

Критерий Чирикова: экспериментальное исследование в прошлом и новые возможности в будущем

Г.Н. Кулипанов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

International Seminar dedicated to the memory of Boris V. Chirikov

Budker Institute of Nuclear Physics, May 23, 2008

Содержание

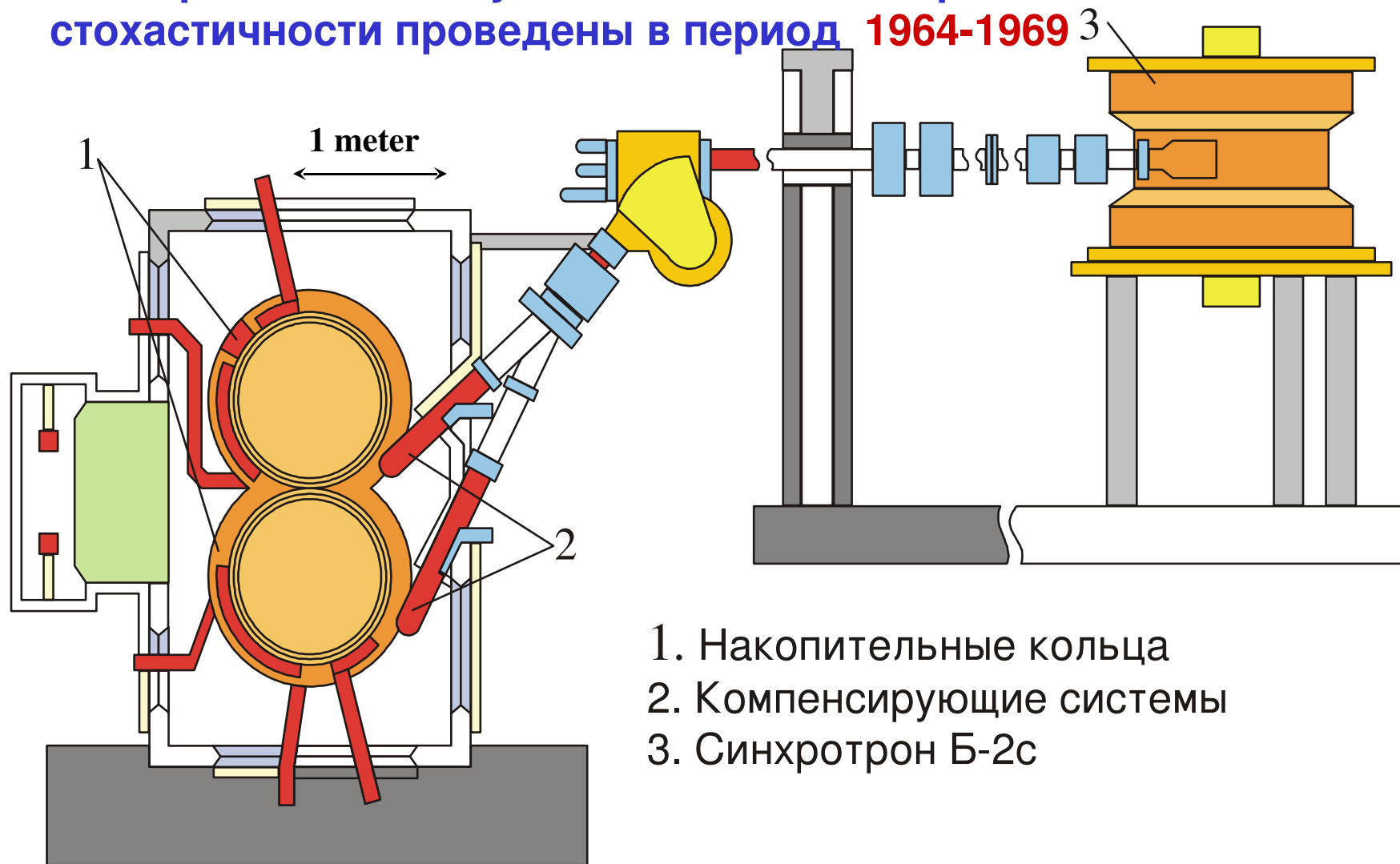
3. Электронный пучок в накопителе ВЭП-1 - идеальный нелинейный осциллятор.
4. Описание экспериментальной установки.
5. Изучение одиночного нелинейного резонанса.
6. Изучение стохастичности при совместном воздействии двух нелинейных резонансов.
7. Изучение стохастичности при периодическом пересечении нелинейного резонанса.
8. Основные экспериментальные результаты.
9. Новые возможности экспериментального изучения квантового хаоса с помощью мощного терагерцового излучения.

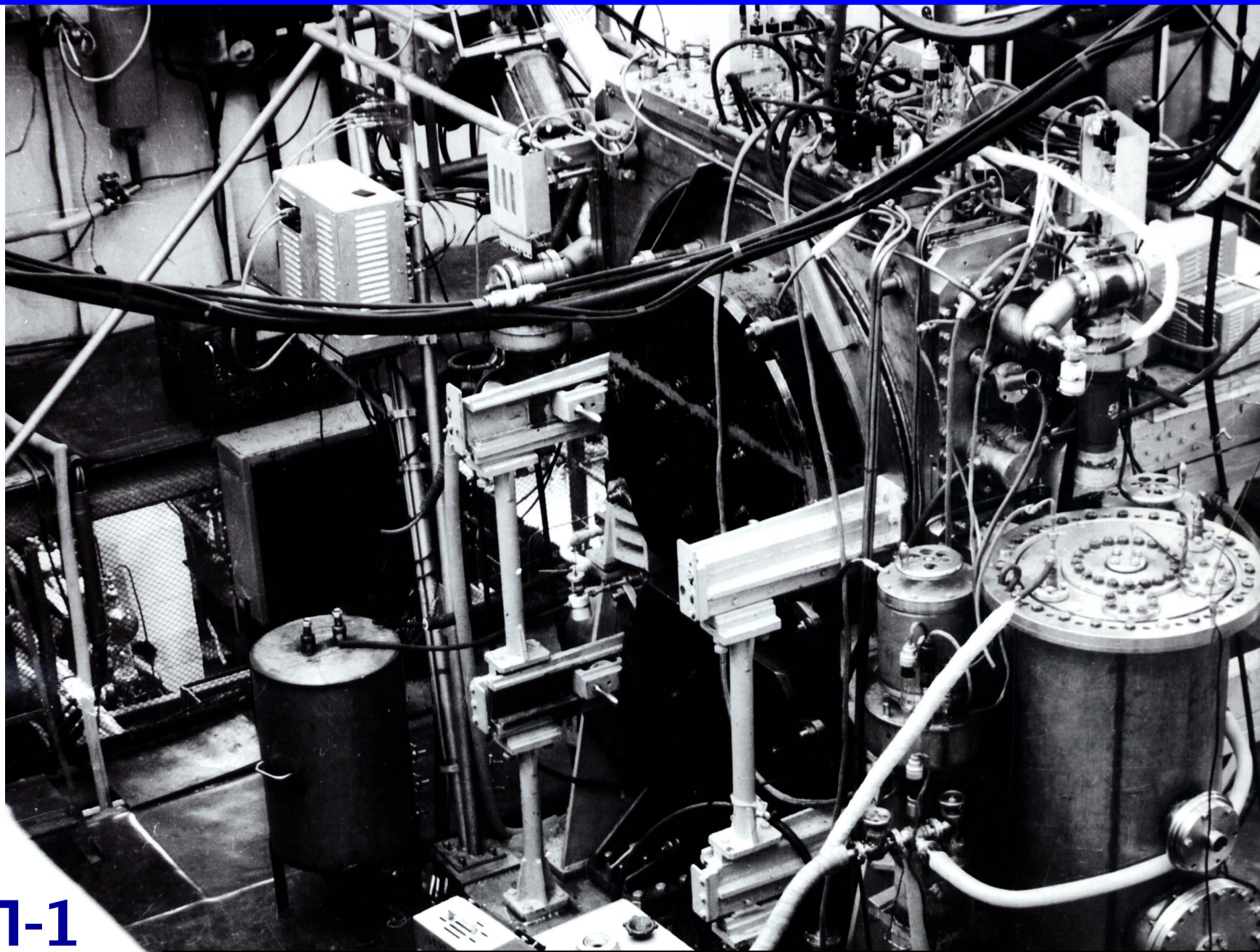
3. Электронный пучок в накопителе ВЭП-1 - идеальный нелинейный осциллятор.

Коллайдер ВЭП-1

$E = 45 \text{ MeV} - 160 \text{ MeV}$, I до 500 мА

Эксперименты по изучению нелинейных резонансов и стохастичности проведены в период 1964-1969





ВЭП-1
в действии

Начало экспериментов со встречными пучками – 1965

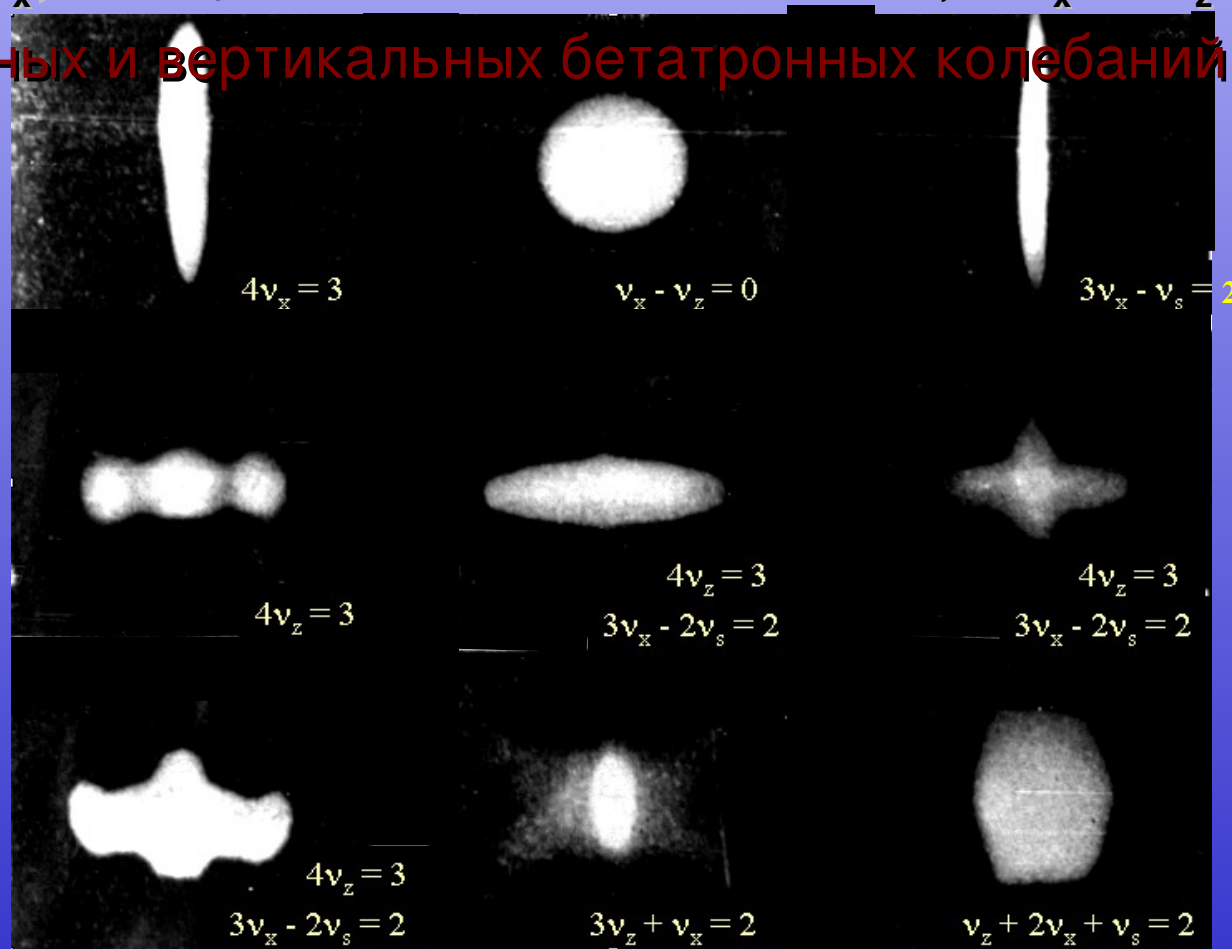
Уникальные свойства электронного пучка в накопителе ВЭП-1:

- большое время жизни;
- большое время радиационного затухания;
- высокая стабильность частот бетатронных колебаний;
- визуализация движения электронов благодаря синхротронному излучению;
- возможность точного измерения и изменения параметров электронного пучка и параметров магнитной системы накопителя.

В циклических ускорителях и накопителях, благодаря неидеальности ведущего магнитного поля, возможно возбуждение целой серии «машинных» резонансов при условии

$$m_z \nu_z + m_x \nu_x = n$$

где m_z , m_x , n - целые числа любого знака, а ν_x и ν_z - частоты радиальных и вертикальных бетатронных колебаний.



Для изучения характерных особенностей нелинейных резонансов и стохастической неустойчивости использовались не машинные резонансы, а резонансы, возбуждаемые с помощью внешней резонансной раскачки. Эти резонансы возбуждались при условии:

$$m_z v_z + m_x v_x = n - v_p$$

Подбирая необходимые значения частот раскачки v_p можно при любых значениях v_x и v_z создавать тот или иной резонанс либо несколько резонансов, изменять расстояние между резонансами по частоте.

Это дало возможность постановки ряда «настоящих» экспериментов по изучению характерных особенностей нелинейного осциллятора и позволило провести экспериментальное изучение интересных физических задач, ранее доступных только для «математических» экспериментов при численном

2. Описание экспериментальной установки.

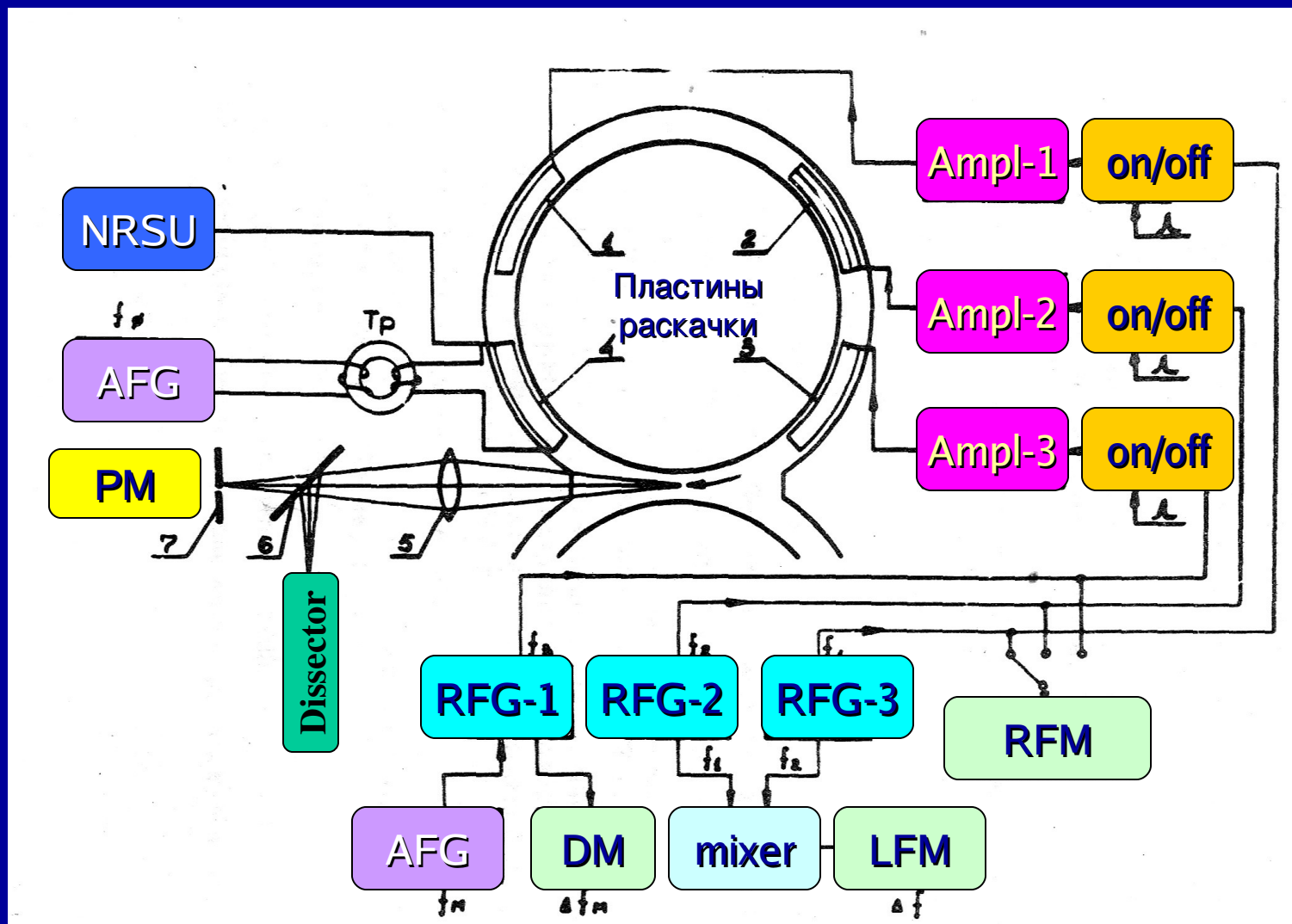


Схема оптической системы и системы возбуждения бетатронных колебаний на накопителе ВЭП-1: 1 - 4 – пластины раскочки; 5 – оптическая линза; 7 – диафрагма; NRSU- нерезонансная импульсная раскочка; AFG – генераторы звуковой частоты; RFG_{1-3} – ВЧ генераторы; $Ampl_{1-3}$ – усилители мощности; on/off – импульсные ключи; RFM- ВЧ частотомер; LFM – НЧ частотомер; DM – измеритель девиации.

В камере накопителя были расположены электроды, создающие распределение потенциала в области пучка:

$$V(x,z) = \frac{V_1}{d} (x + \varepsilon_1 z) + \frac{V_2}{d^2} (x^2 - z^2 + 2 \varepsilon_2 xz)$$

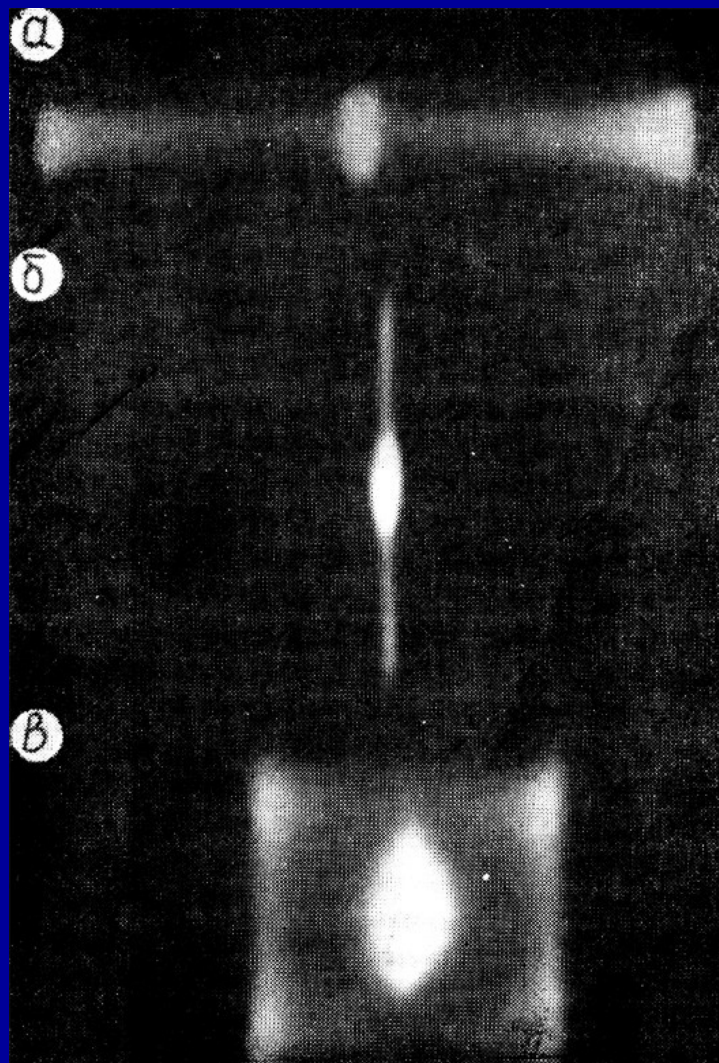
Если к этим электродам приложено ВЧ-напряжение $U = U_0 \cos 2\pi f_p t$,

то с помощью данной системы можно возбуждать резонансы при любых значениях v_x и v_z , подбирая нужным образом частоту раскачки $f_p = v_p f_0$

Обычно использовались следующие частоты:

- а) $f = f_0 (1 - v_z)$ - для возбуждения резонансов вертикальных бетатронных колебаний;
- б) $f = f_0 (1 - v_x)$ - для возбуждения резонансов радиальных бетатронных колебаний;
- в) $f = f_0 (2 - v_x - v_z)$ - для возбуждения суммового резонанса.

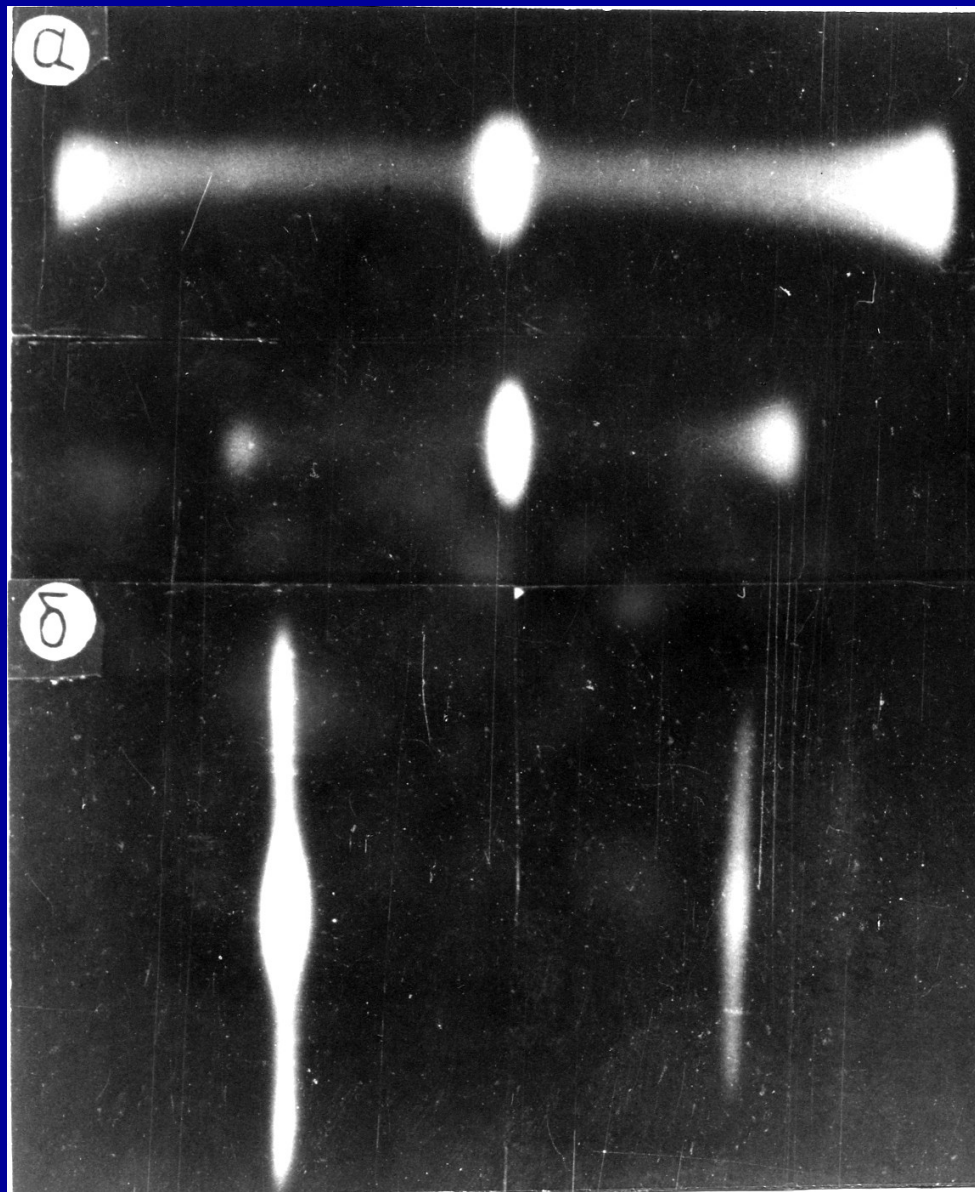
Кроме этой системы электродов в камере имелись также три пары пластин, создающих однородное поле по Z. Эти пластины использовались для одновременного возбуждения нескольких резонансов вертикальных бетатронных колебаний на частоте $f = f_0 (1 - v_z)$.



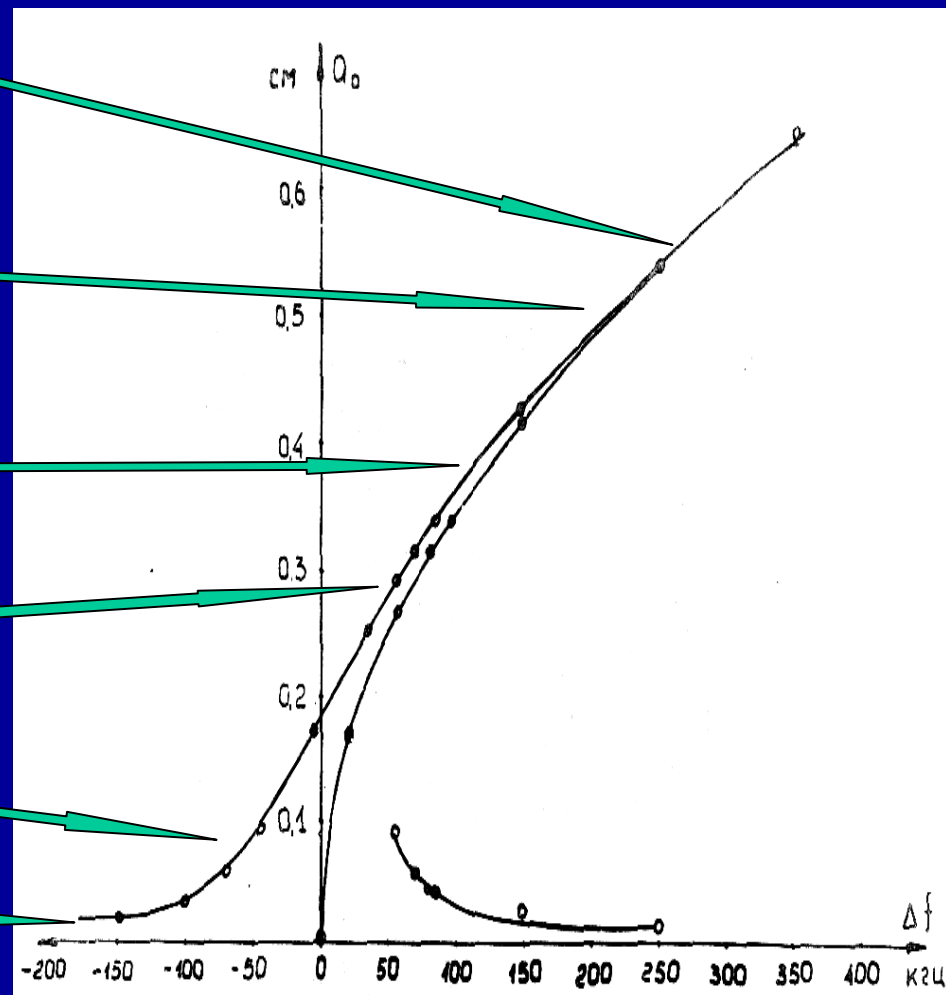
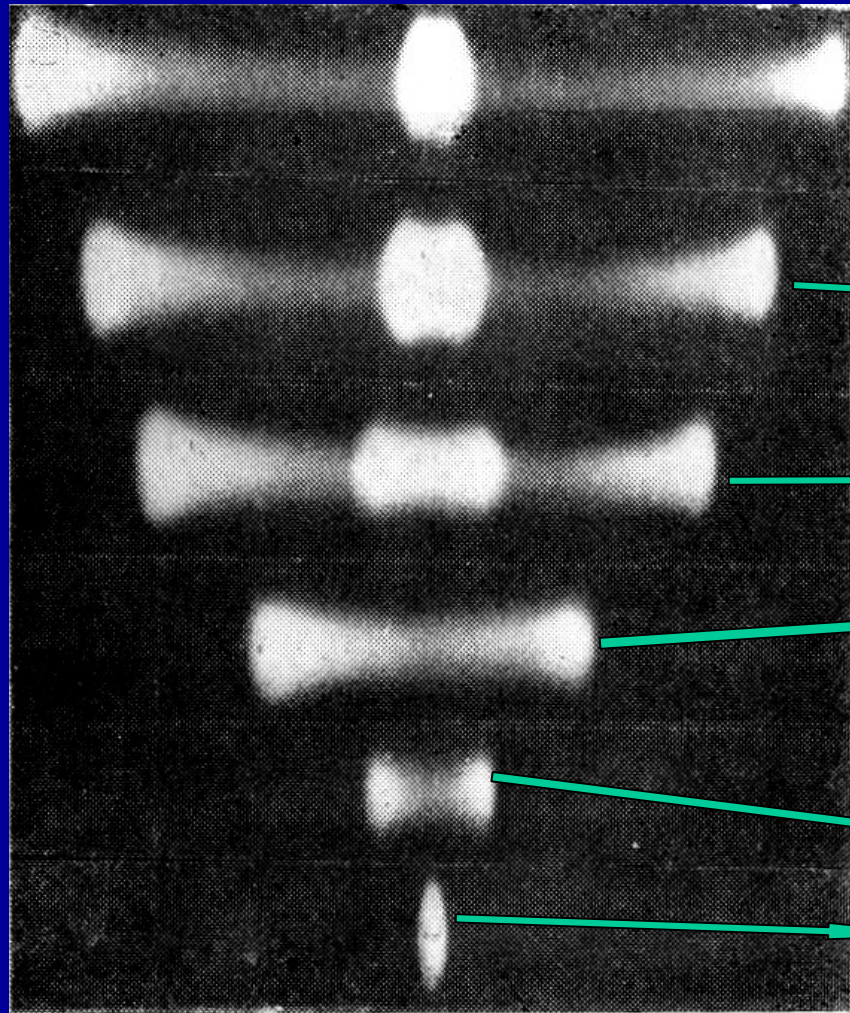
Фотографии поперечного сечения пучка при возбуждении резонансов бетатронных колебаний с помощью резонансной раскачки пучка на частотах:

$$(б) f_{\text{exc}} = f_0 (1 - \nu_z); \quad (б) f_{\text{exc}} = f_0 (1 - \nu_x);$$

$$(в) f_{\text{exc}} = f_0 (2 - \nu_x - \nu_z).$$



Фотографии пучка при возбуждении вертикальных (а) и радиальных(б) бетатронных колебаний для разных расстроек частоты.



Фотографии поперечного сечения пучка вблизи резонанса вертикальных бетатронных колебаний для разных частот раскачки.

Зависимость равновесной амплитуды области бетатронной автофазировки для резонанса вертикальных бетатронных колебаний от частоты раскачки:

- - $U_{excit} = 3 V$ ○ - $U_{excit} = 150 V$

Экспериментальное исследование нелинейных резонансов на накопителе ВЭП-выполнено на фоне ряда процессов, которые могут “замазывать” изучаемые эффекты:

- e) модуляция частоты бетатронных колебаний, обусловленная квадратичной нелинейностью и синхротронными колебаниями: $\Omega_s = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$, $\Delta\Omega_s \sim 10^5 \text{ Hz}$;
- f) нестабильность частот бетатронных колебаний, обусловленная модуляцией тока в источниках питания магнитов: $\Delta\nu/\nu \sim 4 \cdot 10^{-5}$ ($f_{\text{мод}} = 140 \text{ Hz}$ and 7 Hz);
- g) рассеяние электронов на атомах остаточного газа;
- h) квантовые флуктуации синхротронного излучения;
- i) радиационное затухание.

Все эксперименты были проведены с резонансом вертикальных бетатронных колебаний при энергии 125 MeV для минимизации суммы диффузионных процессов, обусловленных квантовыми флуктуациями синхротронного излучения и рассеянием электронов на атомах остаточного газа.

Эксперименты были проведены с основными параметрами нелинейного резонанса: f_{ph} – частота фазовых колебаний в области бетатронной автофазировки и Δa – ширина области бетатронной автофазировки :

$$f_{\text{мод}} \ll f_{ph} \ll \Omega_s$$

$$1/\tau_z \ll f_{ph}$$

$$\sigma_z \ll \Delta a$$

Параметры электронного пучка ВЭП-1 для экспериментов с контролируруемыми нелинейными резонансами.

Поперечные размеры пучка (E=125 MeV)		$2\sigma_x=0.56 \text{ mm}$
		$2\sigma_z=0.05 \text{ mm}$
Время жизни (P=4*10 ⁻⁸ torr)		$\tau \sim 600 \text{ s}$
Время затухания (E=125 MeV)		$\tau_z \sim \tau_x \sim 30 \cdot 10^{-3} \text{ s}$
Частота обращения		$f_0=110.5 \text{ MHz}$
Частоты бетатронных колебаний	$V_z=0.77$	$f_z = V_z f_0=85 \text{ MHz}$
	$V_z=0.64$	$f_z = V_z f_0=70.5 \text{ MHz}$
Частота синхротронных колебаний	$V_s=(2.7-4.5) \cdot 10^{-3}$	$\Omega_s=(3-5) \cdot 10^5 \text{ Hz}$
Характерное число колебаний за время жизни пучка		$N \sim 6 \cdot 10^{10}$
Добротность осциллятора		$\frac{\Delta v}{v} \sim 4 \cdot 10^{-5}$
Нестабильность частоты бетатронных колебаний		$\frac{\partial v}{\partial a^2} \sim (5 \pm 3) \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$

3. Изучение одиночного нелинейного резонанса.

Изучение одиночного нелинейного резонанса.

Поведение частиц вблизи нелинейного резонанса описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial a^2}{\partial \theta} = -\frac{\partial H}{\partial \Phi} = B \sin(q\Phi)$$

$$\frac{F}{q} = \frac{H}{a^2} = n - \frac{p}{q} + \frac{n}{a^2} a^2 + \frac{1}{q} \frac{B}{a^2} \cos(q\Phi)$$

$$H(a^2, \Phi) = \left(\nu - \frac{p}{q}\right) a^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial \nu}{\partial a^2} a^4 + \frac{1}{q} B(a^2) \cos(q\Phi)$$

a – амплитуда бетатронных колебаний

$\theta = \omega_0 t$ – азимутальный угол

ω_0 - частота обращения

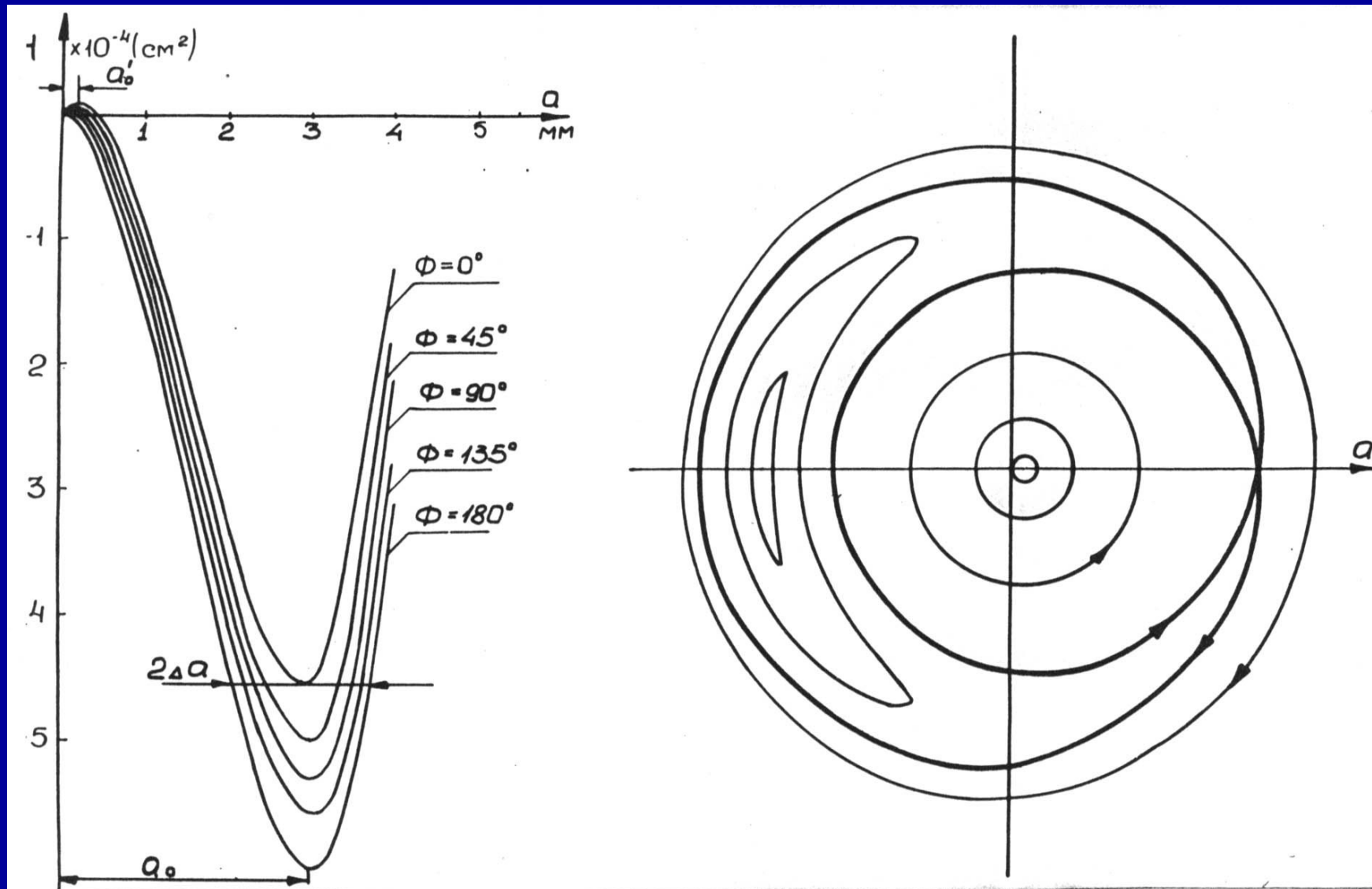
$\Psi = \theta + \Psi_0$ – фаза бетатронных колебаний

$\Phi = \Psi - r\theta/q$ – медленная фаза

r and q – целые числа

$B(a^2)$ – мощность резонанса

$\frac{\partial \nu}{\partial a^2}$ – значение кубической нелинейности



Зависимость $H(a_z)$ и фазовая диаграмма резонанса

$$v_z = 1 - v_p$$

Основные параметры нелинейного резонанса

- 1 – мощность резонанса $B (a^2)$
- 2 – равновесная амплитуда a_0
- 3 – размер области бетатронной автофазировки $2\Delta a$
- 4 – частота фазовых колебаний в области бетатронной автофазировки f_{ph}

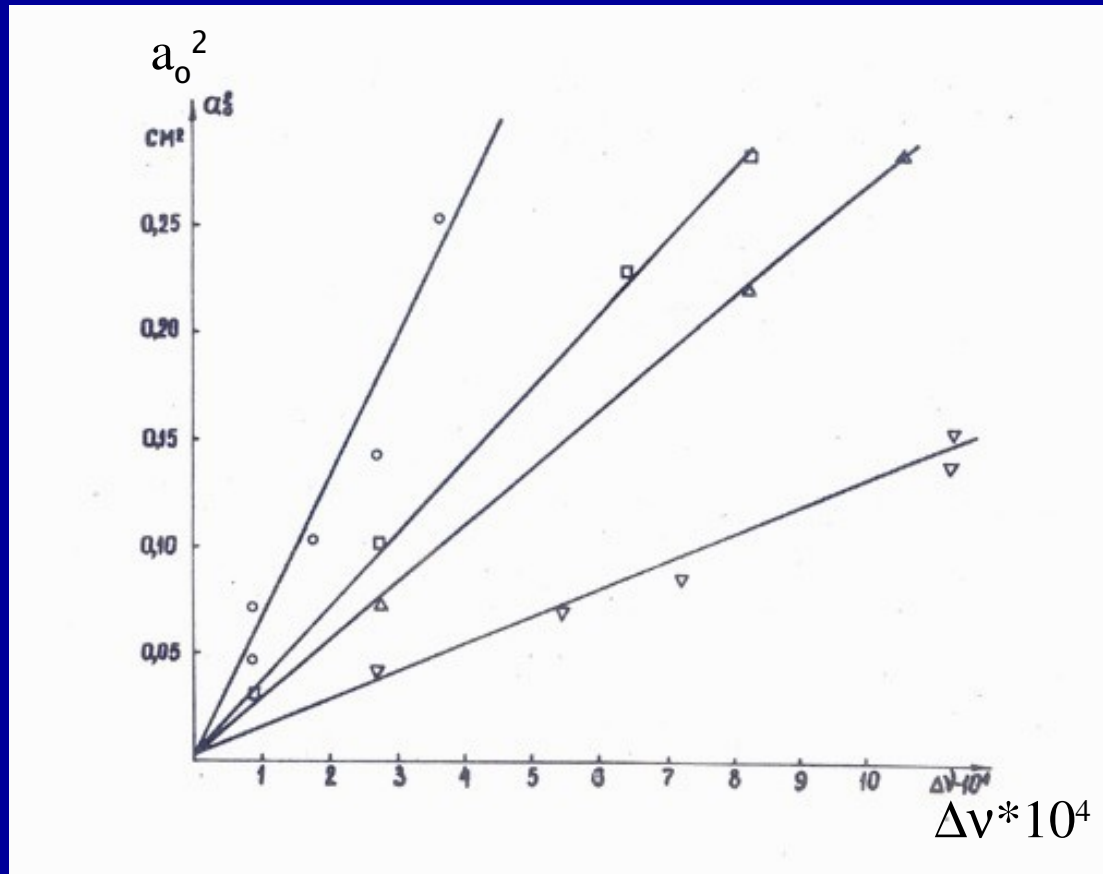
Мощность резонанса

Мощность резонанса $B(a^2)$ при возбуждении электронов с энергией E , вращающихся по окружности радиусом R под действием внешнего ВЧ напряжения $U = U_{RF} \cos \omega_0(1 - \nu)$, приложенного к специальным пластинам (длина пластины L и зазор между пластинами d):

$$B(a^2) = \frac{R^2}{E} \frac{a}{\nu} \frac{eU_{RF}}{d} \frac{\sin(L/2R)}{\pi}$$

Равновесная амплитуда

$$a_0 = \frac{\Delta \nu}{\partial \nu / \partial a^2} \quad \text{для} \quad \frac{\partial B}{\partial a^2} \ll \Delta \nu + \frac{\partial \nu}{\partial a^2} a^2$$

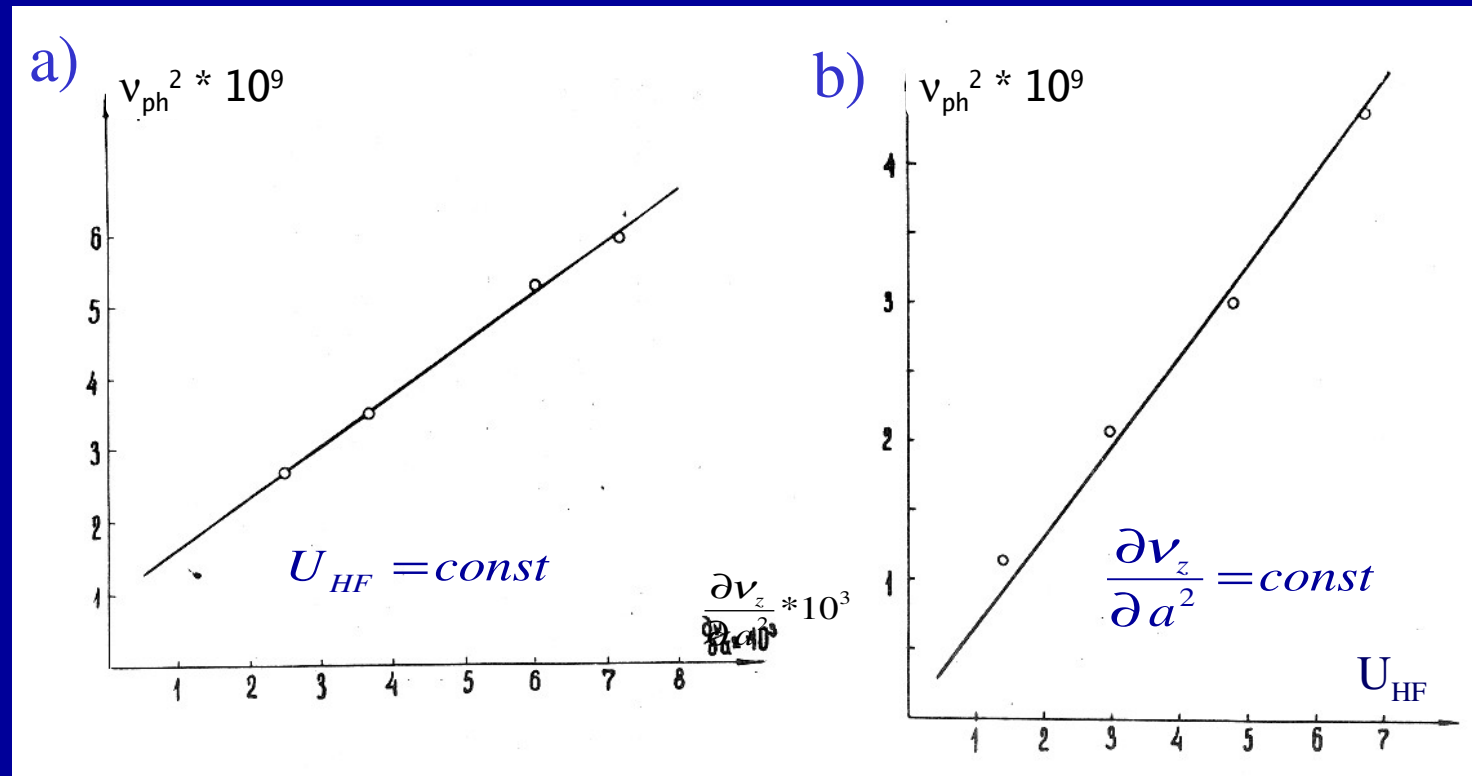


Экспериментальная зависимость равновесной амплитуды от сдвига с точного резонанса для разных нелинейностей.

Частота медленных фазовых колебаний в области автофазировки

$$\nu_{ph}^2 = -\frac{\partial^2 H}{\partial (a^2)^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \Phi^2} = B(a^2) \frac{\partial \nu}{\partial a_z^2}$$

Частоты медленных фазовых колебаний в области автофазировки ν_{ph} определялись методом модуляции частоты бетатронных колебаний.



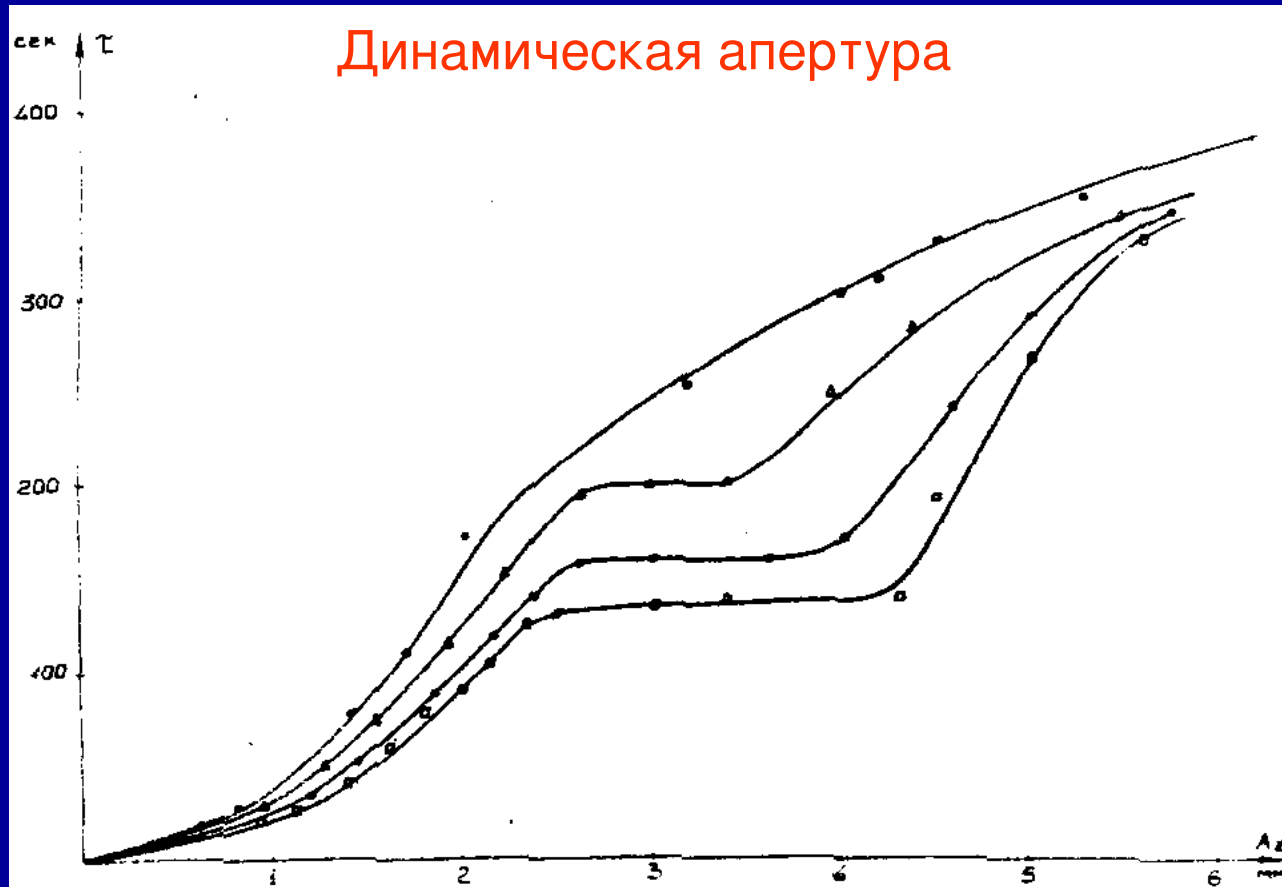
Частота медленных фазовых колебаний в области автофазировки в зависимости от:

- a) величины кубической нелинейности (under step-up voltage = const)
- b) step-up voltage (при величине кубической нелинейности = const)

Ширина области бетатронной автофазировки Δa

$$\Delta a = \frac{1}{a_0} \left(\frac{B}{\partial \nu / \partial a^2} \right)^{1/2} = \frac{1}{a_0} \frac{V_{ph}}{\partial \nu / \partial a^2}$$

τ



Время жизни пучка в зависимости от вертикальной апертуры вблизи резонанса $\nu_z = 1 - \nu_p$ with $a_0 = 3$ mm для различных значений ширины области бетатронной автофазировки

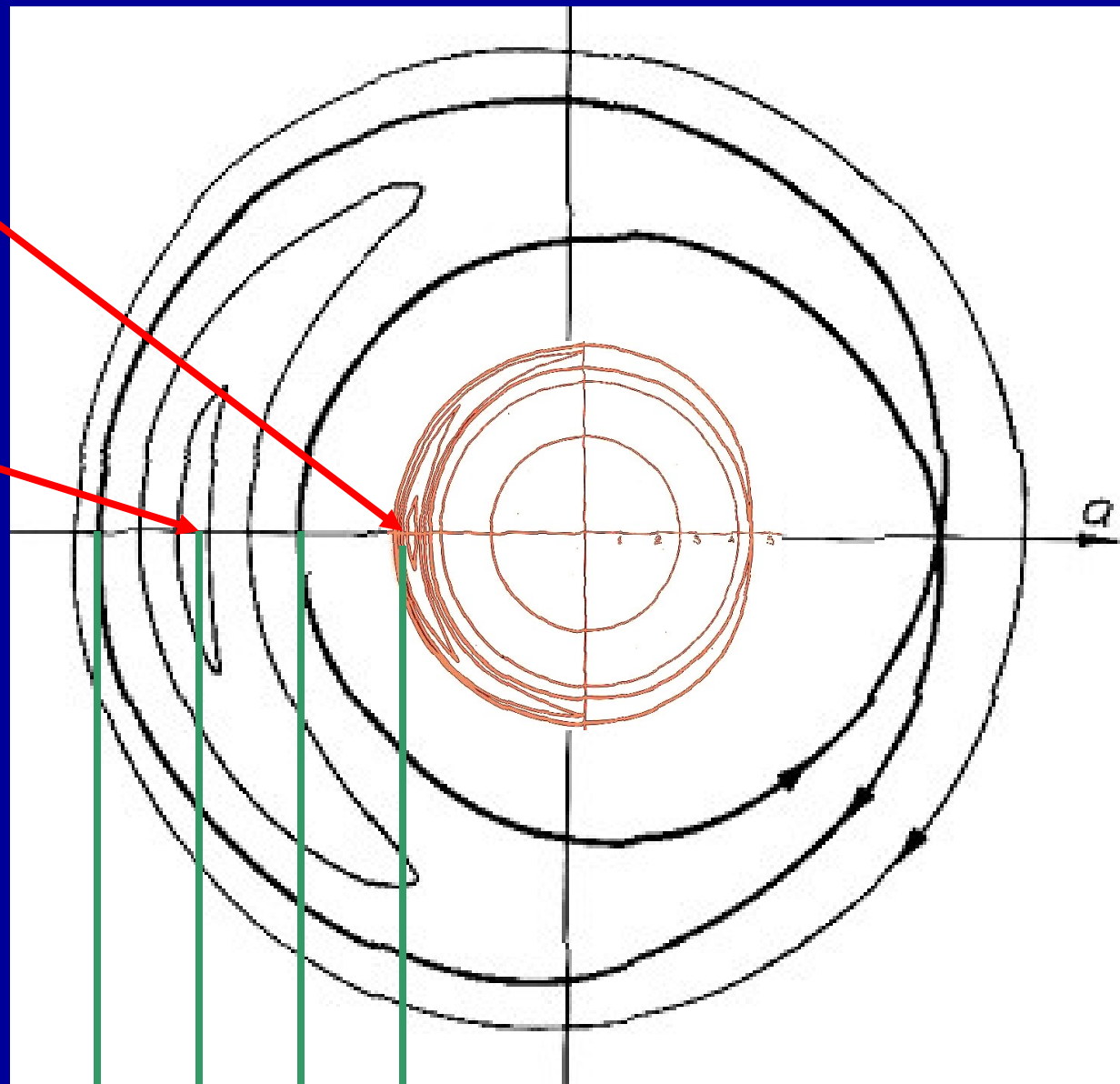
Было экспериментально показано, что в накопителях и ускорителях поведение частиц в бетатронном фазовом пространстве вблизи нелинейных резонансов может быть описано в таких терминах, как область автофазировки, частота фазовых колебаний, ширина области автофазировки и т.д., так же успешно, как до этого применялось для продольного фазового пространства.

4. Изучение стохастичности при совместном воздействии двух нелинейных резонансов.

Фазовые
диаграммы
двух
резонансов
 $\nu_z = 1 - \nu_p$

$$S = \frac{\Delta f}{f_{ph1}}$$

$$m = \frac{f_{ph2}}{f_{ph1}}$$



$$\Delta f = \frac{\partial v}{\partial a^2} (a_{01}^2 - a_{02}^2)$$

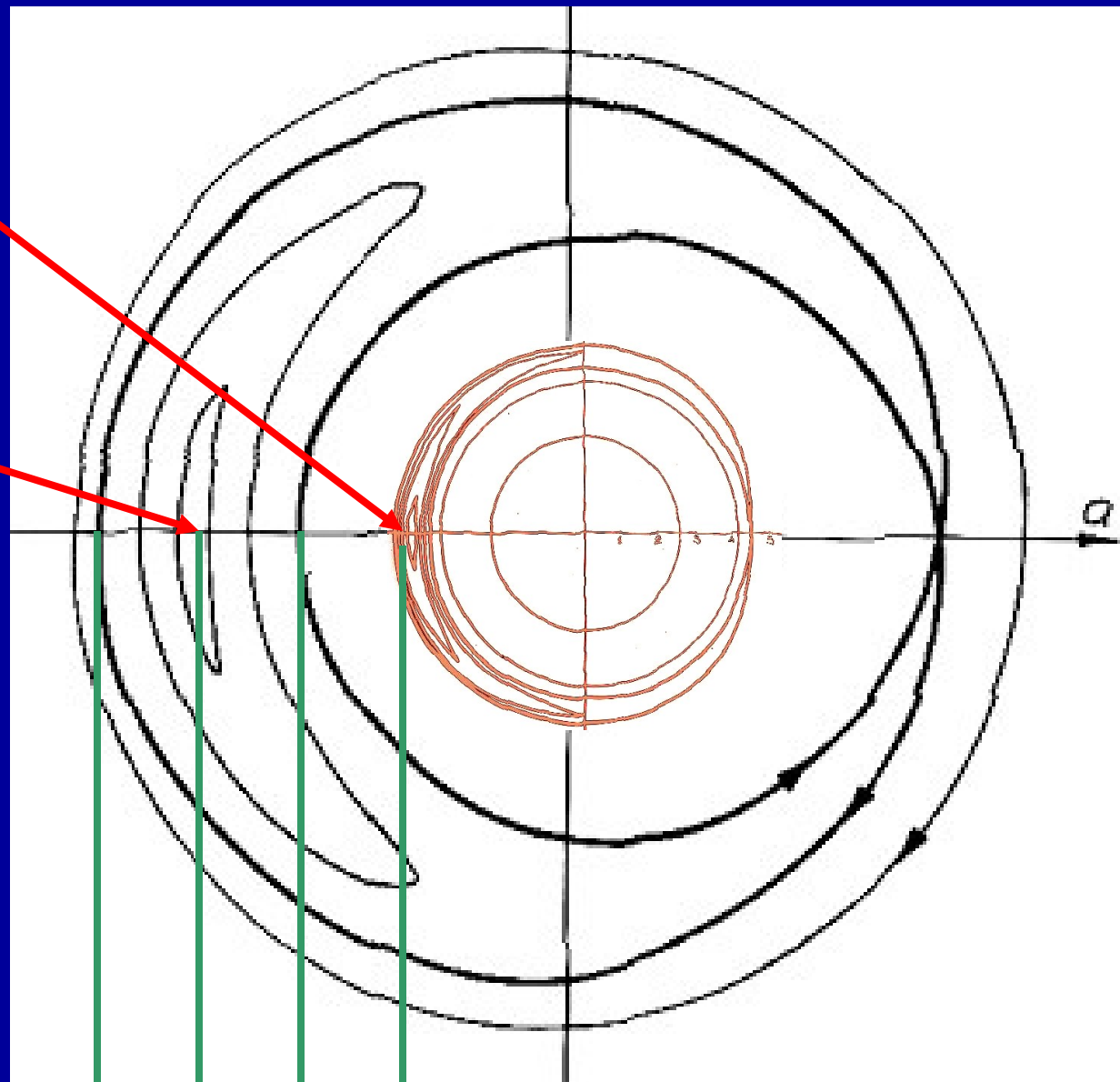
$$\Delta f_1 = 4f_{ph1}$$

$$\Delta f_2 = 4f_{ph2}^{28}$$

Фазовые
диаграммы
двух
резонансов
 $\nu_z = 1 - \nu_p$

$$S = \frac{\Delta f}{f_{ph1}}$$

$$m = \frac{f_{ph2}}{f_{ph1}}$$



$$\Delta f = \frac{\partial v}{\partial a^2} (a_{01}^2 - a_{02}^2)$$

$$\Delta f_1 = 4f_{ph1}$$

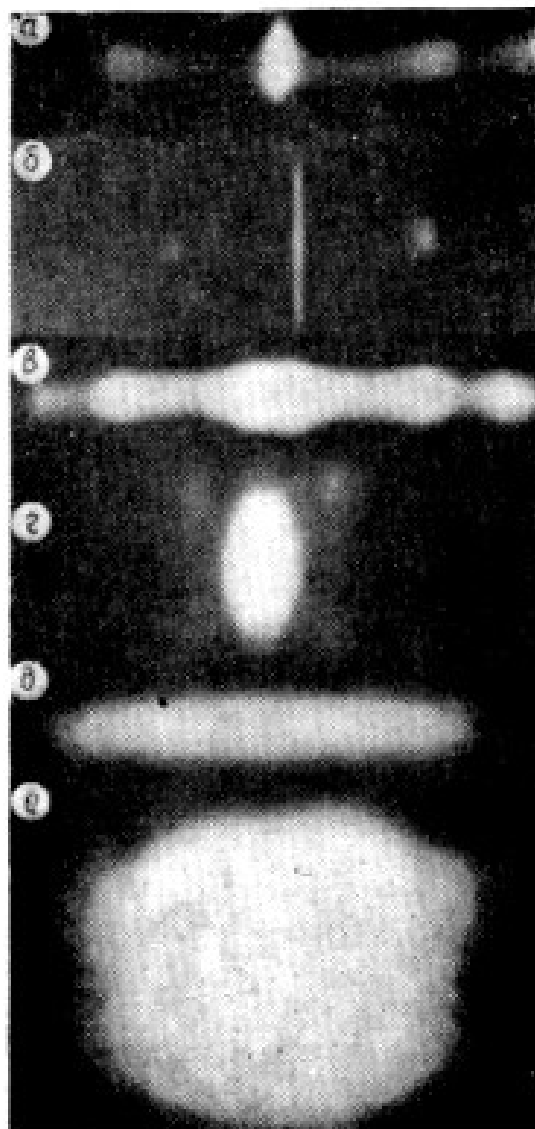
$$\Delta f_2 = 4f_{ph2}^{29}$$

В зависимости от S и m , при совместном возбуждении двух резонансов наблюдалось:

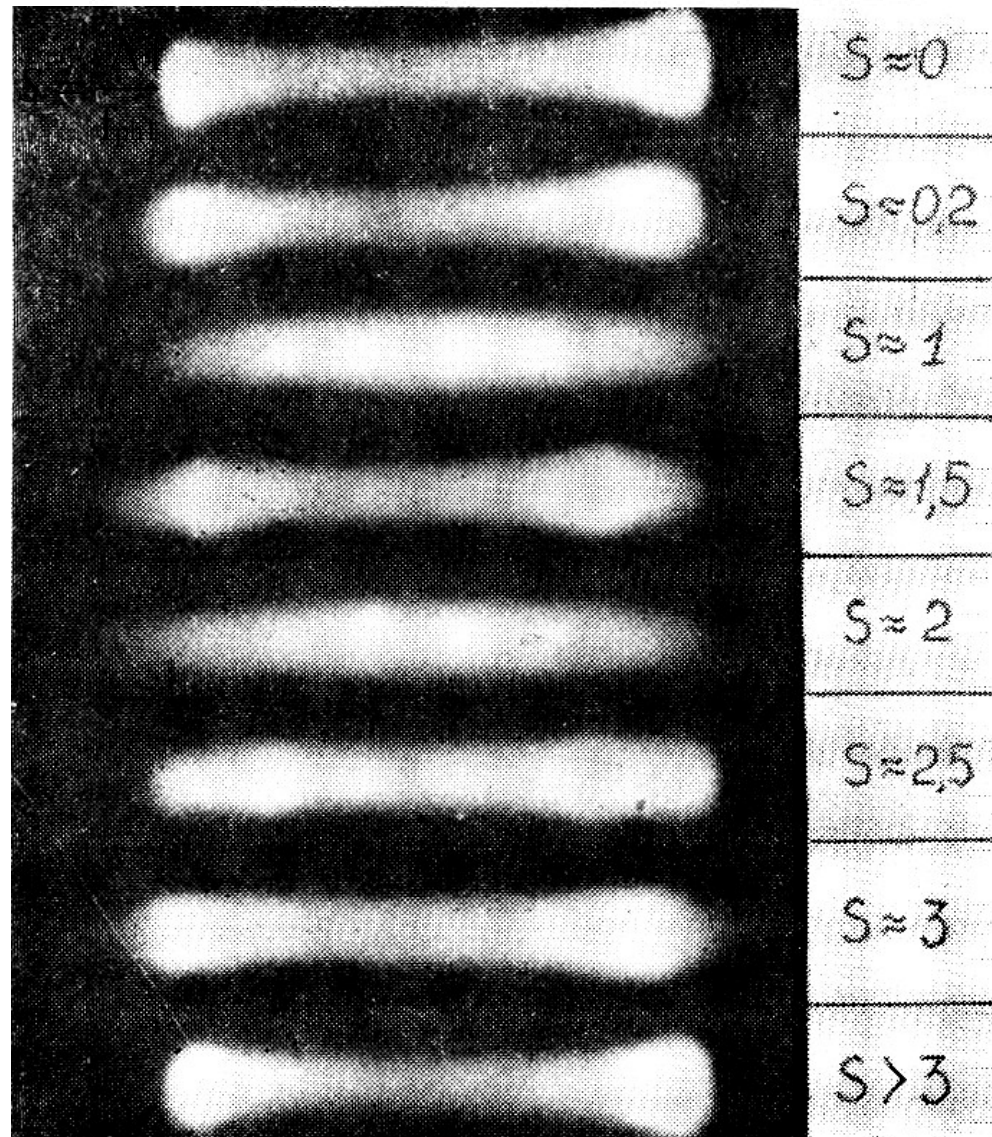
- существование двух независимых областей автофазировки ($S > 4$);
- расщепление резонансов, приводящее к возникновению новых стабильных областей автофазировки второго порядка внутри первых двух областей:

$$S = \frac{\Delta f}{f_{ph1}} = 1/3, 1/2, 1, 2, 3; \quad m < 0.6$$

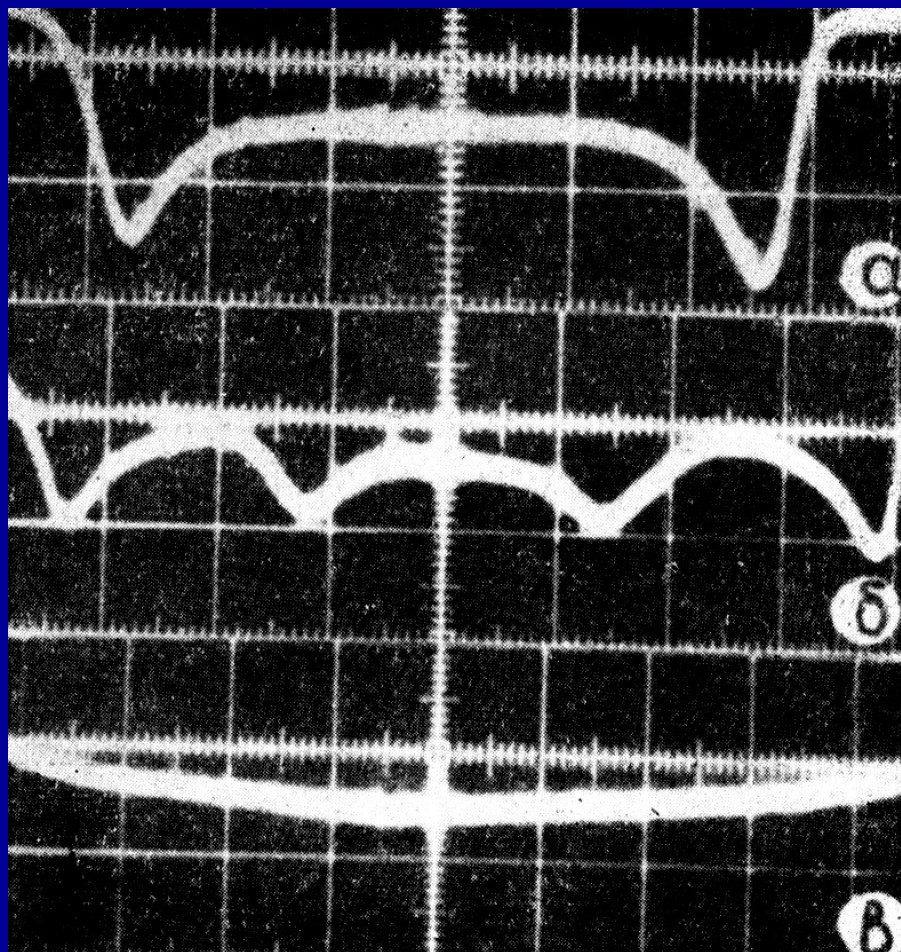
- полное разрушение областей автофазировки приводящее к стохастическому характеру изменения амплитуд бетатронных колебаний ($S=1,2$ and $m=1$).



Фотографии поперечного сечения пучка при совместном действии резонансов бетатронных колебаний: а), в) и д) – двух вертикальных, б) и е) – вертикального и радиального; г) – радиального и суммового.



Фотографии пучка при совместном действии двух резонансов вертикальных бетатронных колебаний в зависимости от параметра S ($m = 1$)



Осциллограммы поперечного распределения плотности электронного пучка:

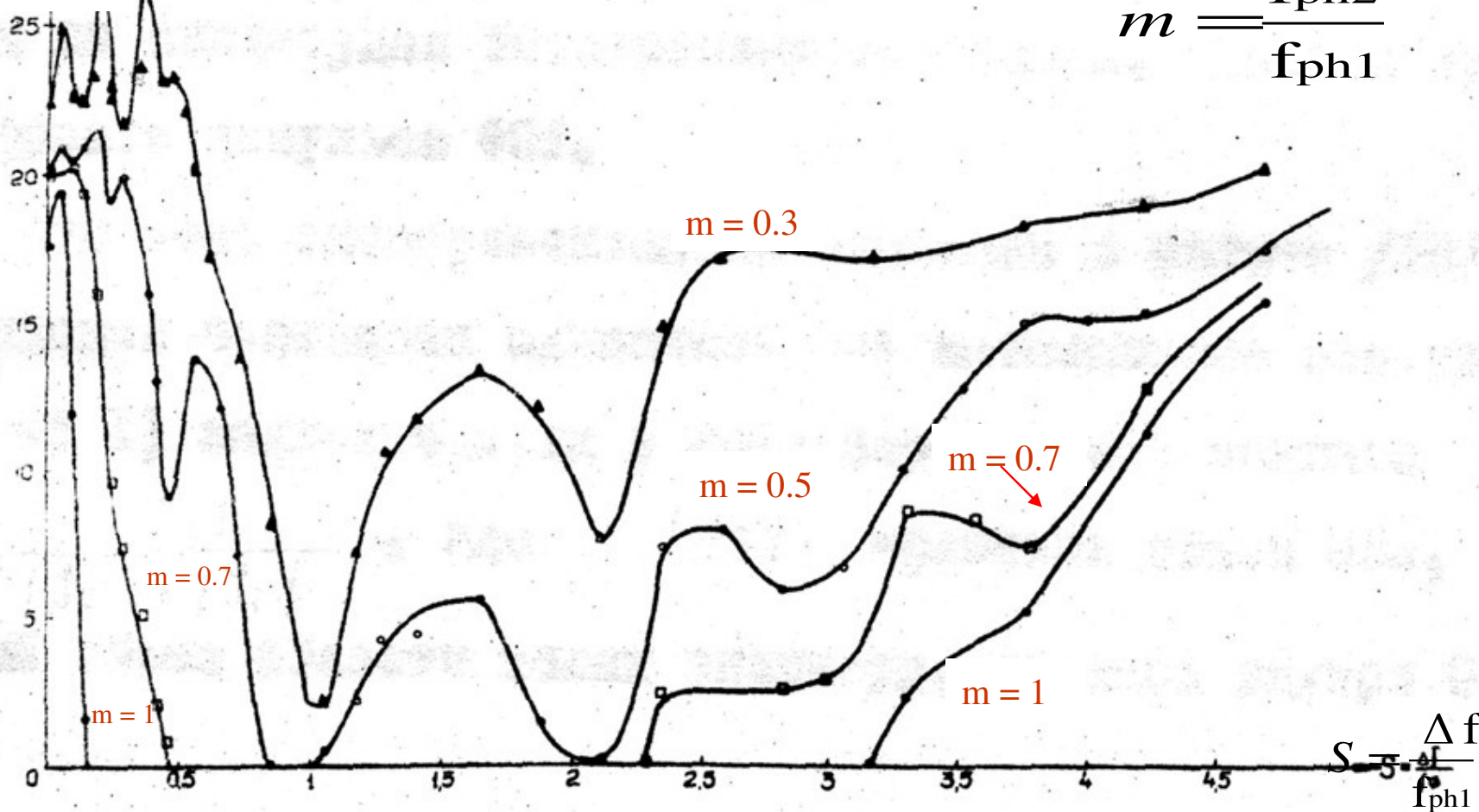
а) Одиночный резонанс;

б) два резонанса $m < 0.6$, $s \sim 1$;

в) два резонанса $m = 1$, $s = 1$.

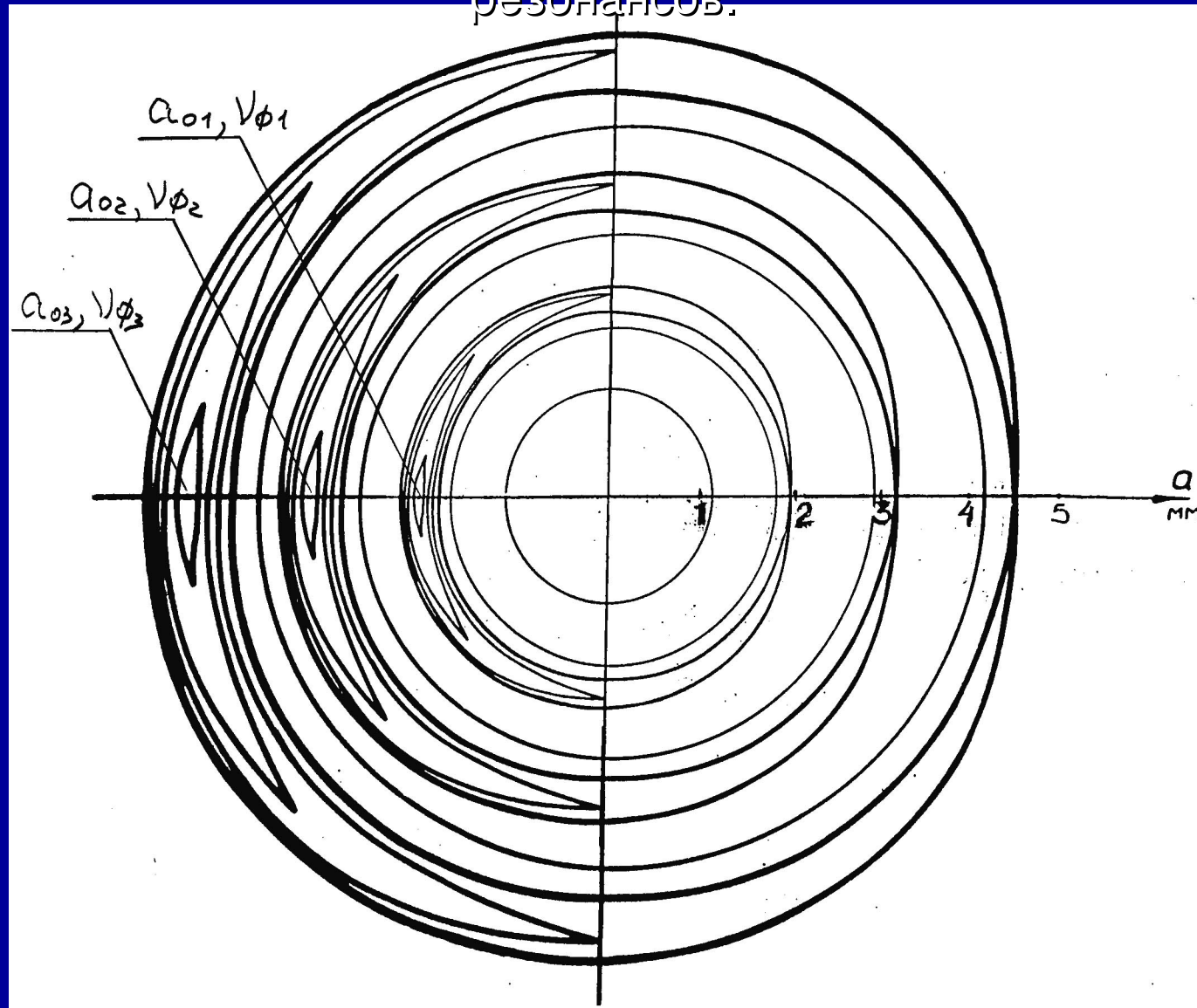
τ , sec

$$m = \frac{f_{ph2}}{f_{ph1}}$$

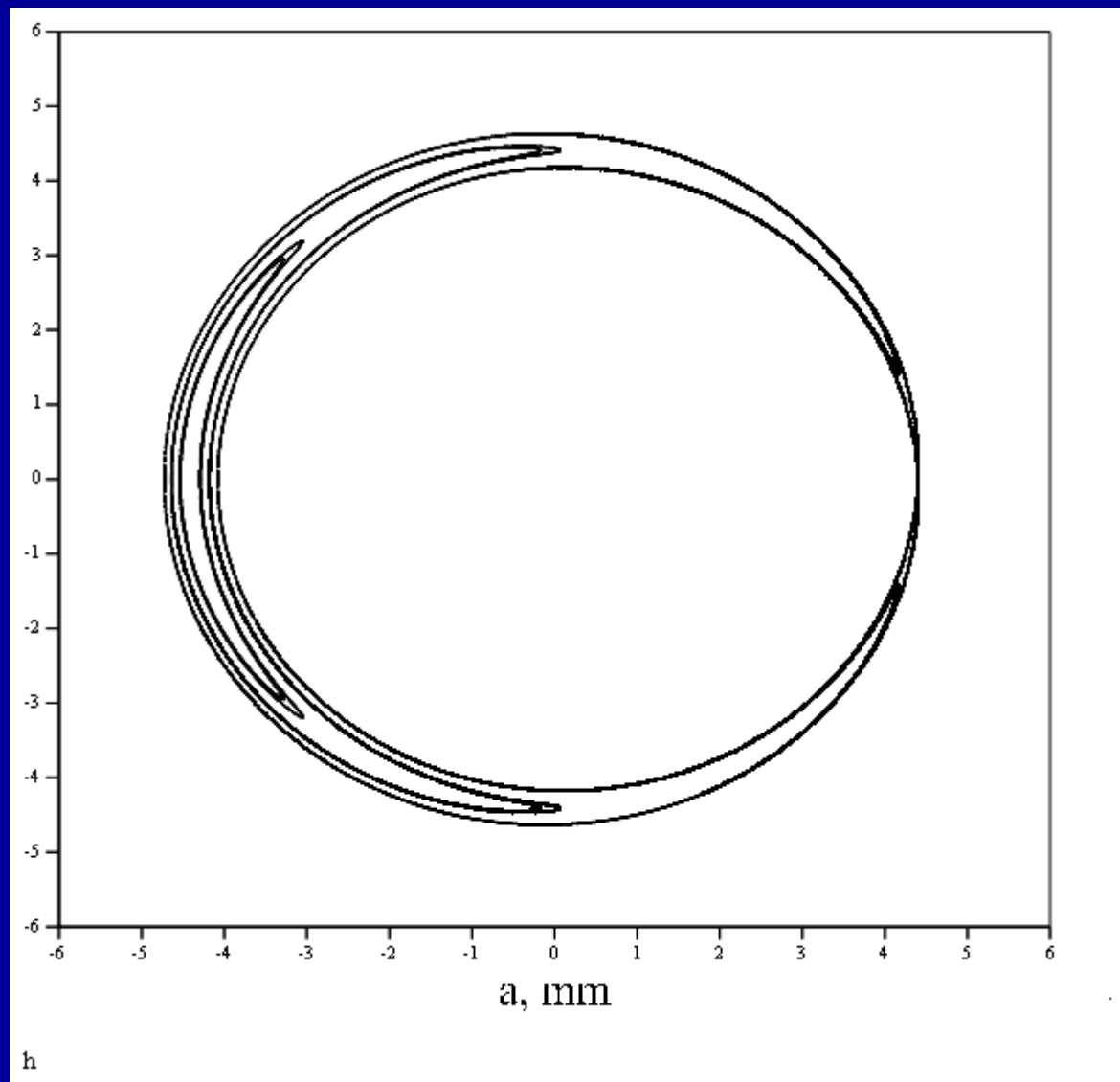


Зависимость времени жизни частиц в области бетатронной автофазировки от параметра S для различных m .

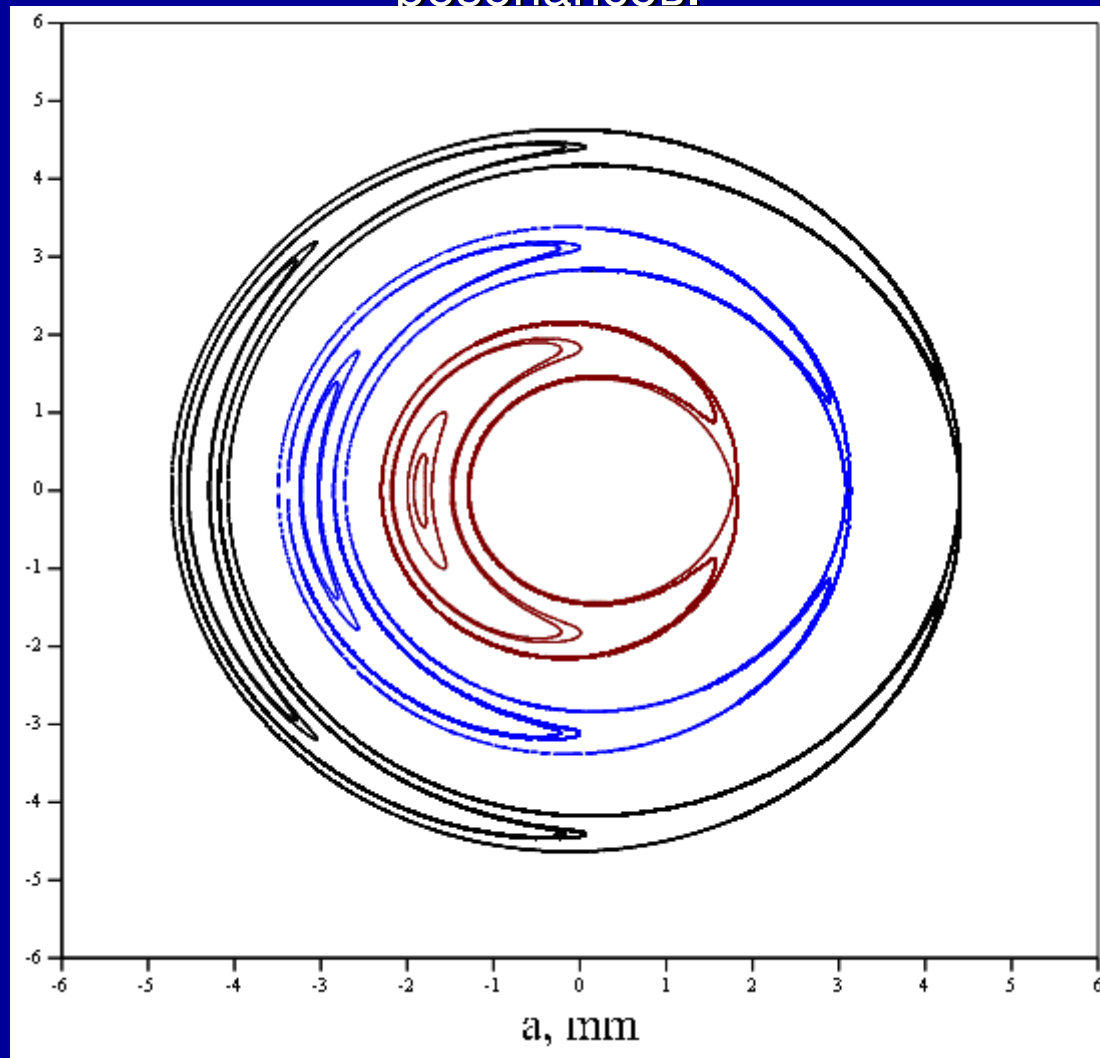
Изучение формирования стохастического слоя, образующегося около сепаратрисы при совместном действии двух нелинейных резонансов.



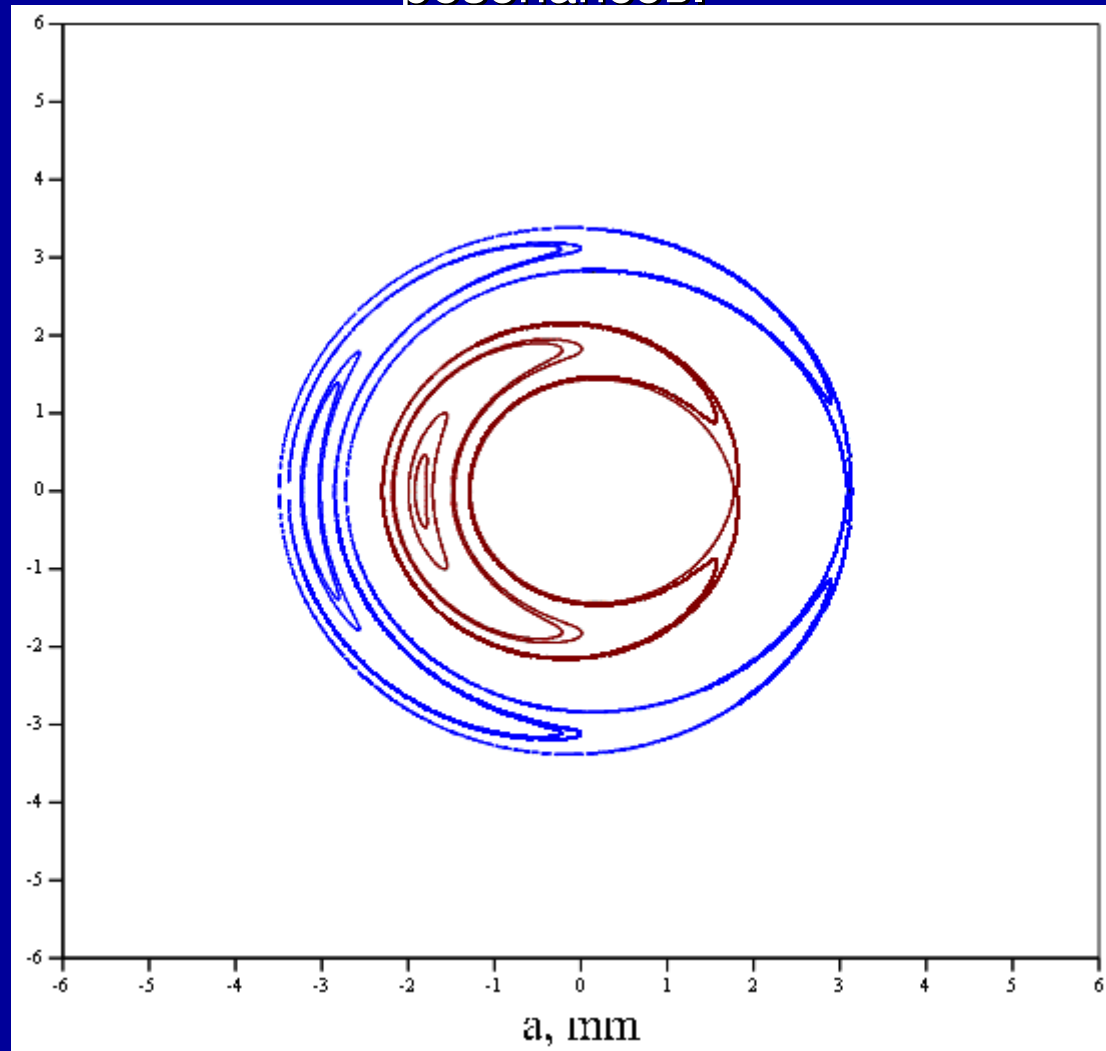
Изучение формирования стохастического слоя около сепаратрисы при совместном действии двух нелинейных



Изучение формирования стохастического слоя около сепаратрисы при совместном действии двух нелинейных резонансов.



Изучение формирования стохастического слоя около сепаратрисы при совместном действии двух нелинейных резонансов.



Изучение формирования стохастического слоя около сепаратрисы при совместном действии двух нелинейных резонансов.

1



Начальный электронный пучок без возбуждения

2



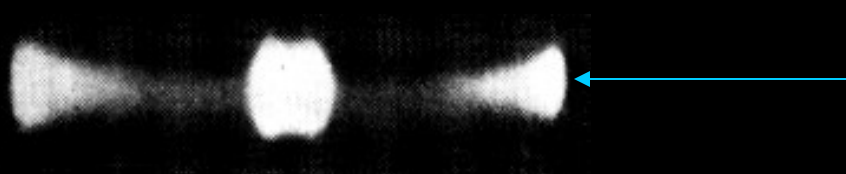
Частицы захватываются в область бетатронной автофокусировки³ и получают амплитуду a_{03}

3



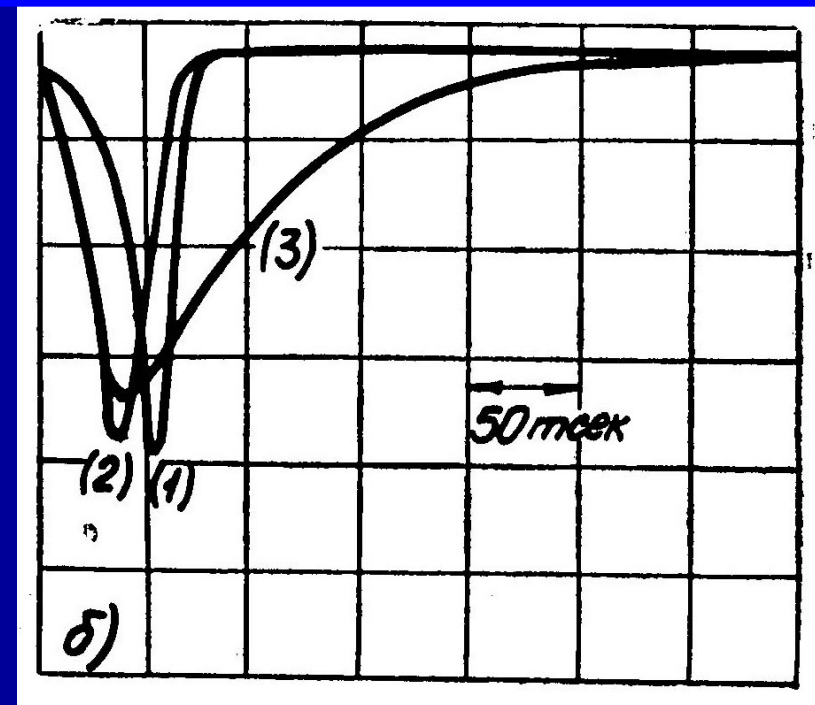
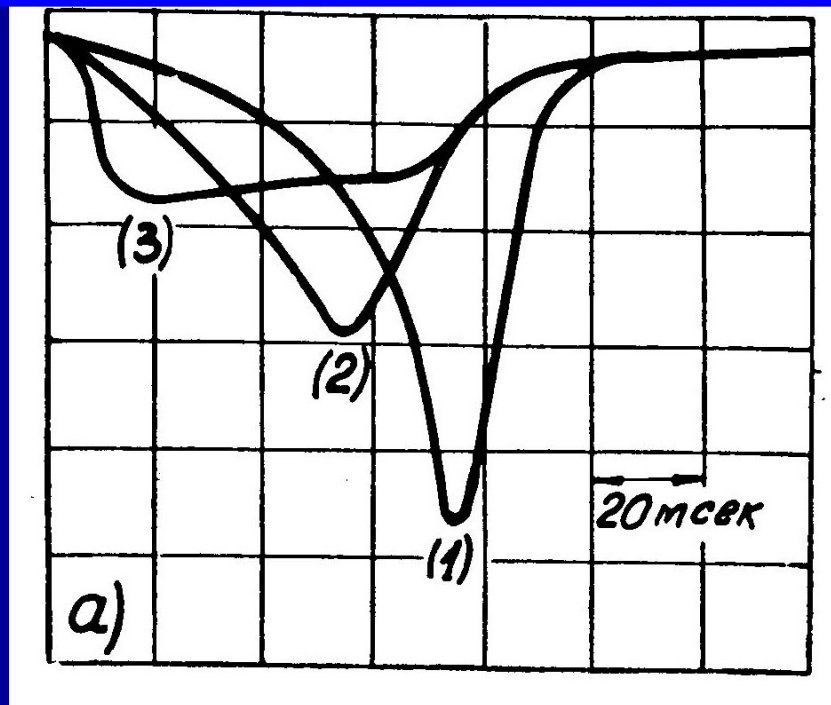
При a_{01} and $a_{02} < a_{03}$ создаются пустые области бетатронной автофазировки¹ и ² при различных m и S

4



Выключение возбуждения области бетатронной автофокусировки³. Частицы за счет радиационного затухания уменьшают амплитуды бетатронных колебаний и частично захватываются в область бетатронной автофокусировки

¹ при различных m и S

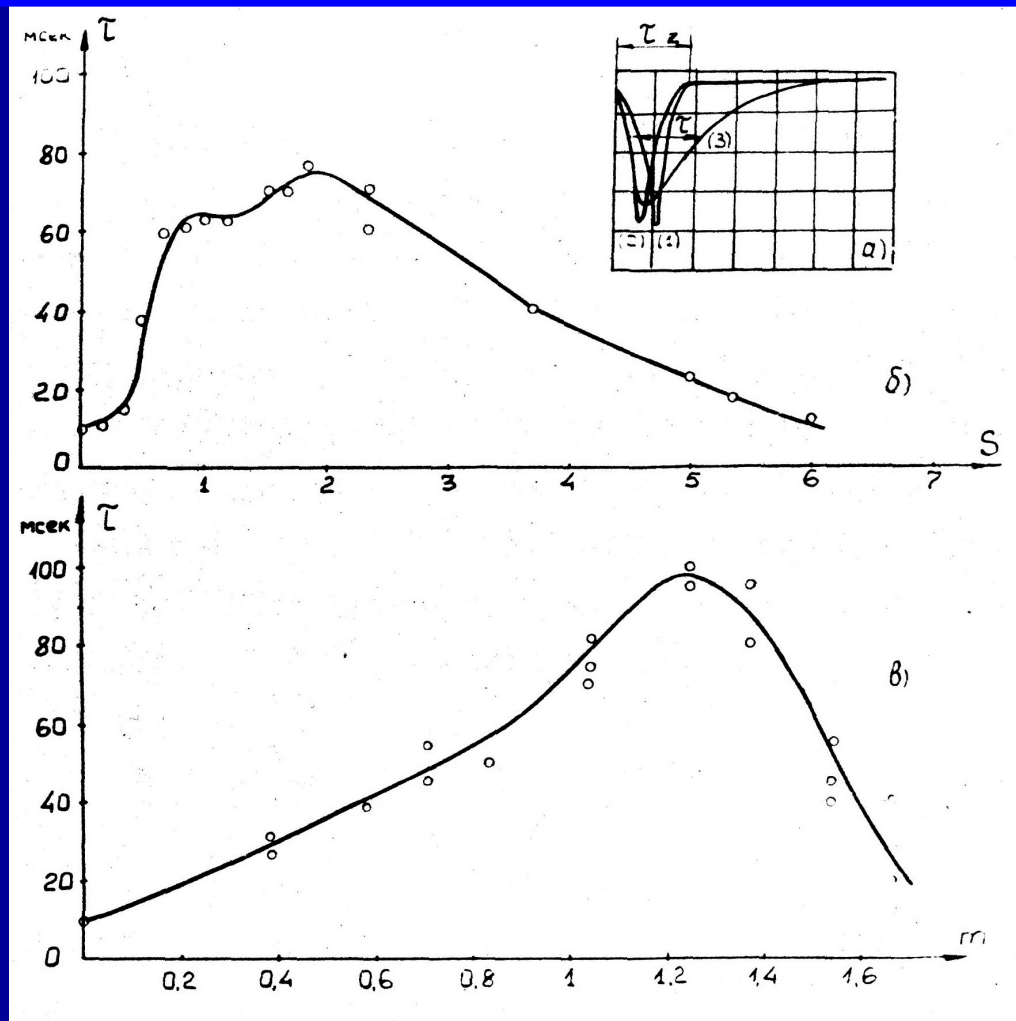


Осциллограммы сигнала с фотоумножителя с диафрагмой, установленной вблизи нулевой амплитуды:

(1а, 1б) – без области бетатронной автофазировки,
 (2а) – с одной промежуточной областью бетатронной автофазировки $\Delta a_1 = 0.10$ см,
 (2б) – с одной промежуточной областью бетатронной автофазировки $\Delta a_1 = 0.08$ см,
 (3а) – с одной промежуточной “betatron bucket” width $\Delta a_1 = 0.17$ см,
 (3б) – с областью диффузии, сформированной двумя близко расположенными областями бетатронной автофазировки равной мощности (ширина области бетатронной автофазировки $\Delta a = 0.08$ см, расстояние между центрами 0.03 см),
 начальная амплитуда $a_{01} = 0.58$ см, $E_e = 120$ MeV.

Увеличение времени затухания связано с частицами, которые на некоторое время диффундировали в стохастическом слое, после чего вернулись в область малых амплитуд.

Подобное явление могло бы наблюдаться, если бы вместо области взаимодействия двух нелинейных резонансов частицы проходили через тонкую газовую мишень.



а) - Осциллограммы сигнала с фотоумножителя с диафрагмой с пучком, проходящим области: без области бетатронной автофазировки (1), с одной областью бетатронной автофазировки (2) и с двумя областями бетатронной автофазировки (3).

б, в) – зависимость времени затухания от параметров: S (при $m=1$) и m (при $S \sim 0.6$).

Прохождение частиц через область взаимодействия двух нелинейных резонансов, позволяет наблюдать следующие явления:

- захват частиц в область бетатронной автофазировки с вероятностью $\frac{I_e}{I_e + I_1}$ при $m=0$;
- уменьшение времени затухания незахваченных частиц (эффект “фазового смещения” в бетатронном фазовом пространстве) при $m = 0$
- уменьшение вероятности захвата частиц в область бетатронной автофазировки номер 1 при m не равном 0.
- для незахваченных частиц в случае m не равном 0 и $s=1$ или 2, появление длинного экспоненциального хвоста с характеристическим временем затухания намного больше радиационного.

Суммарно о взаимодействии двух резонансов

Суммируя все экспериментальные результаты, полученные в широком диапазоне изменения параметров S и m , можно прийти к следующим заключениям:

1) Взаимодействие двух резонансов становится заметным только в случае перекрывающихся резонансов $S = \left| \frac{\Delta f}{f_{ph}} \right| < 4$

2) Главным следствием взаимодействия резонансов является расщепление резонансов и формирование областей бетатронной автофазировки второго порядка, возникающих при определенных резонансных условиях $S=p/q$ (где S – параметр перекрытия резонансов, а p и q – целые числа).

3) Расщепление резонансов всегда сопровождается формированием стохастического слоя вблизи сепаратрисы.

4) Полное стохастическое разрушение областей бетатронной автофазировки наблюдается только при определенных S и m , когда начинают расщепляться области бетатронной автофазировки второго порядка, возникающие при определенных значениях S и исчезающие при $m \sim 1$.

5. Изучение стохастичности при периодическом пересечении нелинейного резонанса.

Резонанс возбуждался при одной стабильной амплитуде возбуждающего напряжения;

периодическое прохождение осуществлялось с помощью модуляции частоты возбуждающего напряжения

Измеряемые параметры:

a_0 - равновесная амплитуда области бетатронной автофазировки;

$\frac{\partial^2}{\partial a^2}$ - кубическая нелинейность;

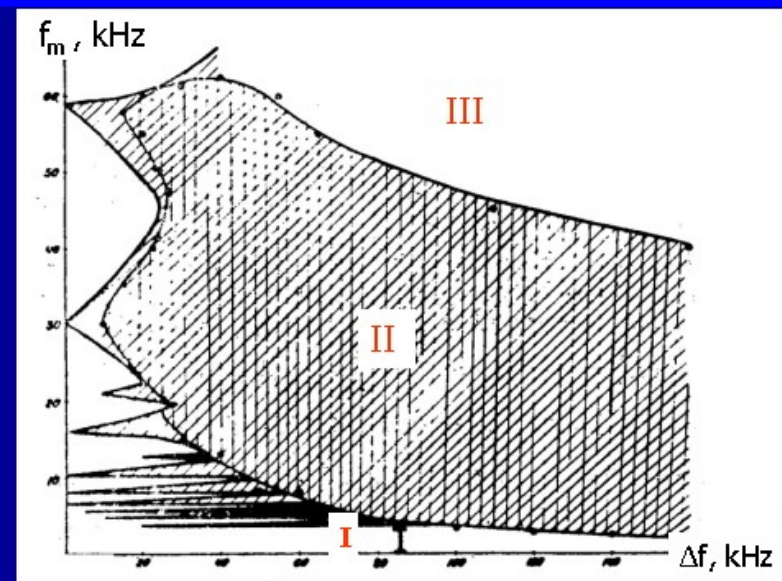
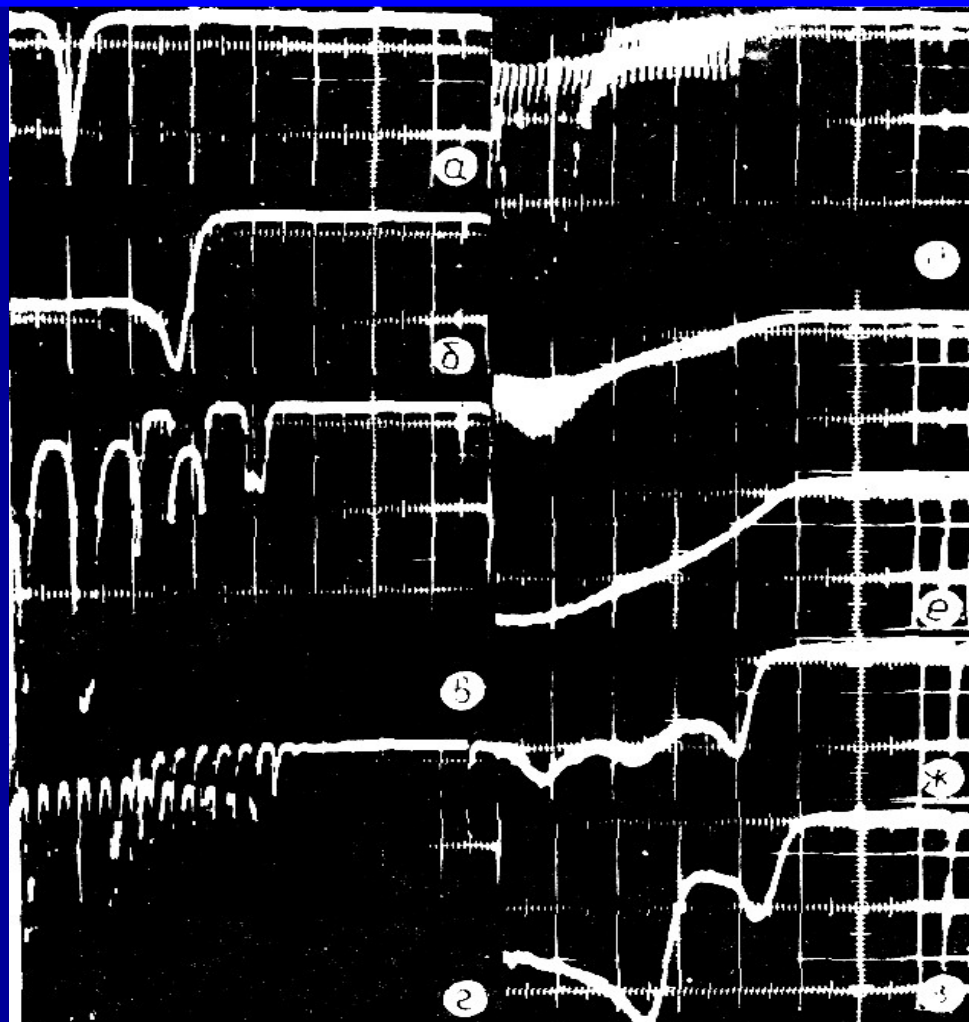
f_{ph} - частота малых фазовых колебаний в отсутствие частотной модуляции;

f_m - частота модуляции;

Δf - глубина модуляции (позиция)

В зависимости от Δf_m , f_m , f_{ph} при периодическом прохождении нелинейного резонанса наблюдаются следующие эффекты:

- периодическое изменения положения равновесной амплитуды (с пренебрежимо малым влиянием на пучок) – “адиабатическое” прохождение;
- диффузионное размывание пучка в определенном амплитудном диапазоне – стохастическая неустойчивость;
- возникновение новых стабильных областей – “модуляционных” резонансов (аналогично синхротронным резонансам).



Осциллограммы поперечного распределения плотности электронного пучка, типичные для различных областей (получены с помощью диссектора):
 а) – нет резонанса, б) – резонанс без периодического прохождения,
 в, г, д) – от медленного прохождения резонанса к стохастической неустойчивости,
 ж, з) – “модуляционные” резонансы.

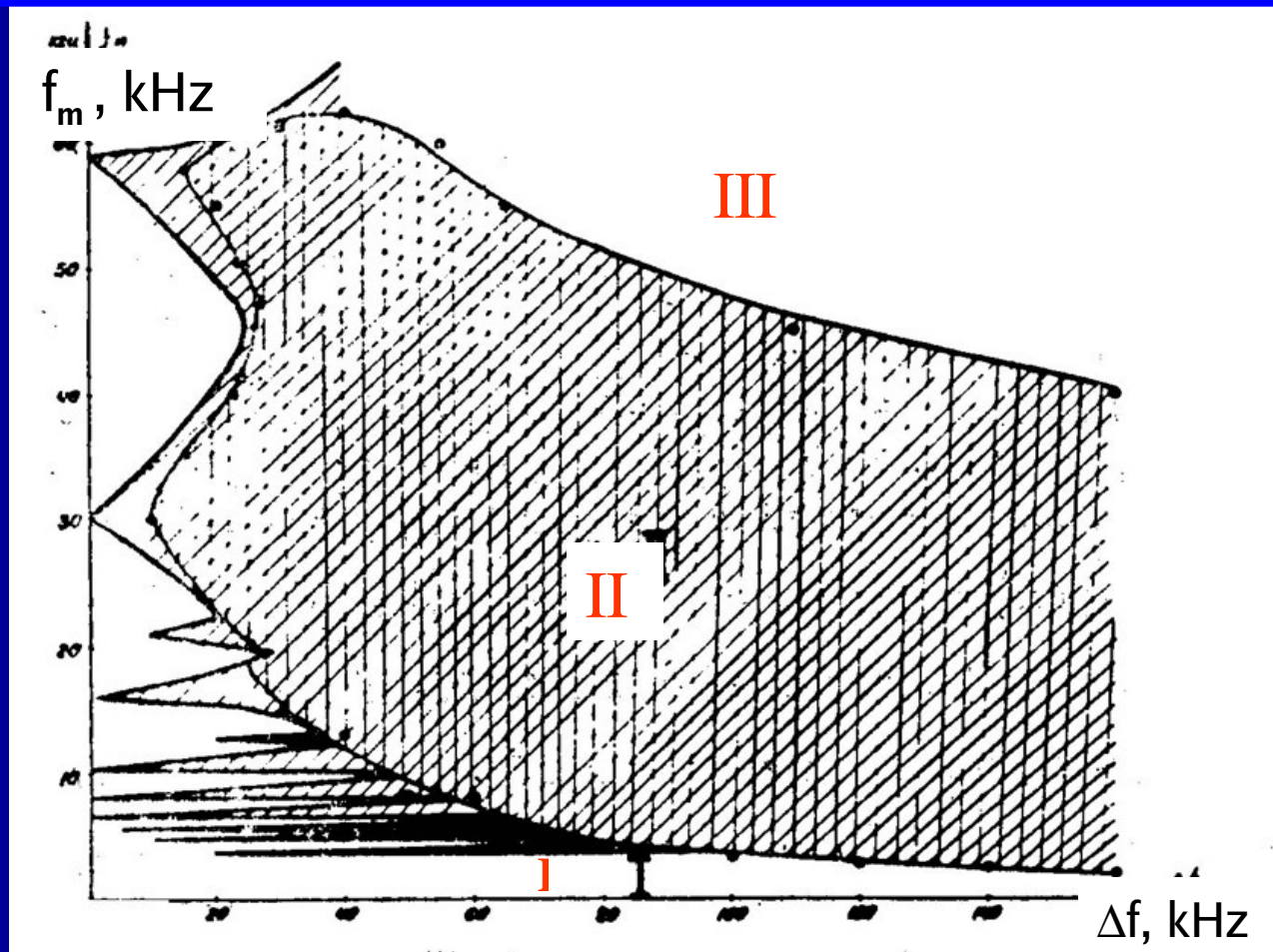


Диаграмма устойчивости движения при периодическом прохождении резонанса ($f_{ph} = 36$ kHz):

I – медленное “адиабатическое” пересечение,
 II – стохастическая область (0 – полное разрушение ОБАД - частичное разрушение ОБА),
 III – область “модуляционных” резонансов.

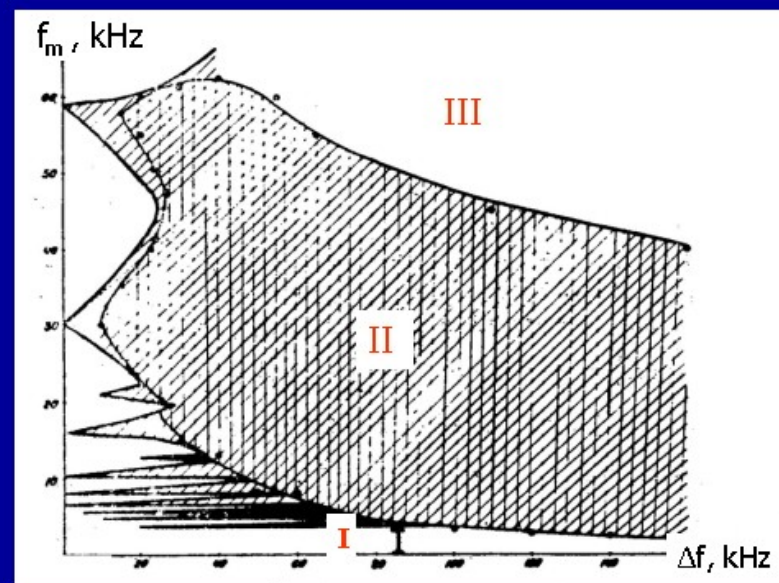
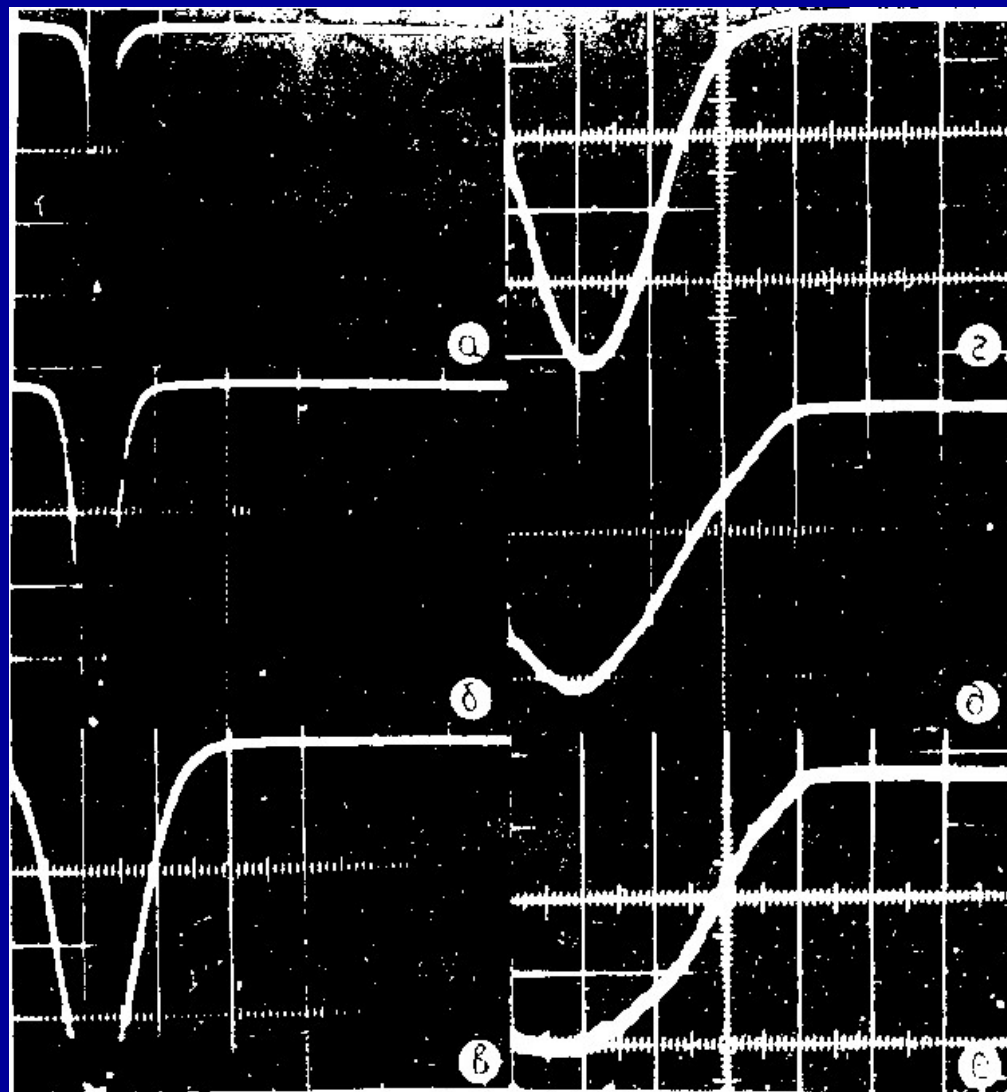
Определение границы перехода от адиабатического прохождение к стохастической области:

$$\frac{f_{ph}^2}{\Delta f_m f_m} \approx \pi$$

теоретическая оценка полного разрушения
границы области автофазировки

$$\frac{f_{ph}^2}{\Delta f_m f_m} \approx 4$$

экспериментальный результат



Осциллограммы поперечного распределения плотности электронного пучка в стохастической области
 ($f_m = 500 \text{ Hz}$, $\Delta f_m = 100 \text{ kHz}$)
 в зависимости от $f_\phi = 0 - 8 \text{ kHz}$.

Измерение коэффициента диффузии в стохастической области:

$$D = \frac{[\Delta(a^2)]^2}{t} = \frac{\pi B^2(a^2) f_0^2}{\Delta f_m} = \frac{\pi f_{ph}^4}{f_0^2 \Delta f_m \left(\frac{\partial v}{\partial a^2} \right)^2}$$

Это теоретическая оценка коэффициента диффузии в стохастической области при периодическом пересечении резонанса мощностью $B(a^2)$

(f_{ph} — частота фазовых колебаний).

Одновременное влияние процессов диффузии и радиационного затухания приводит к установлению равновесного размера:

$$\overline{\Delta a} = \frac{f_{ph}^2}{2a_0 f_0 \frac{\partial v}{\partial a^2}} \sqrt{\frac{\pi \tau_z}{\Delta f_m}}$$

Расчетное значение:

$$\overline{\Delta a} = 1.8 mm$$

$$f_{ph} = 6.5 \cdot 10^3,$$

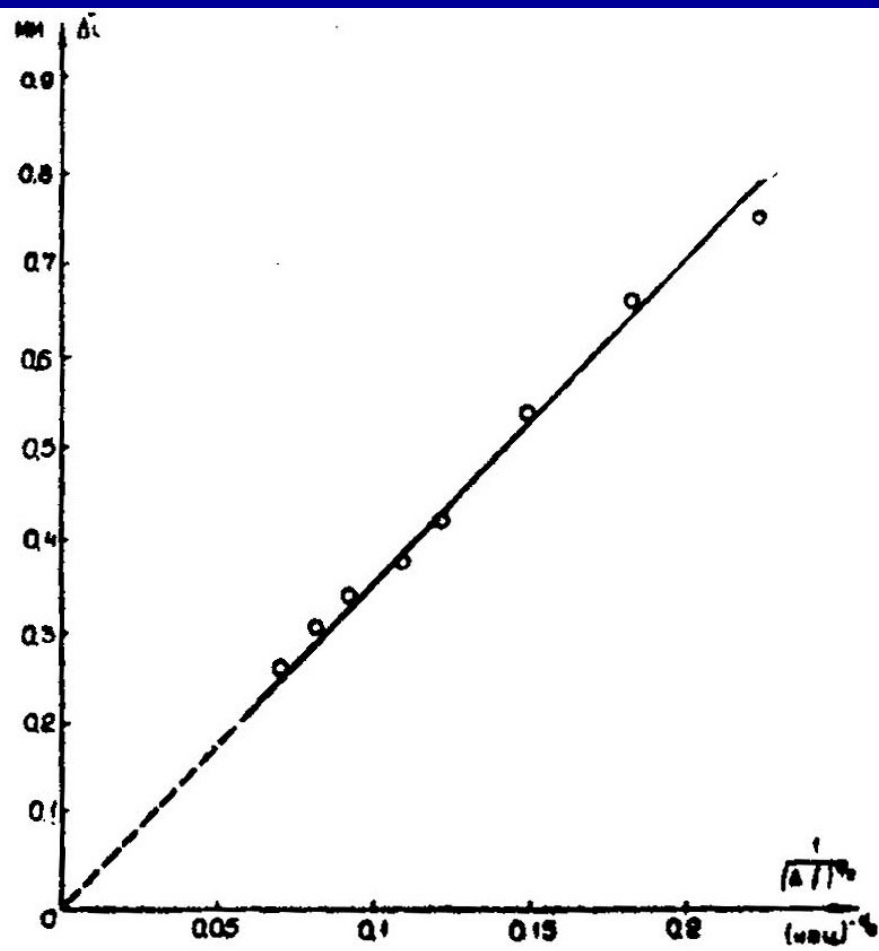
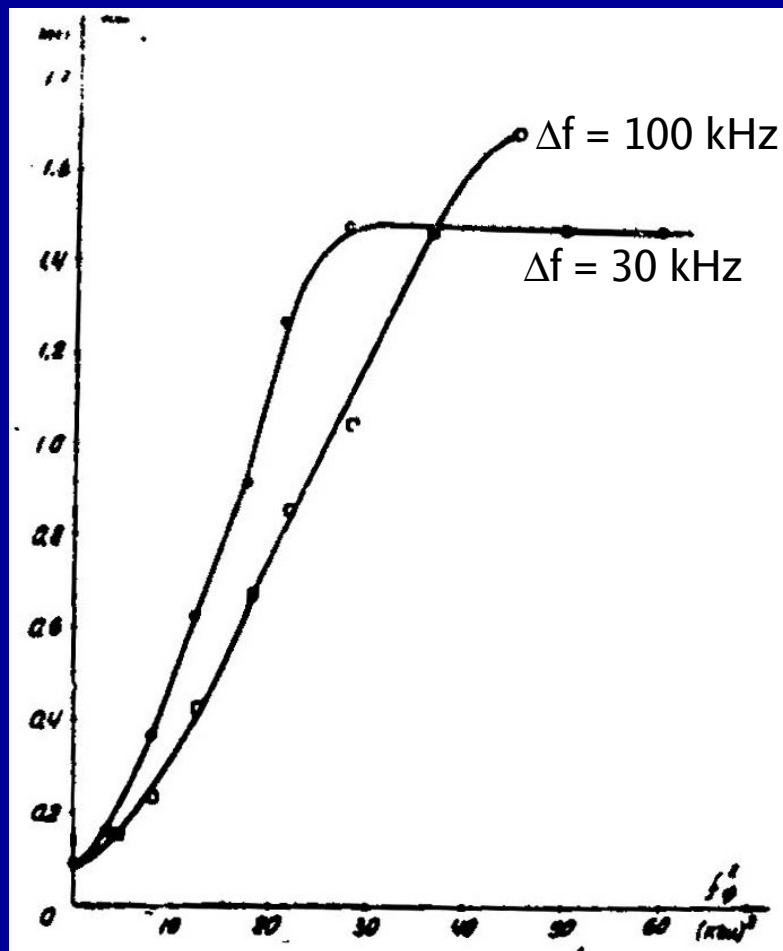
$$a_0 = 0.2 cm,$$

Измеренное значение:

$$\overline{\Delta a} = 1.45 mm$$

$$f_0 \frac{\partial v}{\partial a^2} = 8.5 \cdot 10^5 rad / cm^2,$$

$$\Delta f_m = 10^3 Hz$$



Размер пучка в стохастической области в зависимости от:

b) Частоты фазовых колебаний в области бетатронной автофазировки;

c) девиации ($f_{ph} = 3.5$ kHz).

Определение границы перехода от стохастической области к области “модуляционных” резонансов.

Под влиянием частотной модуляции возбуждающего ВЧ напряжения, в добавление к основному резонансу появляется ряд сопровождающих его “модуляционных” резонансов, отстоящих от основного резонанса на величину: $\Delta f = \pm n \cdot f_m$

Мощность модуляционных резонансов:

$$B_n = B_0 J_n \left(\frac{\Delta f_m}{f_m} \right) = B_0 \left(\frac{f_m}{\Delta f_m} \right)^{1/2} \text{ for } \Delta f_m \gg f_m$$

(B_0 - мощность резонанса в отсутствие частотной модуляции)

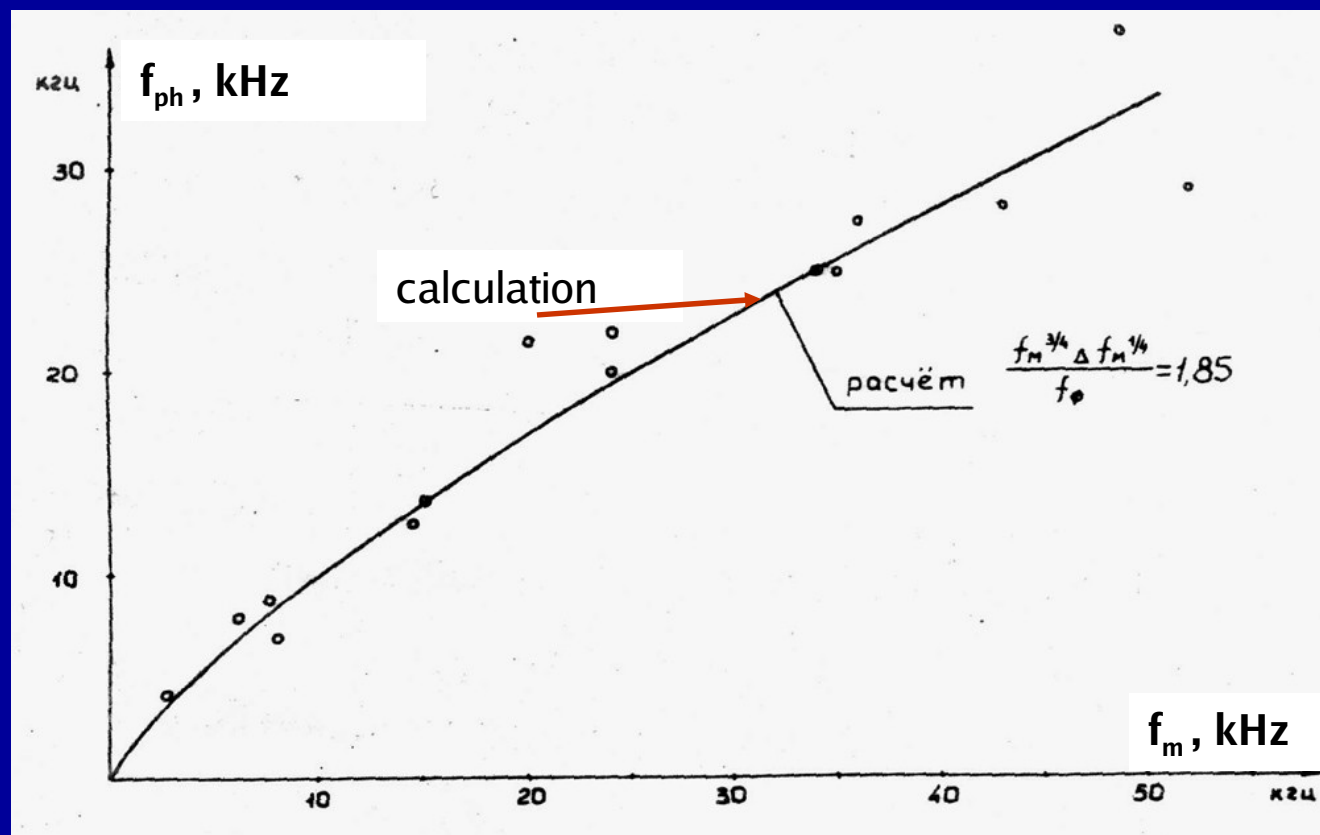
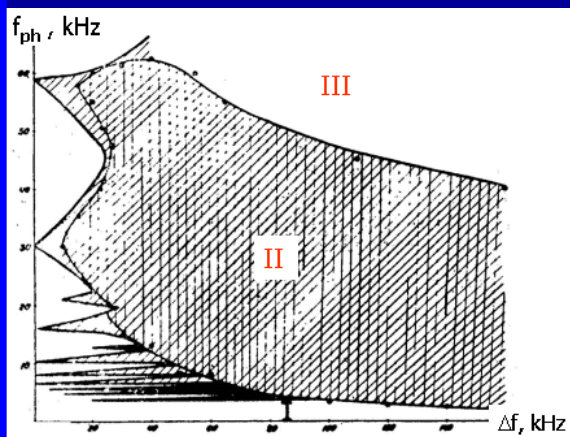
$$f_{ph_m} = f_{ph_0} \left(\frac{f_m}{\Delta f_m} \right)^{1/4}$$

Условием для перехода от области “модуляционных” резонансов к стохастической области является перекрытие областей автофазировки “модуляционных” резонансов :

$$S = \frac{f_{ph_m}}{\Delta f} \sim 1$$

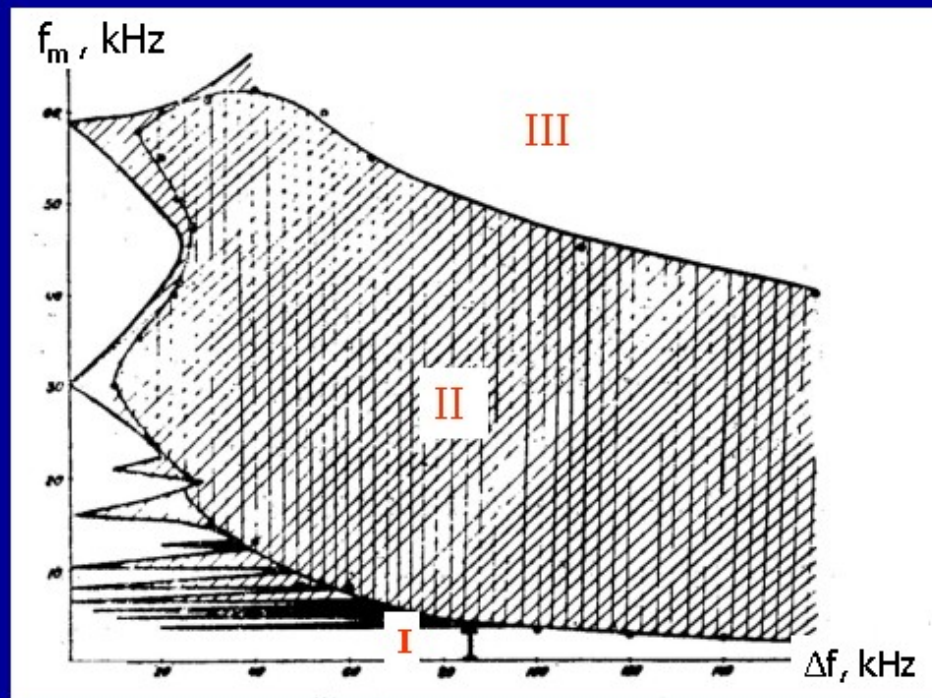
$$S = \frac{f_{ph} \left(\frac{f_m}{\Delta f_m} \right)^{1/4}}{f_m} = \frac{f_{ph}}{f_m^{3/4} \Delta f_m^{1/4}} \sim 1$$

Экспериментальные результаты $\Delta f_m > 2 f_{ph}$ находятся в хорошем согласии с приведенной формулой при



Верхняя граница полного разрушения областей автофазировки
модуляционных резонансов в зависимости от мощности резонанса
($\Delta f_m = 100$ kHz).

В некотором диапазоне частот, при малом Δf_m ($\Delta f_m < 2f_{ph}$) наблюдались зоны частичного или полного разрушения областей автофазировки.



Пересечение этих зон определяет границу перехода к стохастической области со стороны малых девиаций.

Область малых Δf_m напоминает диаграмму устойчивости решений уравнений Матье, так как зоны локализованы вблизи модуляционных частот $2f_1, f_1, 2/3f_1, 1/2f_1, 2/5f_1, 1/3f_1$, где $f_1 = 0.82 f_{ph}$, что справедливо для изменения f_{ph} в диапазоне от 5 до 50 kHz.

В этих зонах стохастичность определяется взаимодействием областей автофазировки второго порядка, сформированных в результате возбуждения как параметрического ($f_m = 2f_{ph}/n$), так и субгармонического ($f_m = f_{ph}/n$) резонансов.

Соотношение ($f_1 = 0.82f_{ph}$) может быть объяснено сильной нелинейностью фазовых колебаний в области бетатронной автофазировки.

6. Основные экспериментальные результаты.

1) В экспериментах, проведенных в 1967-68 годы на накопителе ВЭП, было показано, что в накопителях и ускорителях поведение частиц в бетатронном фазовом пространстве вблизи нелинейных резонансов может быть описано в таких терминах, как область автофазировки, частота фазовых колебаний, ширина области автофазировки и т.д., так же успешно, как до этого применялось для продольного фазового пространства.

2) Была показана возможность стохастического движения частиц в бетатронном фазовом пространстве под действием чисто периодических возмущений.

Обнаружение явления нагрева частиц в стохастическом слое, возникающего при действии двух резонансов, а также измерение коэффициента диффузии в стохастической области при пересечении одиночного резонанса является убедительным доказательством этого факта.

3) Критерий появления стохастичности – “Критерий Чирикова” был подтвержден экспериментально.

Было показано хорошее согласие, как качественное, так и количественное, экспериментальных результатов с теорией, разработанной Б.В. Чириковым.

4) Было показано экспериментально, что при взаимодействии двух резонансов развитие стохастичности идет через чисто динамические эффекты, такие как расщепление резонансов и формирование областей автофазировки второго порядка, возникающих при определенных резонансных условиях $S=p/q$ (где S – параметр перекрытия резонансов, p и q – целые числа)

Перекрытие областей автофазировки второго порядка, которое наблюдалось при равенстве мощностей взаимодействующих резонансов ($\eta=1$), ведет к перекрытию областей автофазировки высших порядков и к полному стохастическому разрушению областей автофазировки обоих резонансов.

Ауслендер В.Л., Коробейников Л.С., Кулипанов Г.Н. и др. Проявление нелинейных резонансов бетатронных колебаний в накопителях // Атомная энергия. – 1967. – Т. 22, № 3. – С. 179-188.

Кулипанов Г.Н., Попов С.Г., Тумайкин Г.М. Эксперименты по изучению потерь частиц в циклических ускорителях при прохождении через нелинейные резонансы // Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, Москва, 1968 г. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1968. – М., 1970. – Т. 2. – С. 374-378.

Ауслендер В.Л., Кулипанов Г.Н., Мишнев С.И. и др. Экспериментальные данные по взаимодействию пучков при встрече // Атомная энергия. – 1966. – Т. 20, № 3. – С. 213-217.

Кулипанов Г.Н., Мишнев С.И., Попов С.Г., Тумайкин Г.М. Экспериментальное изучение эффектов встречи в накопителе // Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, Москва, 1968. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1968. – М., 1970. – Т. 2. – С. 386-390.

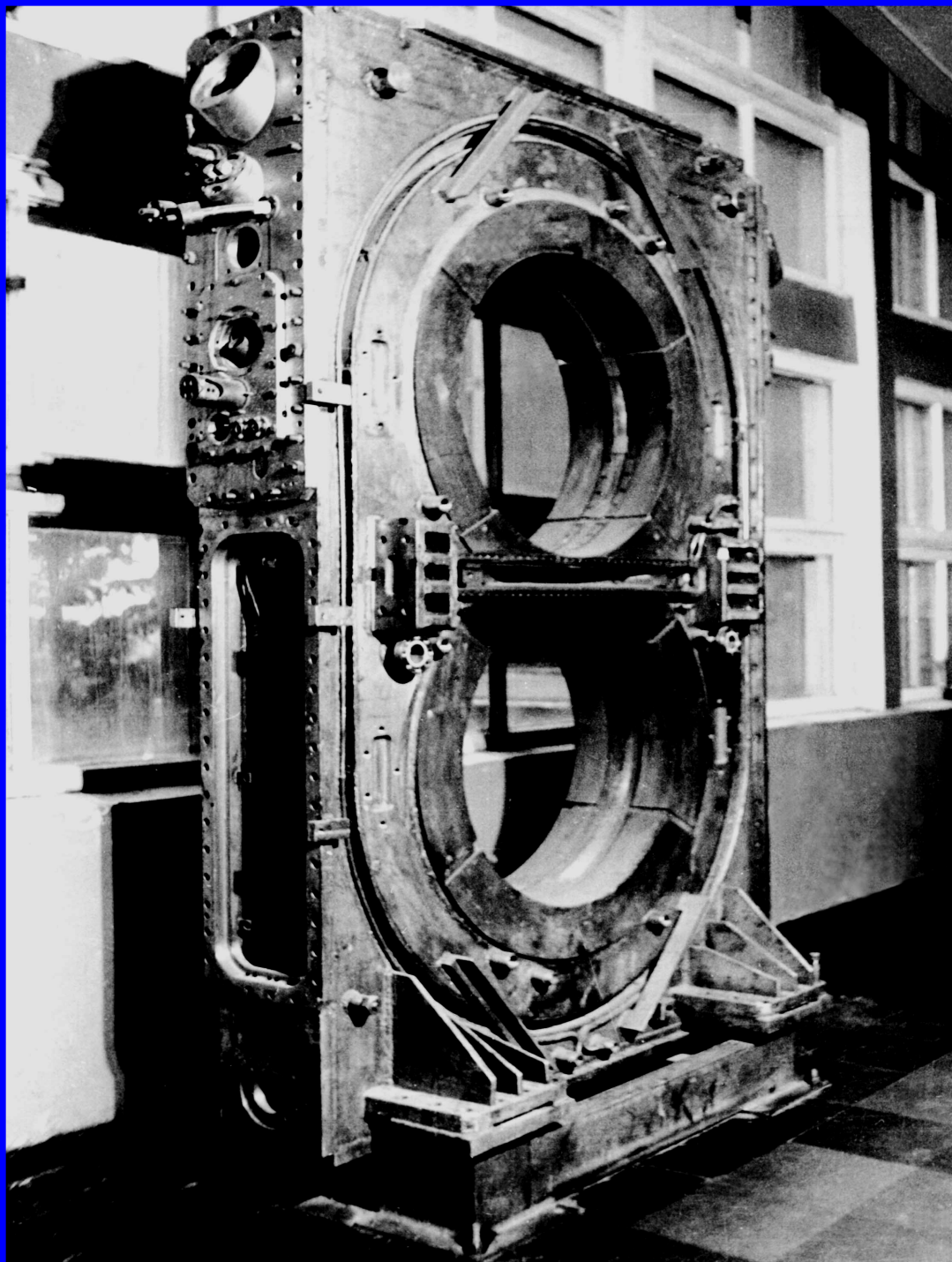
Зинин Э.И., Коробейников Л.С., Кулипанов Г.Н. и др. Система управления и контроля параметров электронных пучков в накопителе ВЭП-1 // Атомная энергия. – 1966. – Т. 20, № 3. – С. 220-223.

Кулипанов Г.Н., Мишнев С.И., Попов С.Г., Тумайкин Г.И. Влияние нелинейностей на бетатронные колебания в накопителе. – Новосибирск, 1968. – (Препринт/ Ин-т ядер. Физики; № 251).; То же: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1968. – М., 1970. – Т. 2. – С. 379-385.

Диканский Н.С., Кулипанов Г.Н., Лазаренко Б.А., Мишнев С.И., Попов С.Г. Изучение прохождения частиц через область автофазировки бетатронных колебаний за счёт радиационного затухания // Международной конференции по ускорителям, Ереван, 1969. – Ереван, 1970. – Т. 2. – С. 300-307.

Кулипанов Г.Н., Мишнев С.И., Скринский А.Н. Поведение пучка в накопителе при совместном действии двух резонансов бетатронных колебаний // Труды Международной конференции по ускорителям, Ереван, 1969. – Ереван, 1970. – Т. 2. – С. 353-361.

Кулипанов Г.Н., Мишнев С.И., Скринский А.Н. Изучение стохастической неустойчивости пучка при периодическом прохождении резонанса бетатронных колебаний // Труды Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Ереван, 1969. – Ереван, 1970. – Т. 2. – С. 300-307.



Коллайдер
ВЭП-1
сегодня как памятник

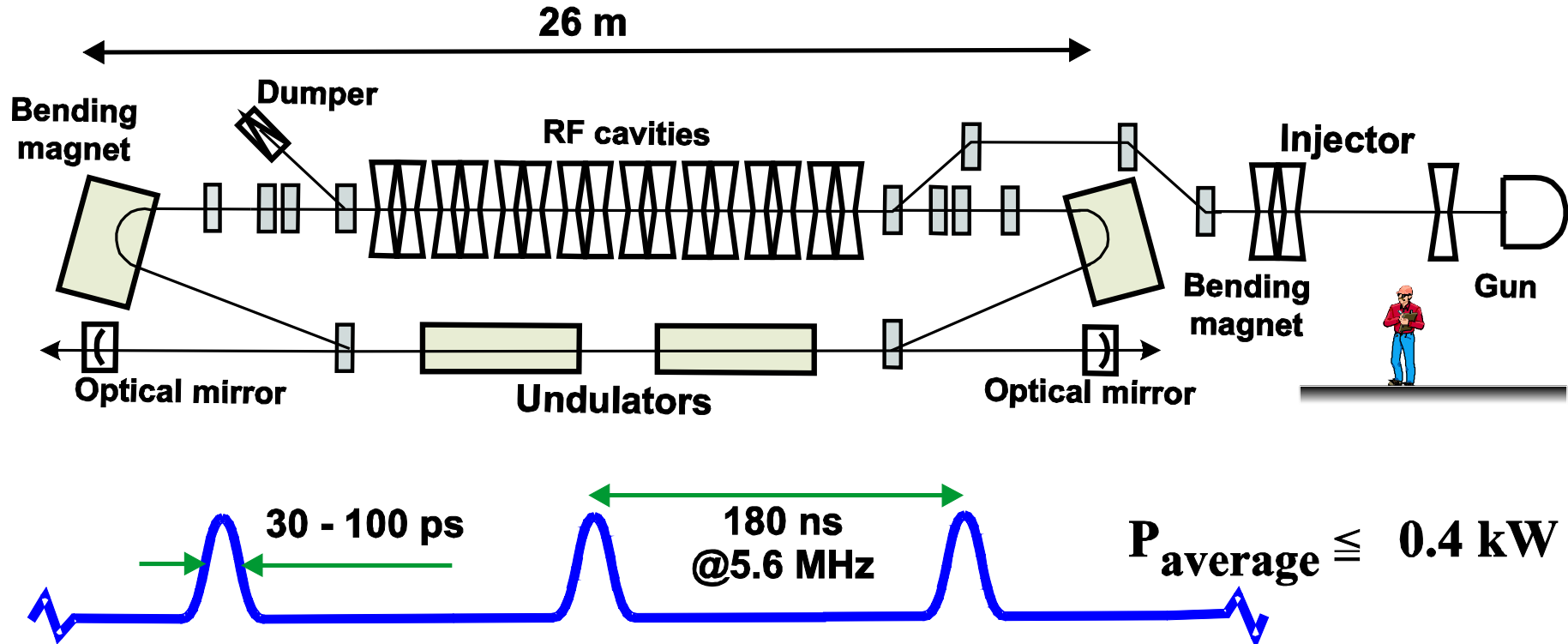


Благодарности:

Б.В. Чирикову за стимулирующие обсуждения в 1967 – 1969, содействовавшие осуществлению этой работы, **С.И.Мишневу**, **А.Н.Скринскому**, **С.Г.Попову** и **Г.М.Тумайкину** за совместную работу, **Я.С.Дербенёву** и **Н.С.Диканскому** за обсуждения результатов работы и **В.Б.Барышеву** за помощь в подготовке этой презентации.

**7. Новые возможности
экспериментального изучения
квантового хаоса с помощью мощного
терагерцового излучения.**

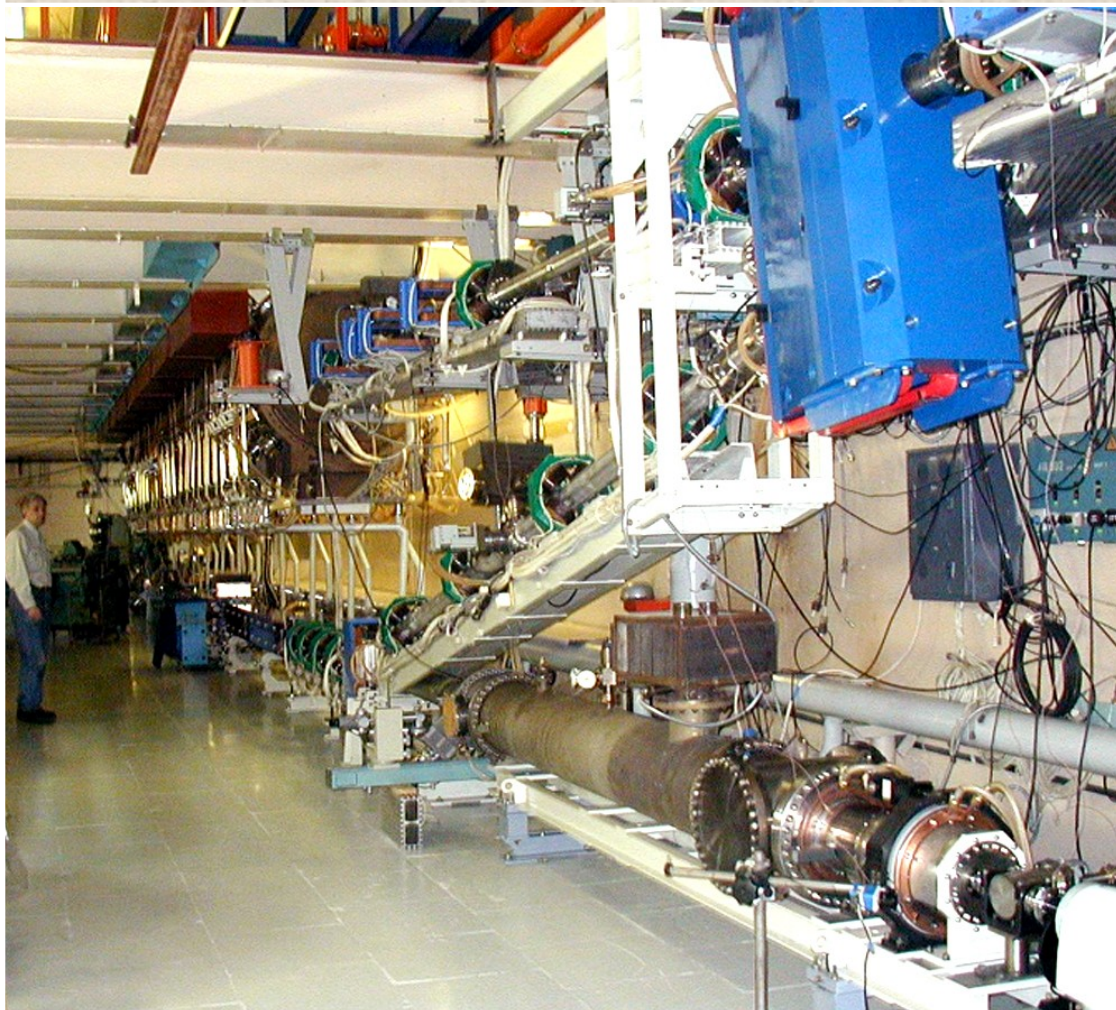
Layout of the Novosibirsk FEL (1st stage)



Electron beam from the injector after its passage through the buncher (a bunching RF cavity), drift section, 2 MeV two accelerating cavities and the main accelerating structure is directed to the undulator, where a fraction of its energy is put into the laser radiation.

After that, the beam returns to the main accelerating structure in a decelerating RF phase, decreases its energy practically to its injection value (2 MeV) and is absorbed in the Dumper.

Новосибирский лазер на свободных электронах (NovoFEL)



Первая очередь (действующая)



Монтаж второй очереди

Параметры излучения первой очереди NovoFEL

	1 st harmonic	2 nd harmonic	3 rd harmonic
Длина волны, μm	120 - 235	60 - 117	40 - 78
Ширина линии излучения на полувысоте, %	0.3 - 1.0	0.2 - 1	0.1 - 1
Максимальная средняя мощность, Вт	400	6	2.4
Максимальная пиковая мощность, кВт	600	9	3.6
Длительность импульса, пс	40 - 100	40 - 70	40 - 70
Частота повторения, МГц	2.8 - 5.6 - 11.2		
Степень линейной поляризации, %	> 99.6		
Диаметр пучка на юзерских станциях, мм (гауссовский)	60		

Указанные в таблице мощность и ширина линии в терагерцовой области являются рекордными

VIDEO: Discharge in a focus of a 200 W beam of THz radiation in argon

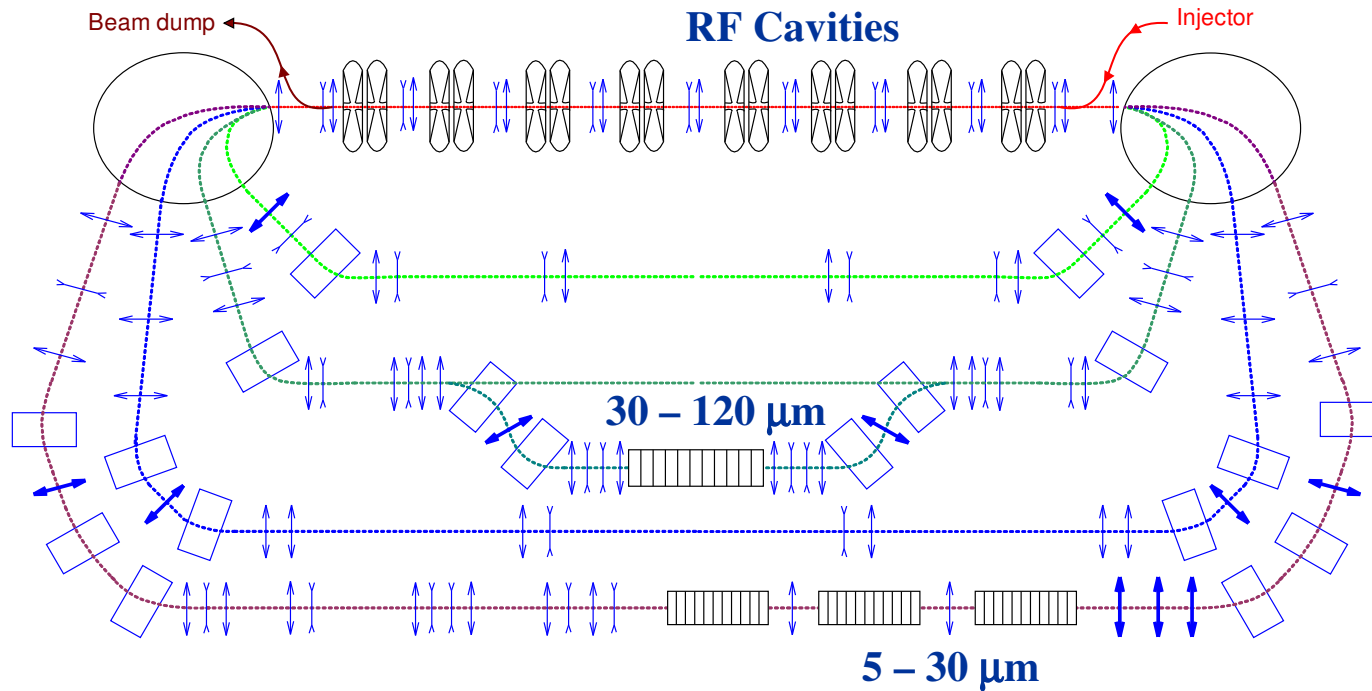


Результат воздействия сфокусированного пучка
терагерцового излучения на мраморную пластину
(свечение и явление абляции)



2-nd stage Novosibirsk FEL (in horizontal plane)

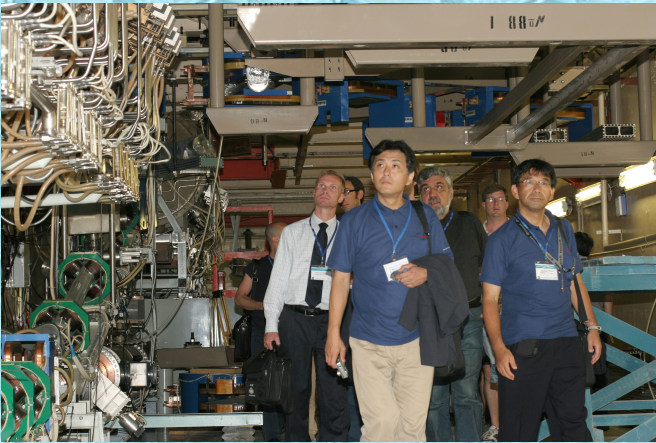
120 – 240 μm 1st stage NovoFEL
(in vertical plane)



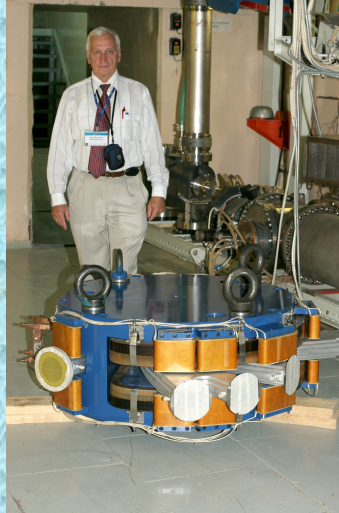
Radiation wavelength	5 – 240 μm
Average power	Up to 10 kW
E-beam energy	up to 40 MeV
Maximum repetition rate	90 MHz
Maximum mean current	150 mA

Status of the NovoFEL second stage

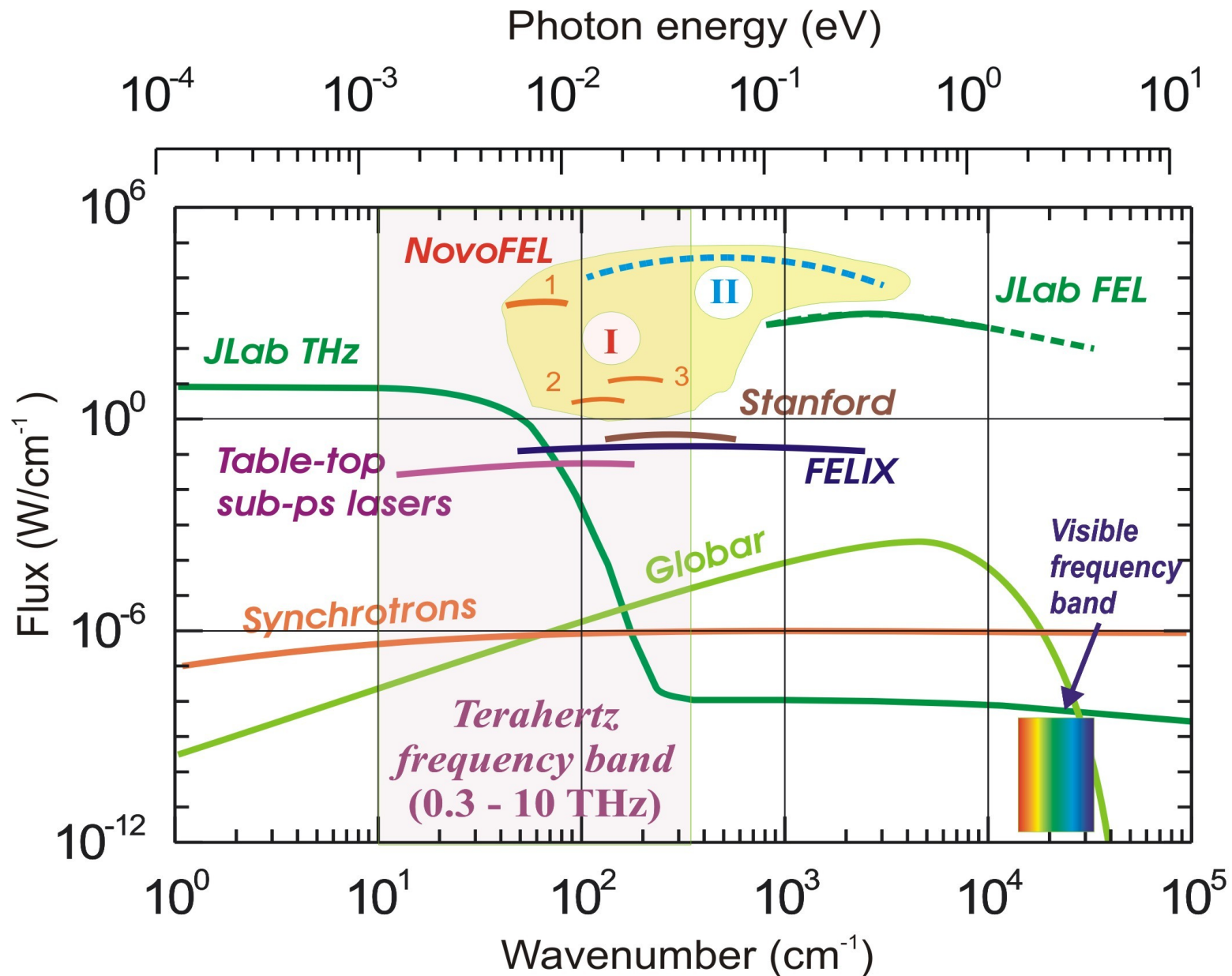
Assembly of four tracks of NovoFEL accelerator system is in progress



FEL-2007 Conference excursion,
Novosibirsk, August 29, 2007



Average spectral power density of the light sources



	1-я очередь NovoFEL	2-я очередь NovoFEL	3-я очередь NovoFEL
Длина волны излучения, мкм	110 - 240	30 - 120	5 - 30
Частота излучения, ТГц	2.7 – 1.25	10 – 2.5	60 - 10
Пиковая мощность, МВт	1	1	1
Длительность импульса, пс	70	70	70
Частота повторения импульсов, МГц	2.8 – 5.6 – 11.2	2.8 – 5.6 – 11.2	2.8 – 5.6 – 11.2
Максимальное эффективное поле в фокусе, В/см	$\sim 2 \cdot 10^6$	$\sim 8 \cdot 10^6$	$\sim 3 \cdot 10^7$

НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЗОНАНС В КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ

Э. В. Шурык

В задаче о нелинейном квантовом осцилляторе с резонансной силой развита как теория возмущений, так и квазиклассический метод для вычисления спектра квазиэнергий. Результаты применяются к описанию междумодовых резонансов в автономных системах. Показано, что квантовые эффекты приводят к сильным ограничениям на существование стохастических слоев и диффузии Арнольда, рассмотрены примеры магнитных ловушек, ускорителей, Солнечной системы. Рассмотрена задача о распаде возбужденной моды в молекулах и нелинейных цепочках. Дана оценка границы перехода к стохастическому режиму движения в молекулах. Ряд выводов теории применяется к описанию бесстолкновительной диссоциации молекул в поле интенсивной резонансной волны.

1. Введение

В последние годы был достигнут существенный прогресс в понимании общей картины движения n -мерной классической системы общего вида. Он вызван работами математиков, особенно Колмогорова и Арнольда [1-3], развитием теории и практики таких систем, как ускорители элементарных частиц, плазменных колебаний и т. д., а в особенности «математическими экспериментами» на ЭВМ с различными модельными системами [4-7]. Эта теория основана на последовательном учете наиболее медленно зависящих от времени (или резонансных) членов гамильтониана в ограниченной области фазового пространства, что приводит к понятию изолированного резонанса. Следующий шаг — учет взаимодействия резонансов. Если они разнесены на расстояния, превышающие их нелинейные ширины, то это взаимодействие экспоненциально мало и движение в основном устойчиво [1-3]. В обратном случае (так называемый критерий Чирикова [7]) движение неустойчиво, квазислучайно и применимы статистические методы.

Настоящая работа преследует две цели. Первая состоит в перенесении идей и методов этой теории на случай квантовых систем. Вторая состоит в ее приложении к движению атомов в изолированной молекуле, а также к молекуле в поле интенсивной электромагнитной волны, резонансной к одной из ее мод.

Теория нелинейного резонанса в квантовом случае дана в § 2 на простейшем примере одномерного движения (нелинейного осциллятора) под действием периодического по времени возмущения. В зависимости от ширины резонанса в отношении к постоянной Планка возможны два режима, в одном применима теория возмущений, в другом — квазиклассический метод. В последнем случае квантование удобно производить в переменных действие — угол. Приведен ряд примеров применения этой методики, в частности дан простой вывод спектра квазиэнергий [8, 9] для линейного параметрического и линейного внешнего резонансов, известных уже из точного решения [10, 9]. Проведено рассмотрение «стандартного» [11, 7] нелинейного резонанса, а также нелинейного резонанса вблизи основного состояния, имеющего место при возбуждении молекул резонансным полем.



Спасибо за внимание