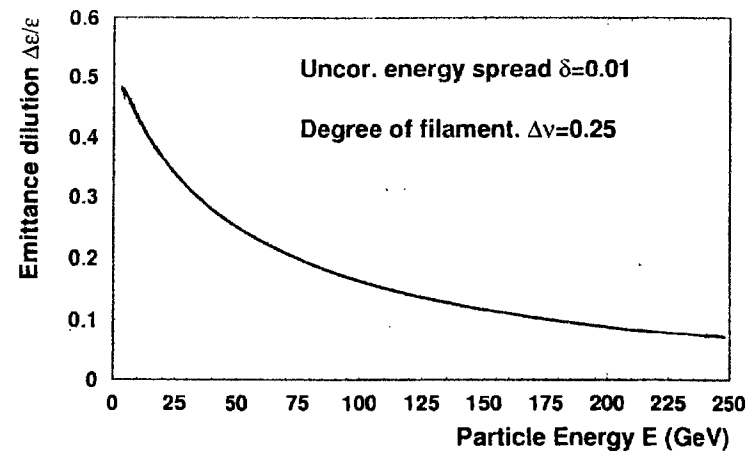


Рис.8 Подавление некоррелированного дисперсионного уширения эмитанса пучка вдоль ускорителя при положительной начальной хроматичности пучка (трек частиц).

Важным следствием, является что начальное дисперсионное уширение эмитанса сопровождается затуханием начальных когерентных колебаний пучка и как следствие приводит к подавлению поперечных кильватерных полей, вызванных когерентными бетатронными колебаниями пучка вдоль основного ускорителя. На рис.9 приведены когерентные колебания центра тяжести пучка в основном ускорителе *SBLC* без системы формирования пучка (9а) и с предварительным перераспределением пучка на фазовой плоскости в бездисперсионной арке с положительной хроматичностью (9б). Амплитуда колебаний на начальной стадии ускорителя до 50ГэВ, где наиболее критичны одногустковая и многогустковая неустойчивости пучка, затухает почти на два порядка.

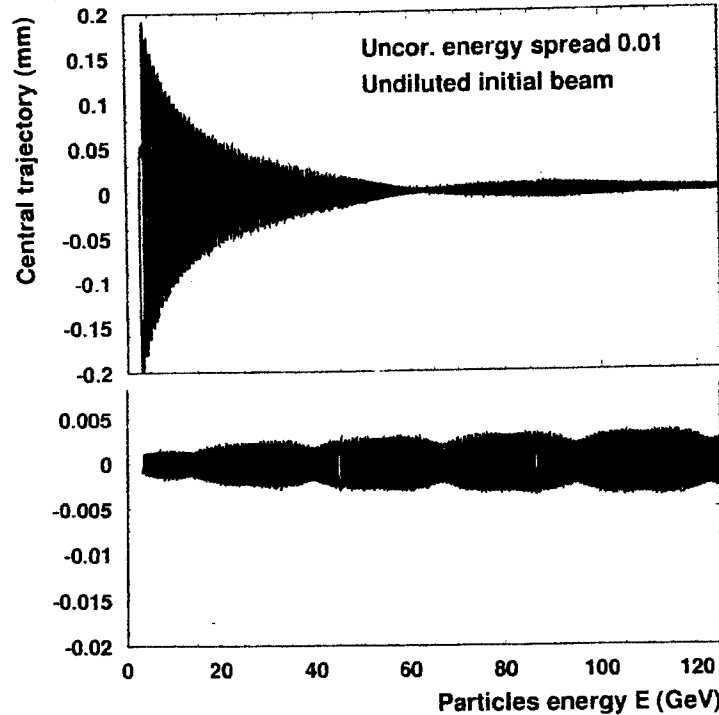


Рис.9 Когерентные колебания пучка вдоль ускорителя: а) без предварительного формирования пучка, б) с предварительным формированием пучка в ахроматической арке с положительной хроматичностью.

Наиболее важные моменты, отраженные в этой главе, таковы:

- предложен и исследован метод предварительного перераспределения частиц на фазовой плоскости для подавления дисперсионного уширения эмитанса пучка, вызванного некоррелированным начальным энергетическим разбросом частиц в пучке;
- проанализированы основные требования к ахроматичной системе формирования пучка, включающей секступольные линзы;
- показано, что перераспределение частиц сопровождается подавлением амплитуды когерентных бетатронных колебаний в низкоэнергетической части ускорителя.

В четвертой главе подробно рассмотрена одногустковая и многогустковая нестабильности пучка в линейном ускорителе в зависимости от закона изменения набег фазы бетатронных колебаний в основном ускорителе.

Показано, что в первом приближении по когерентным колебаниям частиц, когда ведущие частицы не испытывают поперечного кильватерного поля, а последующие частицы испытывают изменение поперечного импульса за счет поперечной силы кильватерного поля, увеличение эмитанса пучка в обоих случаях, определяется соотношением

$$\Delta \varepsilon = \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{e Q \sigma_w L_c}{2G} \right)^2 \frac{\gamma}{\gamma'} F^2(g, \alpha)$$

где ведущий член $F(g, \alpha)$ определяется электронно-оптической системой ускорителя и при заданном законе изменения набег фазы имеет вид

$$F(g, \alpha) = \frac{1}{2\alpha g \frac{\mu_1}{2}} \left[(g^\alpha - 1) - ig^2 \frac{\mu_1}{2} (g^\alpha - 1) \right]$$

Важным следствием полученной формулы является возможность контроля одногустковой и многогустковой нестабильностей пучка выбором набег фазы бетатронных колебаний в начале ускорителя и законом изменения его вдоль ускорителя. На рис.10 приведена величина фактора уширения эмитанса пучка F^2 в зависимости от требований к фокусирующей системе. Показаны случаи:

- а) общепринятой фокусировки с постоянным набегом фазы, но с амплитудной бетатронной функцией меняющейся как корень квадратный с энергией частиц (пунктирная линия), б) фокусировка с постоянным набегом фазы и амплитудной функцией, периодической вдоль ускорителя (точечная линия), в) переменным набегом

фазы, определяемым изменением хроматичности как корень квадратный с энергией (сплошные линии). Видно, что правильный выбор фокусирующей системы во многом будет определять устойчивость пучка вдоль ускорителя.

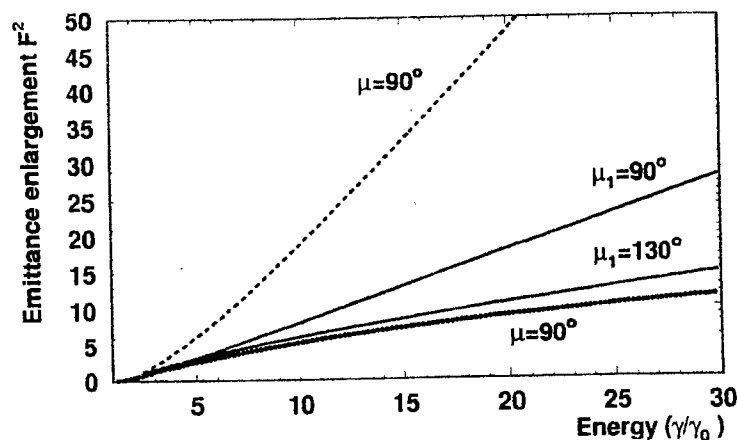


Рис 10. Уширение среднеквадратичного эмитанса пучка (односгустковая и многосгустковая неустойчивости пучка) при: а) изменении бетатронной функции как корень квадратный от энергии (пунктирная линия), б) бетатронная функция не зависит от энергии (точечная линия), в) изменение хроматичности как корень квадратный от энергии (сплошные линии).

Одним из важных подходов к проблеме сохранения эмитанса пучка в линейных ускорителях является обеспечение автофазировки частиц внутри сгустка для подавления односгустковой неустойчивости пучка.

Известное решение автофазировки частиц предполагает изменение амплитудной функции ускорителя с энергией частиц. Однако, такой подход одновременно с подавлением односгустковой неустойчивости приводит к раскачке многосгустковой неустойчивости, что значительно усложняет проблему сохранения среднеквадратичного эмитанса пучка в основном ускорителе. В диссертации

подробно исследована проблема автофазировки частиц при изменении набега фазы бетатронных колебаний с энергией частиц.

Показано, что условия автофазировки выполняются при изменении набега фазы бетатронных колебаний согласно закону

$$1g \frac{\mu_n}{2} = 1g \frac{\mu_1}{2} \left(\frac{\gamma_u}{\gamma_n} \right)^{1/2}$$

сохраняя при этом малым амплитуду бетатронных колебаний посредством выбора набега фазы бетатронных колебаний за первый период порядка 130 градусов. Как следствие, существенно подавляется многосгустковая неустойчивость пучка. При этом требования к коррелированному энергетическому разбросу внутри сгустка также существенно облегчаются

$$\delta_c = - \frac{C_w L_{acc} L_c}{41g^2 \mu_1 / 2}$$

На рис.11 приведен требуемый начальный и текущий коррелированный энергетический разбросы частиц внутри сгустка (в двухчастичной модели сгустка) и фактор уширения эмитанса при десятикратном увеличении энергии пучка в зависимости от набега фазы на первой ячейке фокусирующей системы. Видно, что начальный набег фазы бетатронных колебаний $\mu_1 \approx 130^\circ$ является оптимальным, как с точки зрения выполнения условий автофазировки частиц внутри каждого сгустка, так и с точки зрения стабилизации многосгустковой неустойчивости пучка. Основные результаты этой главы:

- получены аналитические выражения для среднеквадратичного увеличения эмитанса пучка, вызванного когерентными колебаниями пучка и поперечными кильватерными полями, при варировании набега фазы бетатронных колебаний вдоль ускорителя;
- показано, что односгустковая и многосгустковая неустойчивости пучка существенно зависят от выбора набега фазы в начале ускорителя и закона его изменения вдоль ускорителя;
- найдены условия автофазировки частиц в сгустке при изменении набега фазы бетатронных колебаний вдоль ускорителя;
- показано, что подавление односгустковой неустойчивости бетатронных колебаний сопровождается одновременным ослаблением многосгустковой неустойчивости при выборе фазы начальных бетатронных колебаний 130 градусов;

- показано, что новый подход к автофазировке частиц на основе изменяющегося с энергией частиц набега фазы бетатронных колебаний, существенно уменьшает требуемый коррелированный энергетический разброс частиц в сгустке.

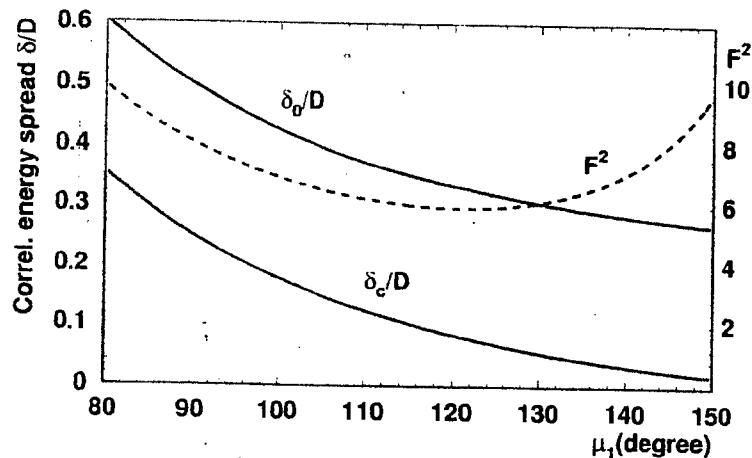


Рис.11 Начальный и текущий коррелированный энергетические разбросы в сгустке при автофазировке (сплошная линия) и фактор уширения эмитанса пучка в многосгустковом режиме.

В главе пятой исследованы некоторые проблемы сохранения эмитанса пучка при неточности установки фокусирующих линз и ускоряющих секций вдоль ускорителя. Рассмотрено возмущение центральной траектории пучка вызванное неточностью установки квадрупольных линз вдоль ускорителя и коррекция центральной траектории от линзы к линзе.

Показано, что решение уравнения движения, соответствующее возмущенной центральной траектории пучка, можно представить в виде

$$x_k(z) = \sqrt{\frac{\beta(z)}{\Gamma(z)}} \sum_k K_k L_{qk} x_k \sqrt{\beta_k \Gamma_k} \sin[\phi(z) - \phi(z_k)]$$

где $\beta(z), \phi(z)$ - текущие значения амплитудной функции и фазы поперечных бетатронных колебаний, L_{qk} - длина квадрупольной линзы. Величины с индексом k

соответствуют их значениям в k -ом квадруполе. Предполагается, что случайные отклонения линз от оси не коррелированы друг с другом и следовательно перекрестные члены не дают вклада в среднеквадратичное смещение центральной траектории ($\langle x_k x_l \rangle = 0$ при $k \neq l$)

$$\langle x_k \rangle = \langle x_k^2 \rangle > \frac{\beta(z)}{\Gamma(z)} \sum_k K_k^2 L_{qk}^2 \beta_k \Gamma_k \sin^2[\phi(z) - \phi(z_k)]$$

где $\langle x_k^2 \rangle$ - среднеквадратичное смещение центров линз относительно оси. На этой стадии введен, аналогично свободным бетатронным колебаниям частиц, среднеквадратичный возмущенный текущий фазовый эллипс пучка

$$\gamma \langle x_c^2 \rangle + 2\alpha \langle x_c x_c' \rangle + \beta \langle x_c'^2 \rangle = A^2$$

где A^2 есть площадь возмущенного фазового эллипса (деленная на π). Получено точное аналитическое выражение для площади возмущенного фазового эллипса

$$A^2 = 8 \frac{\langle x_q^2 \rangle E_0}{L_c^2 \Delta E} \frac{\mu}{2} \frac{E_0}{E(z)} \left[\left(\frac{E(z)}{E_0} \right)^2 - 1 \right]$$

где $E_0, E(z)$ - начальная и текущая равновесная энергия пучка, ΔE - прирост энергии на единицу длины. Среднеквадратичное смещение линз связано с допуском a_q соотношением $a_q^2 = 3 \langle x_q^2 \rangle$.

На рис.12 приведено изменение площади среднеквадратичного возмущенного фазового эллипса вдоль основного ускорителя **SBLC** для 25, 50 и 100 наборов случайных равновероятных отклонений линз от оси и аналитическое предсказание. Как мы видим, результаты трека частиц хорошо согласуются с аналитическим при проведении усреднения среднеквадратичной возмущенной траектории по 100 и более наборам смещений линз. Заметим также, что даже при усреднении по 50 наборам отклонений, среднеквадратичный фазовый эллипс значительно расходится с реальным при энергиях электронов более 100 ГэВ, что необходимо иметь в виду при интерпретации результатов трека частиц для определения среднеквадратичного уширения эмитанса пучка на выходе из ускорителя.

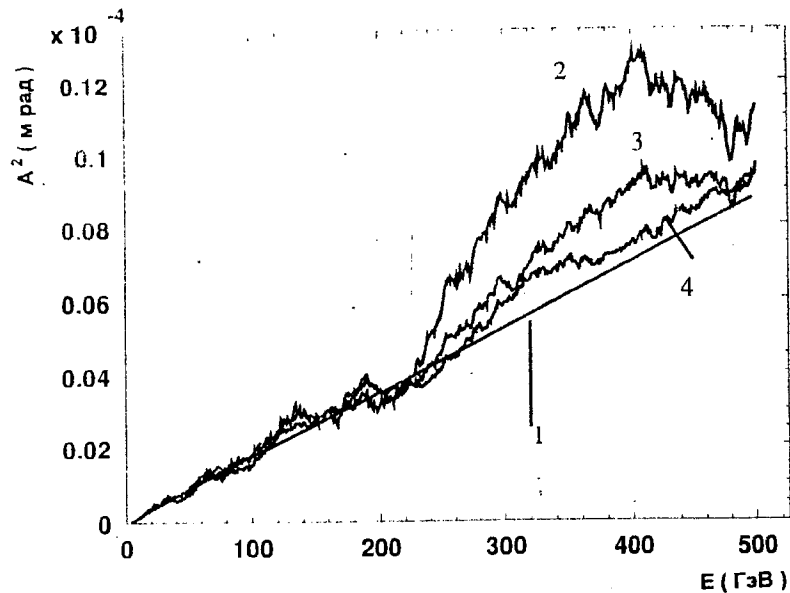


Рис.12 Изменение площади возмущенного фазового эллипса вдоль основного ускорителя линейного коллайдера **SBLC**. 1- аналитическое представление; 2- усреднение по 25 наборам отклонений, 3- усреднение по 50 наборам, 4 усреднение по 100 наборам случайных отклонений линз от оси.

Ясно, что необходима коррекция центральной траектории пучка в линейном ускорителе. В работе подробно исследована коррекция центральной траектории от линзы к линзе. Получена аналитическая оценка для величины дисперсионного уширения пучка в общем случае изменения набега фазы бетатронных колебаний вдоль ускорителя, которая определяется формулой

$$\Delta \varepsilon = 8\delta_0^2 \frac{\langle \Delta x_q^2 \rangle}{L_0} \frac{\gamma_0}{\Delta \gamma} \frac{H_1}{2} \frac{1}{\alpha} g(1-g^2)$$

и хорошо согласуется с результатами трека частиц в ускорителе.

Далее в той же главе рассмотрено уширение эмитанса пучка, вызванного неточностью установок ускоряющих секций вдоль ускорителя. Получено выражение для среднеквадратичного увеличения эмитанса с фактором уширения

$$f(g, \alpha) = \frac{1}{\alpha} g^2 (1-g^2)$$

Нестабильная область по α при этом смещается в область $\alpha < 1$.

Основные результаты этой главы :

- введен возмущенный фазовый эллипс ускорителя, площадь которого имеет точное аналитическое выражение, определяемое основными параметрами ускорителя и среднеквадратичным смещением квадрупольных линз;
- найдено физически обоснованное условие достоверности результатов трека частиц в ускорителе при случайном задании смещений квадрупольных линз от оси;
- получено выражение для среднеквадратичного уширения эмитанса при коррекции центральной траектории от линзы к линзе;
- исследованы неточности установки ускоряющих секций и показано, что при аналогичных условиях, эффект уширения на порядок меньше чем при когерентных колебаниях пучка;

В шестой главе исследованы эффекты кильватерного поля в области финальной фокусировки частиц. Рассмотрено влияние на динамику пучка поперечных полей, возбуждаемых при влете и вылете сгустка из квадрупольной линзы с апертурой порядка 1мм. Исследовано влияние конечной проводимости стенок на деформацию пучка в точке финальной фокусировки. Показано, что в таких структурах доминирующими являются эффекты кильватерного поля, вызванные конечной проводимостью стенок.

В седьмой главе исследованы вопросы уширения эмитанса пучка в начальной секции тестового ускорителя и условия формирования начального фазового распределения частиц для эффективного ускорения частиц. Результаты данной главы легли в основу при выборе системы фокусировки тестового ускорителя **SBLC**.

Заключение содержит перечисление основных результатов работы.

На основе проведенных исследований, выдвинут и обоснован новый метод ускорения кильватерным полем с высоким коэффициентом трансформации, возбуждаемым последовательностью гауссовских сгустков в диафрагмированной ускоряющей структуре.

Предложена и исследована концепция фокусировки вдоль линейного ускорителя на основе изменяющейся с энергией частиц набега фазы поперечных бетатронных колебаний. Получены аналитические выражения для эффектов уширения эмитанса и разработана методика определения параметров электронно-оптической системы ускорителя.

Предложен и исследован метод подавления некоррелированного дисперсионного уширения эмитанса пучка в линейных ускорителях. Подход основан на предварительном перераспределении частиц сгустка на фазовой плоскости в бездисперсионной арке, включающей секступольные линзы, для обеспечения положительной хроматичности пучка.

Исследован и предложен метод автофазировки частиц на основе изменяющейся с энергией частиц набега фазы бетатронных колебаний, позволяющей подавить односгустковую неустойчивость пучка с одновременной стабилизацией многосгустковой неустойчивости. Показано, что предложенный метод имеет существенные преимущества по сравнению с известными до сих пор подходами.

Исследованы эффекты кильватерного поля в области финальной фокусировки частиц.

*Список основных работ, опубликованных по теме
диссертации*

1. Коэффициент трансформации в схеме ускорения кильватерными полями, Препринт ЕрФИ -893(44)-86, Ереван, 1986.
2. E.M. Laziev, V.M. Tsakanov, Few aspects of excitation of the wake waves in accelerating structures, Proc. of the Linac-86, Vancouver, SLAC-Rep.-303, 1986, pp.578-580.
3. С.С. Ваганян, Э.М. Лазиев, В.М. Цаканов, Генерация кильватерных электромагнитных полей с высоким коэффициентом трансформации. Препринт ЕрФИ -1040 (3), Ереван, 1988.

4. Th.Weiland, P.Shutt and V.M.Tsakanov, On the wakefield acceleration using the sequence of driving bunches, DESY M-88-13, December, 1988.
5. E.M.Laziev, V.M.Tsakanov, The comparison of the some wakefield acceleration schemes, Proc. of the 12 Intern. Conf. On HEAC, Novosibirsk, 1988, p.141-143
6. Э.М. Лазиев, В.М. Цаканов, Ускорение заряженных частиц в полях, возбуждаемых системой сгустков в резонаторах со сложным поперечным сечением, ВАНТ 7(15), 1990, с. 32-36.
7. B.Dwersteg, H.Hartwig, M.Drewlac..., V.M.Tsakanov, Structure Work for an S-Band Linear Collider, Proc. XV HEACC Conf., Int. Journ. Mod. Phys. A 2A (1993), p.830-832.
8. H.G. Beyer, N.Holtcamp, U. Van-Rienen ..., V.M.Tsakanov, Modal Field Matching in tapered Multicell structure, Proc. XV HEACC Conf., Int. Journ. Mod. Phys. A 2A (1993), p.845-848.
9. H.G. Beyer, M.Drevlac, Th. Weiland ..., V.M.Tsakanov, Attenuation of transverse modes by variable cell geometries in travelling wave tubes, Proc. XV HEACC Conf., Int. Journ. Mod. Phys. A 2A (1993), p.876-878.
10. H.G. Beyer, N.Holtcamp, U. Van-Rienen, V.M.Tsakanov, Th. Weiland, Wake fields effects in final focus quadrupoles in next linear collider, Proc. XV HEACC Conf., Int. Journ. Mod. Phys. A 2A (1993), p.851-854.
11. H.G. Beyer, M.Drevlac, R. Wanzenberg ..., V.M.Tsakanov, Single and multibunch instabilities in a 2X 250 GeV Linear collider, Proc. XV HEACC Conf., Int. Journ. Mod. Phys. A 2A (1993), p.855-857.
12. V.M.Tsakanov, New Acceleration Methods, Proc. XV HEACC Conf., Int. Journ. Mod. Phys. A 2A (1993), p.476-484. (survey).
13. V.M. Tsakanov, Some analytical approaches on the emittance dilution in linear collider, DESY M-95-09, July 1995.
14. V.M. Tsakanov, Emittance dilution of the correlated energy spread, single bunch instability and lattice scaling in linear collider, DESY M-96-02, 1996.
15. V.M. Tsakanov, On the energy exchange of the ultrarelativistical particles in wakefields, DESY M-96-23, 1996.
16. V.M. Tsakanov, The reduction of the uncorrelated dispersive effects on the emittance dilution in linear colliders, Nucl. Instr. Methods A (to be published).
17. В.М. Цаканов, Возмущенный фазовый эллипс и трек частиц в линейных ускорителях на сверхвысокие энергии, ЖТФ (в печати).
18. V.M. Tsakanov, Autophasing and lattice scaling in high energy linear accelerators, Phys. Rev. Spec. Topics -Accel. And Beams, V. 1, 041001 (1998).

Vasili M. Tsakanov
*High Gradient Wakefield Acceleration of Charged Particles and the Dynamics
of Low Emittance Beams*

Resume

The work is connected to wakefield generation with high transformation ratio by the intensive charged particles beams and dynamics of low emittance electron beams.

The main contributions are as follows.

Based on the carry out study, the new wakefield acceleration concept with high transformation ratio driven by the train of the gaussian bunches is proposed.

The new concept of the focusing lattice scaling along the linear accelerators has been developed. The basic approach is the scaling of the phase advance per cell with the particles energy instead of the usual beta scaling. The analytical expressions for the dispersive and wakefields emittance dilution are obtained. The procedure to define the linear optics of the machine is developed.

The new method developed to suppress uncorrelated dispersive emittance dilution in high energy linear accelerators. The method based on the pre-dilution of the beam at the stage of the injection at the achromatic arc cell with positive chromaticity.

The new autophasing solution, based on the chromaticity scaling along the linac, is obtained. The new solution allowed to suppress the single bunch instability keeping small the amplitude of coherent betatron oscillation, which in turn reduces the multibunch beam instability. It is shown, that the new approach has a significant advantages with the respect to required correlated energy spread and the multibunch beam dynamics.

Վասիլի Մկրտչի Ցականով

ԼԻՑԻԱՎՈՐԱԿԱՆ ՄԱՏԻՒՆՆԵՐԻ ԲԱՐՉՐ-ԳՐԱԳԻՆՆՏԱՅԻՆ ՔԻՎԱՏԵՐԱՅԻՆ
ԱՐԱՎԱՅՈՒՄ Ե ՓՈՔՐ ԷՄԻՏԱՆՍՈՎ ՓՆՁԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱՆ

Անփոփում.

Աշխատանքը նվիրված է լիցքավորված մասնիկներից բաղկացած թանձրուկների առաջացրած և տրանսֆորմացիայի մեծ Գործակից ունեցող քիվաթերային դաշտերի և փոքր լայնական էմիթանս ունեցող էլեկտրոնային փնջերի դինամիկայի խնդիրները:

Կատարված հետազոտությունների արդյունքների հիման վրա առաջադրվում և հիմնավորվում է արագացման նոր եղանակ քիվաթերային դաշտում, որն ունի տրանսֆորմացիայի մեծ Գործակից և Գրգռված է Գաուսյան փնջերի տարբերական հաջորդականությամբ՝ դիաֆրագմված արագացուցչային համակարգում:

Առաջարկված և հետազոտված է Գծային արագացուցչի երկայնքով փնջերի կիզակետման խնդիրը՝ հիմնված մասնիկների էներգիայի կախման վրա լայնական բետատրոնային տատանումների հաճախականությունից: Ստացվել են էմիթանսի լայնացման համար անալիտիկական արտահայտություններ և մշակված է արագացուցչի էլեկտրոնաօպտիկական համակարգի որոշման եղանակը:

Առաջարկված և հետազոտված է Գծային արագացուցիչներում փնջի էմիթանսի չկոռելացված դիսպերսիայի լայնացմանը հակազդող եղանակ: Այս եղանակը հիմնված է թանձրուկում ոչ դիսպերսիային աղեղում տեղակայված սեքսթուփոլային ոսպնյակներով մասնիկների վերաբաշխման եղանակի վրա՝ սրանց փուլային հարթության մեջ, ինչը ապահովում է փնջի դրական մոնոքրոմատիկացումը:

Առաջարկված և հետազոտված է մասնիկների ինքնափուլավորման եղանակը՝ հիմնված բետատրոնային տատանումների փոփոխական հաճախության վրա, ինչը հնարավորություն է ընձեռում մեղմել միաթանձրուկային անկայունությունը՝ միաժամանակ կայունացնելով նաև բազմաթանձրուկային համակարգը:

Նշվում են առաջարկվող եղանակի առավելությունները մինչ այժմ հայտնի եղանակների նկատմամբ:

Տպագրված է ՀՀ ԲՈՀ-ի պատվերով

Հանձնված է տպագրության 15.10.98 թ: Պատվեր 219: Տպարանակ 70:

**Տպագրված է «Դավիթ» կոոպերատիվի տպարանում:
Երևան, Տերյան 72:**