

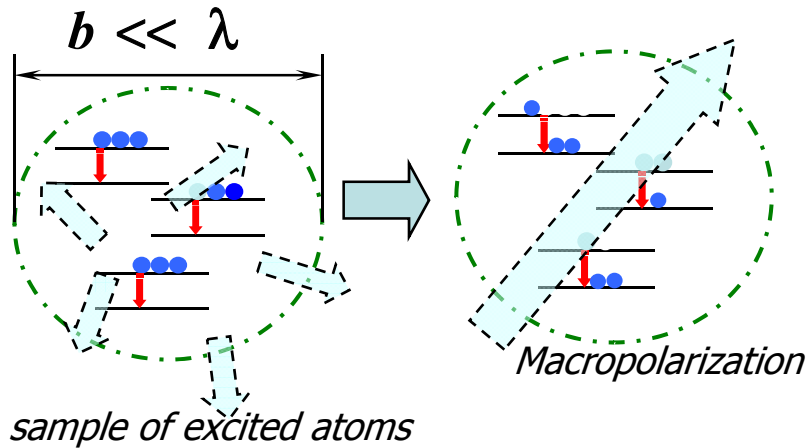


***Генерация и усиление мощных
ультракоротких микроволновых
импульсов: автомобильные решения,
солитоны, «волны-убийцы»***

***Н.С. Гинзбург, И.В.Зотова, Н.М.Рыскин
ИПФ РАН (Н.Новгород),
ИРЭ (Саратов)***

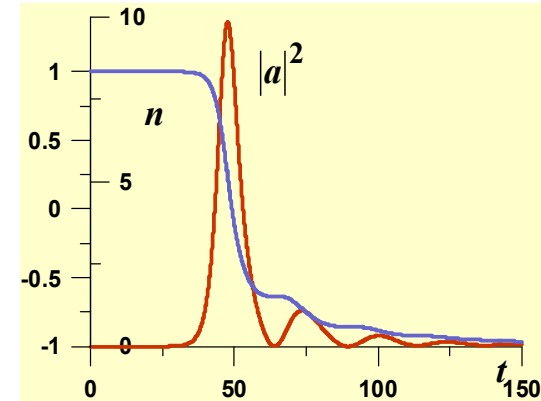
Superradiance in quantum electronics

Grain model (R.H.Dicke, 1954)

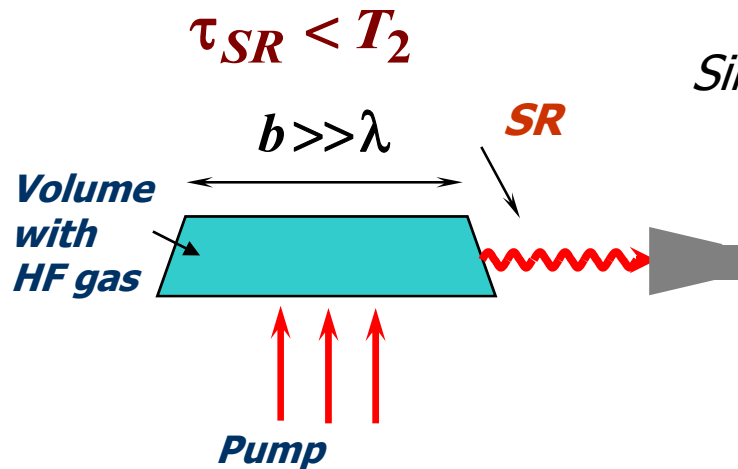


$$P_{SR} \sim N^2$$

$$\tau_{SR} \sim N^{-1}$$



Extended model (J.C.MacGillivray, M.S.Feld, N.Scribanowitz, A.V.Andreev ,...)



Single SR pulse radiation:

$$\lambda \ll b \leq l_c$$

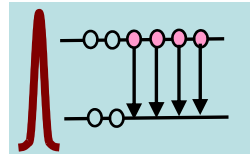
$$l_c \approx c(\text{Im } \omega)^{-1} \text{ - cooperative length}$$

It is the distance that the radiation propagates along the sample of inverted atoms for the time of instability growth-up

Генерация и распространение ультракоротких световых импульсов в резонансных средах

$$T_{pulse} < T_{1,2} \quad T_{1,2} - \text{времена релаксации}$$

Сверхизлучение Дике



Усиление и компрессия ультракоротких импульсов при распространении в двухуровневых активных (инвертированных) средах

Самоиндуцированная прозрачность и компрессия при распространении ультракоротких импульсов в пассивных (неинвертированных) средах

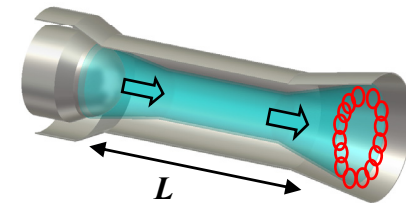
Основная проблема экспериментального наблюдения указанных эффектов в квантовой электронике - малые релаксационные времена для большинства активных сред

$$T_{pulse} \gg T_2 - \text{режим работы обычных лазеров}$$

В классической электронике в качестве прямого аналога оптического времени фазовой релаксации следует рассматривать время, связанное со столкновением частиц между собой или с ионным фоном. Но в экспериментально реализуемых условиях соответствующие времена существенно превосходят времена развития неустойчивостей

Ширина линии усиления определяется «временем жизни» частиц в пространстве взаимодействия, т.е., фактически, временем пролета

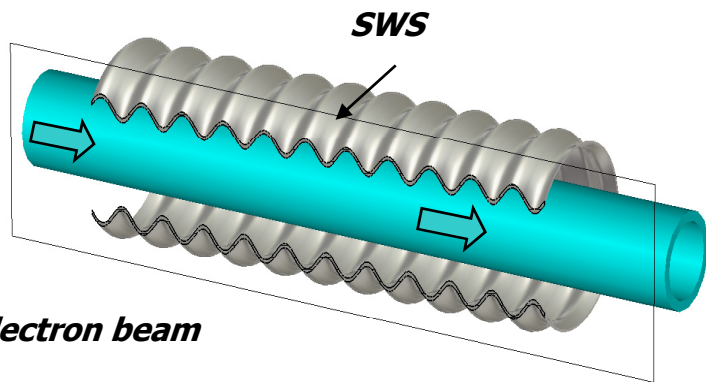
$$T_{transit} = \frac{L}{V_{\parallel}}$$



Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1967

Conventional microwave oscillators and amplifiers are based on stimulated emission of stationary electron beam

BWO, TWT



Electron beam

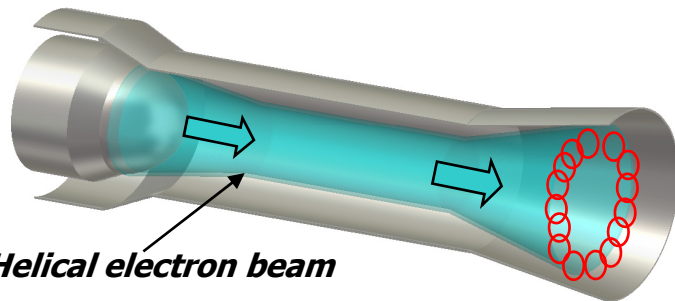
$$T_{em.pulse} \gg T_{transit}$$
$$T_{beam} \gg T_{transit}$$

$$T_{transit} = \frac{L}{V_{\parallel}}$$

- steady-state regimes of interaction

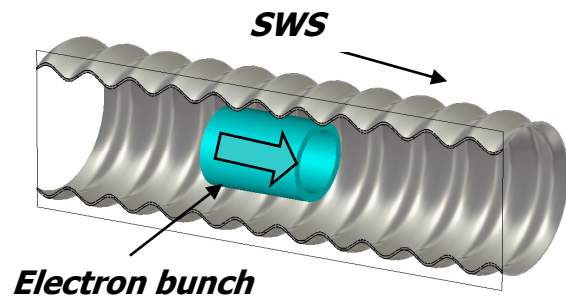
- generation threshold

Gyrotron



Helical electron beam

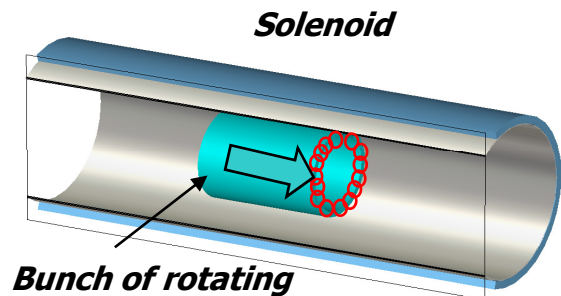
Superradiance in classical electronics – coherent single pulse emission from extended electron bunches



Cherenkov SR

$$T_{\text{bunch}} < T_{\text{transit}}$$

- pulse radiation;
- absence of instability threshold in spite of radiation losses

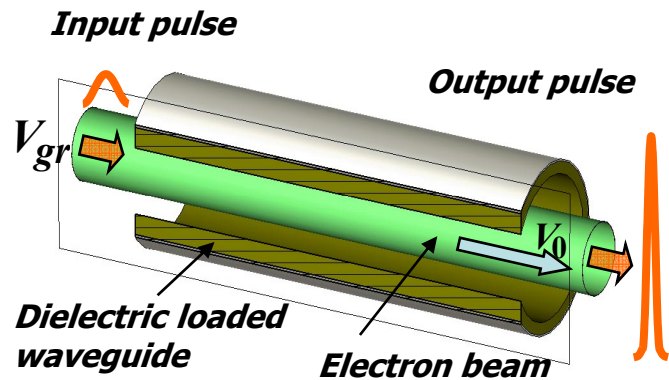


Cyclotron SR

Amplification of ultrashort e.m. pulses propagating along quasi-stationary electron beams

$$T_{\text{em.pulse}} < T_{\text{transit}}$$

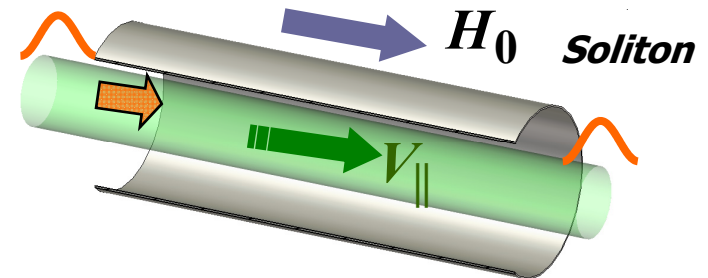
$$T_{\text{bunch}} < T_{\text{transit}}$$



Self-induced transparency & compression of ultrashort em pulses propagating in the beam of non-excited classical oscillators

$$\omega - hV_{\parallel} \approx \omega_H^0$$

$$\beta_{\perp 0} = 0$$



План

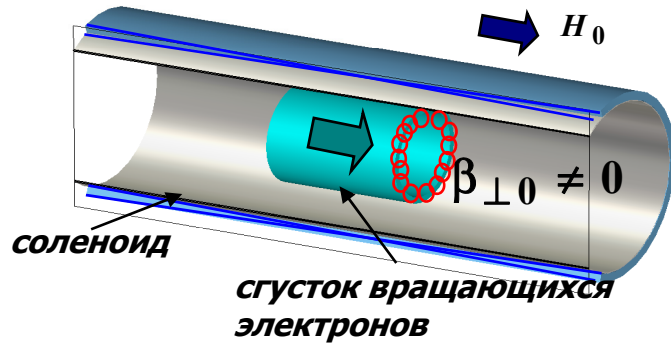
1. Сверхизлучение протяженных электронных сгустков
2. Усиление коротких микроволновых импульсов с одновременной компрессией
3. Самоиндуцированная прозрачность и формирование солитонов в условиях циклотронного резонансного поглощения
4. Эффект пассивной синхронизации мод и формирование диссипативных солитонов в электронных генераторах с просветляющимся поглотителем в цепи обратной связи
5. «Волны (импульсы) убийцы» в гиротронах

1. Сверхизлучение – когерентное импульсное излучение протяженных электронных сгустков

Железняков В.В., Кочаровские В.В. и Вл.В.
ИПФ РАН: Гинзбург Н.С., Зотова И.В.

$$\lambda \ll L_{\text{bunch}} \leq L_{\text{cooperative}}$$

Циклотронное СИ

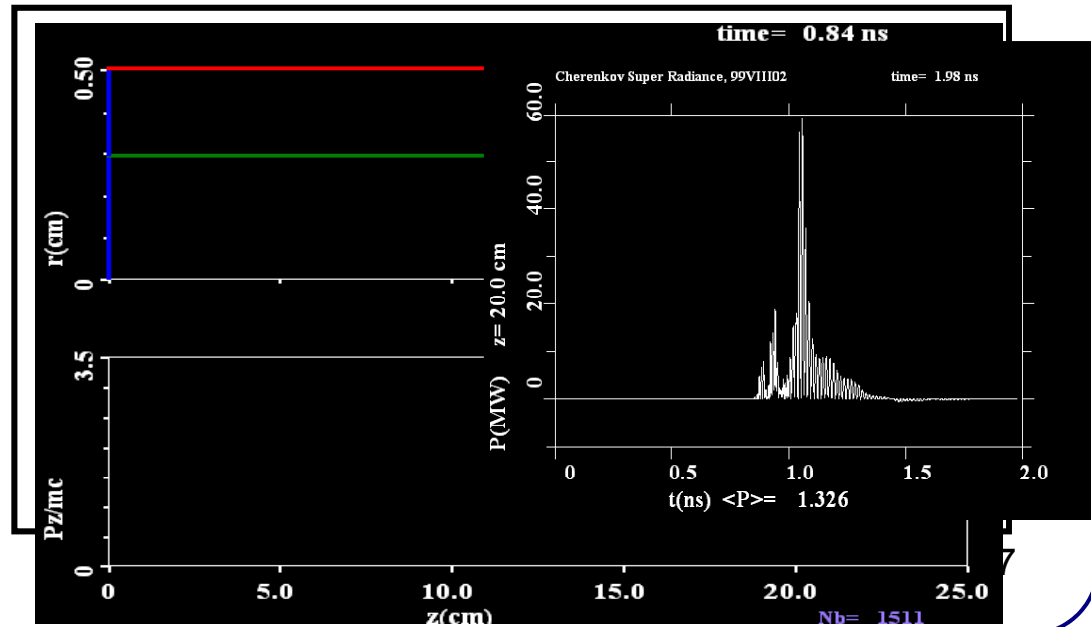
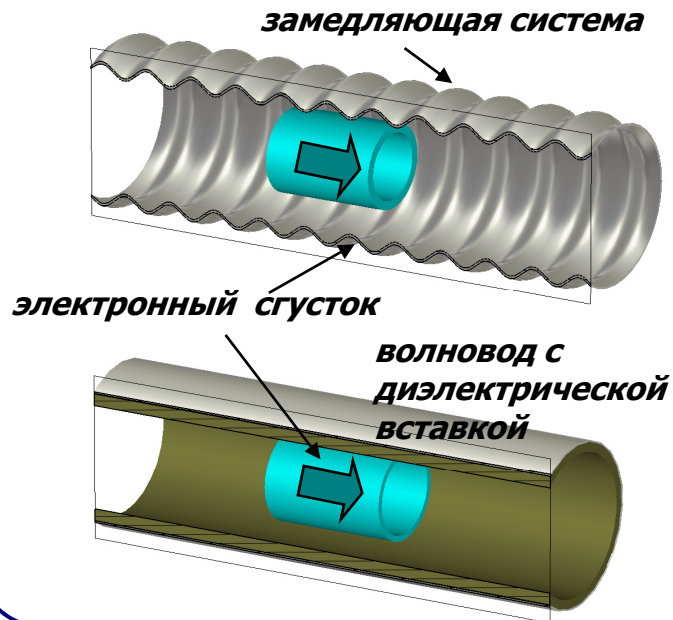


Кооперативная длина - длина проскальзывания излучения относительно сгустка за время развития неустойчивости

Когерентность излучения обеспечивается за счет:

- развития группировки;
- проскальзывания волны относительно сгустка вследствие разности групповой скорости излучения и поступательной скорости частиц.

Черенковское СИ

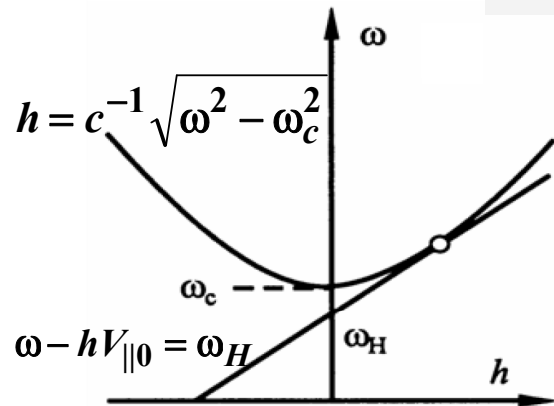


Cyclotron SR of electron bunch in the group synchronism

N.Ginzburg, A.Sergeev, I.Zotova et al JETP Lett. 1994

Phys.Rev.Lett. 1997

Lab frame (grazing regime)



$$V_{||0} \approx V_{gr}$$

$$\omega \approx \gamma_{||0}^2 \omega_H$$

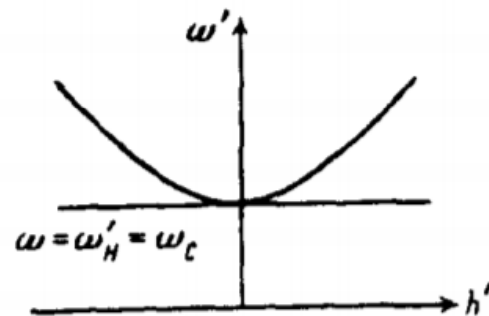
$$\gamma = (1 - \beta_{||0}^2 - \beta_{\perp 0}^2)^{-1/2}$$

$$\omega_H = eH_0 / mc\gamma \quad - \text{gyrofrequency}$$

Comoving reference frame

(radiation of unmovable electron bunch near the cut-off frequency)

$$\omega'_H \approx \omega_c$$



Advantages of the group synchronism regime

- decreasing of the sensitivity to the spread in the electron parameters

- the rather low rate of electromagnetic energy extraction from the electron bunch results in the maximum gain of SR instability

Basic equations in the comoving reference frame

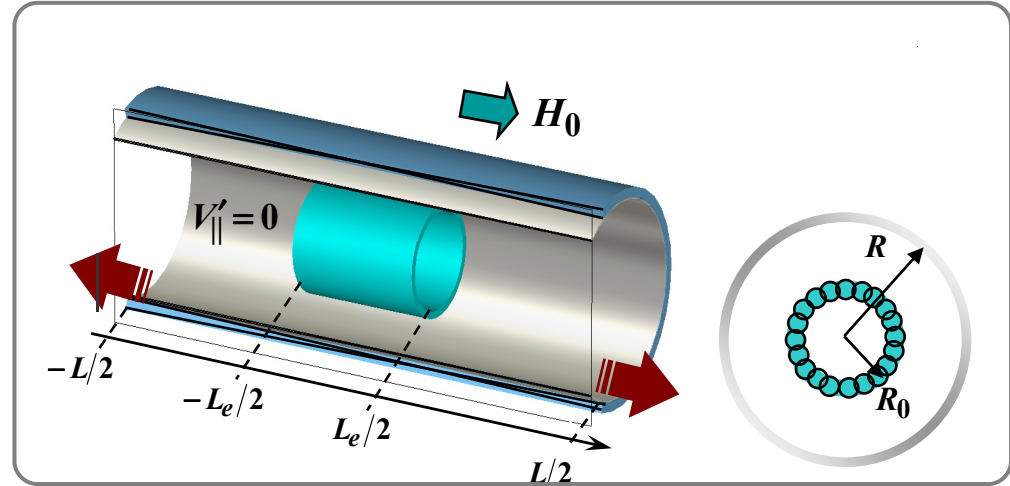
$$\vec{E}' = \text{Re}(\vec{E}'_{\perp}(\vec{r}'_{\perp})A'(z', t')e^{i\omega_c t'})$$

$$\omega'_H \approx \omega_c$$

$$i \frac{\partial^2 a'}{\partial Z'^2} + \frac{\partial a'}{\partial \tau'} = if(Z') \frac{G}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\theta_0$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau'} + ip(|p|^2 - \Delta - 1) = ia'$$

$$\Delta = \frac{2(\omega'_H - \omega_c)}{\omega_c \beta_{\perp 0}'^2} \quad - \text{detuning parameter}$$



$$G = 16 \frac{eI_e}{mc^3} \frac{1}{\beta_{\perp 0}^4 \beta_{\parallel 0} \gamma_{\parallel 0}^5} \frac{J_{m-1}^2(R_0 \omega_c / c)}{(\nu_n^2 - m^2) J_m^2(\nu_n)}$$

Initial and boundary conditions

$$a'|_{\tau'=0} = 0$$

$$p|_{\tau'=0} = e^{i(\theta_0 + r \cos \theta_0)}$$

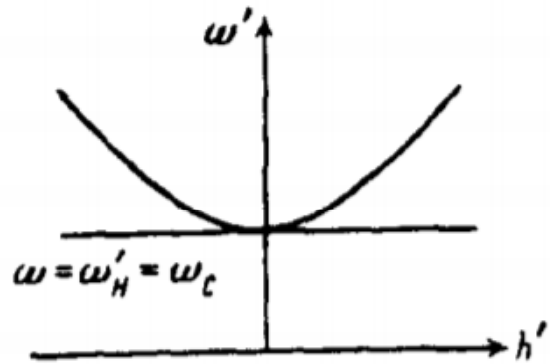
$$\theta_0 \in [0, 2\pi) \quad r \ll 1$$

$$a' \left(\pm \frac{L}{2}, \tau' \right) \pm \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^{\tau'} \frac{1}{\sqrt{\tau' - \tau''}} \frac{\partial a(Z', \tau'')}{\partial Z'} \Big|_{Z' = \pm \frac{L}{2}} d\tau'' = 0$$

- radiation boundary conditions

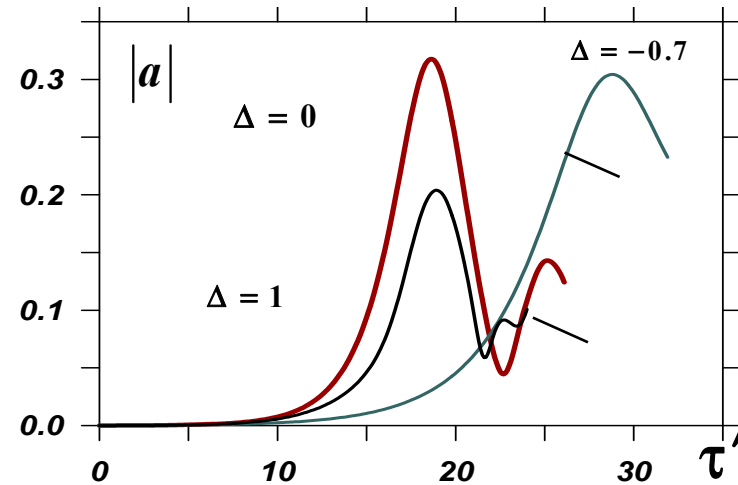
Results of simulations

In the comoving reference frame

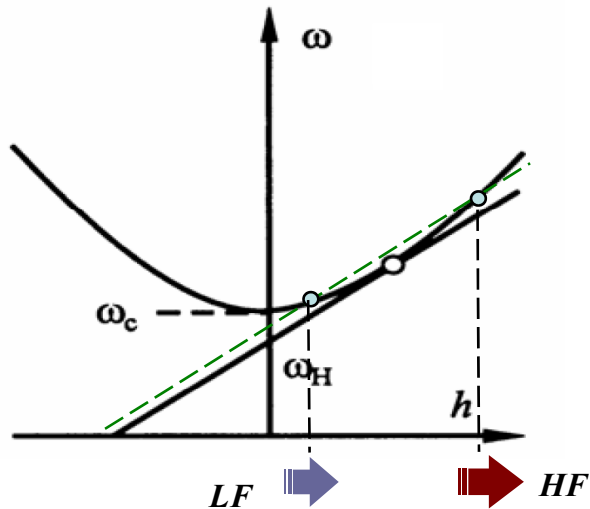


Cyclotron SR pulses for different detuning parameters

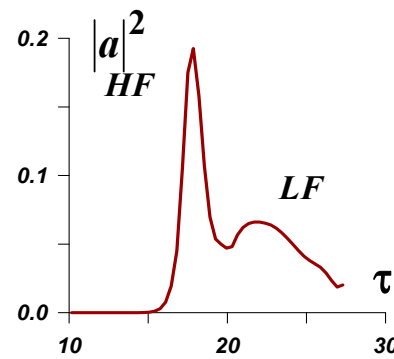
$$\Delta \sim \omega'_H - \omega_c$$



In the lab reference frame



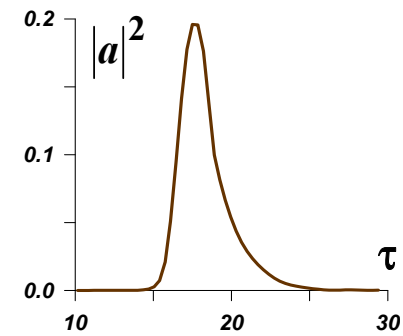
Double pulse



$$\Delta = 0$$

$$\omega'_H \approx \omega_c$$

Monopulse

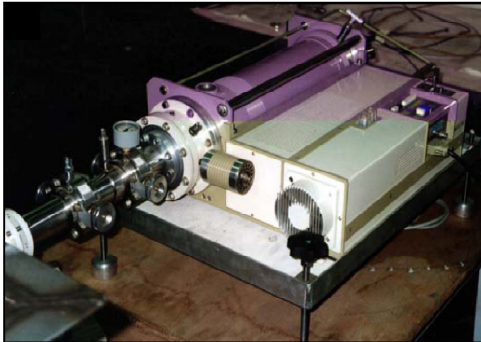


$$\Delta < 0$$

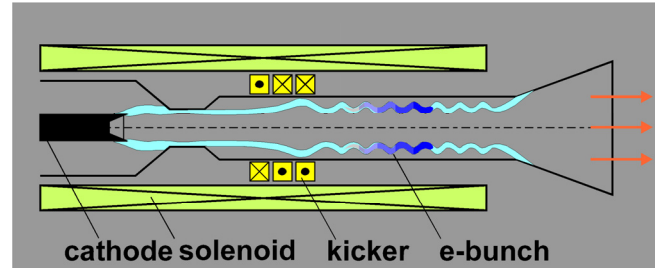
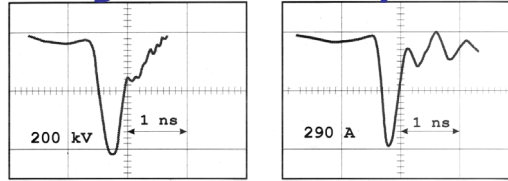
$$\omega'_H < \omega_c$$

Experimental observation of cyclotron SR in Ka band

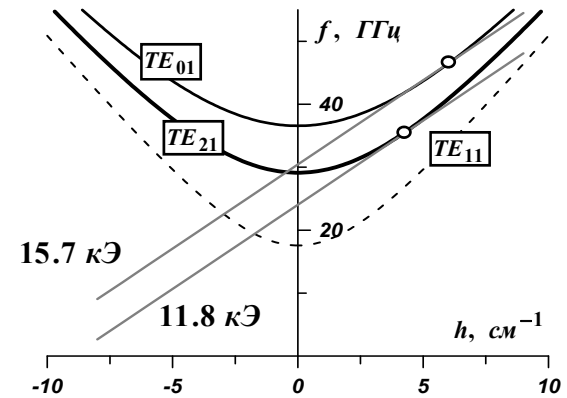
High-current accelerator RADAN (IEP RAS)



Voltage and current pulses



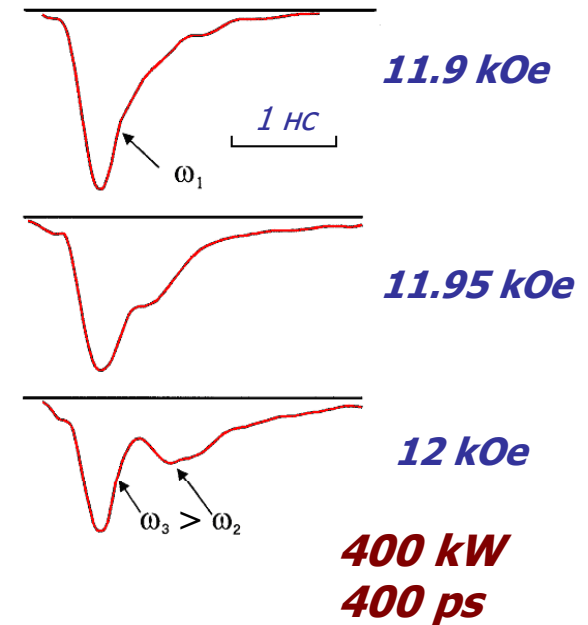
Dispersion diagram



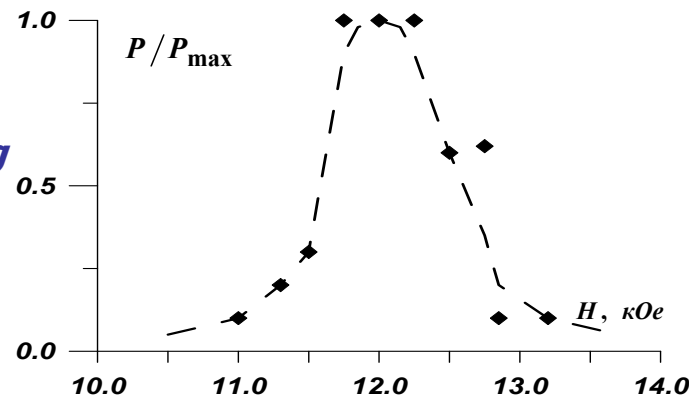
Experimental parameters

Magnetic field	11-16 kOe	Electron current	250 A
Operating mode	TE ₂₁ (TE ₀₁)	Electron energy	200 keV
Waveguide radius	0.5 cm	Bunch duration	400 ps
		Pitch-factor	~1

Form of SR pulses vs guiding magnetic field



Peak power of SR pulses vs the intensity of guiding magnetic field



Phys.Rev.Lett. 1997

Черенковское сверхизлучение электронных сгустков при взаимодействии со встречной волной в периодически-гофрированном волноводе

$$\vec{E}(z, t) = \text{Re} \left(A(z, t) \sum_{-\infty}^{+\infty} \vec{E}_s^n(\vec{r}_\perp) e^{i\omega t + in\bar{h}z + ihz} \right)$$

Основные уравнения

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} - \frac{\partial a}{\partial Z} = f(\tau) \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta$$

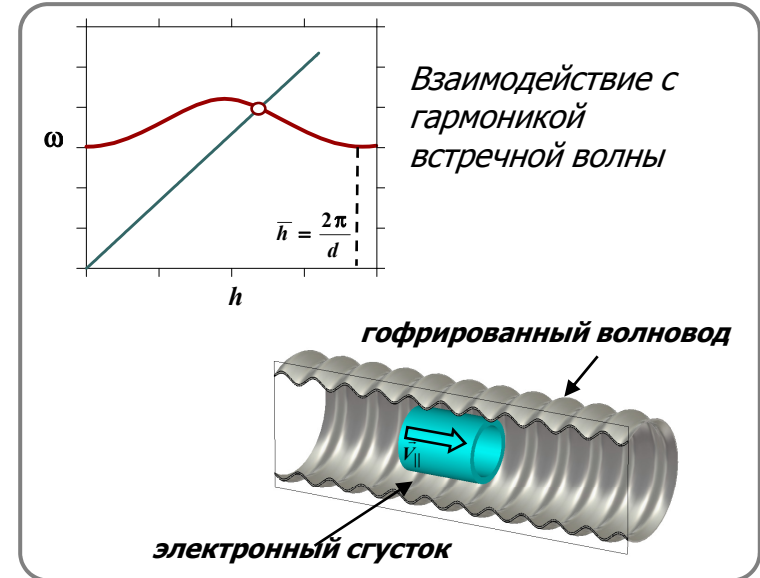
$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = \left(1 + v \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)^{3/2} \text{Re}(a e^{i\theta})$$

$$\tau = \omega \left(t - \frac{z}{V_{\parallel 0}} \right) \left(\frac{1}{\beta_{gr}} + \frac{1}{\beta_{\parallel 0}} \right)^{-1},$$

$$Z = \frac{\omega z}{c} \quad a = \frac{eA\tilde{E}_z^{(-1)}(R_0)}{m\omega C^2 \gamma_0^3 V_0}$$

$$C = \left(\frac{eI_b \tilde{Z}}{2mc^2 \gamma_0^3} \right)^{1/3}$$

$$\tilde{Z} \equiv 2 \left[\tilde{E}_z^{(-1)}(R_0) \right]^2 / k^2 N$$



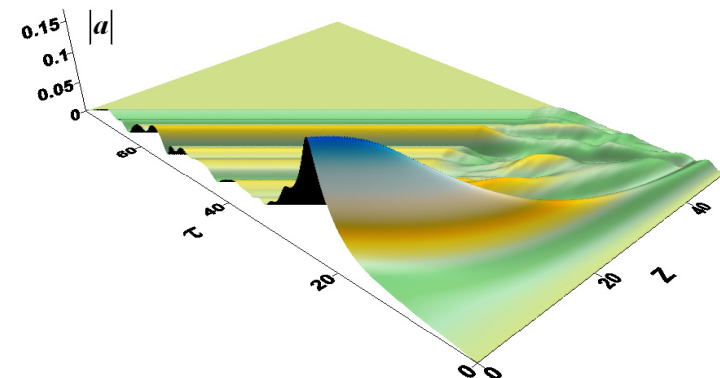
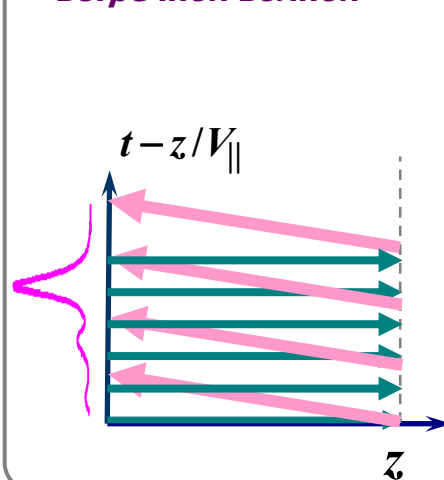
Начальные и граничные условия

$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 + r \cos \theta_0, \quad \theta_0 \in [0, 2\pi),$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = 0, \quad a|_{Z=L} = 0, \quad a|_{\tau=0} = 0$$

$$f(\tau) = 1, \quad \tau \in [0, T_e]$$

Формирование импульса черенковского СИ при взаимодействии со встречной волной



$$l_c \sim (\text{Im} \Gamma)^{-1} (\beta_{gr} + \beta_{\parallel})$$

Автомодельные решения

Ростунцова А.А.

Автомодельная подстановка:

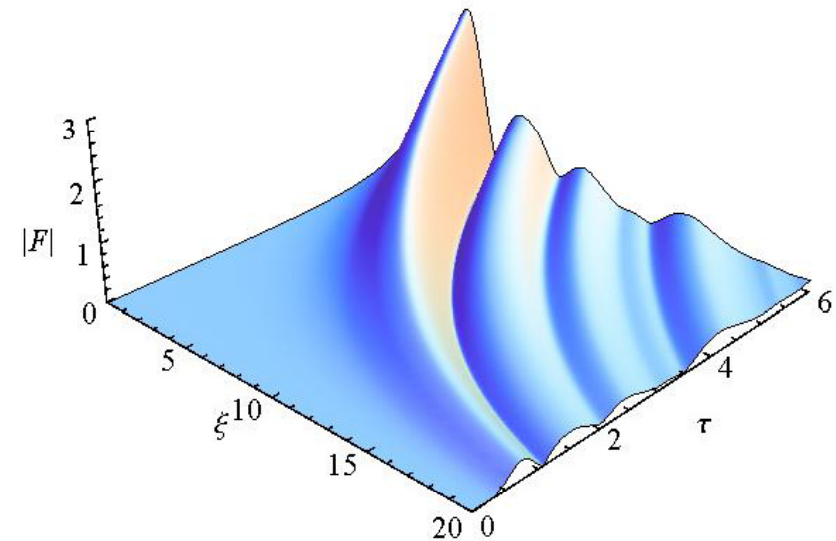
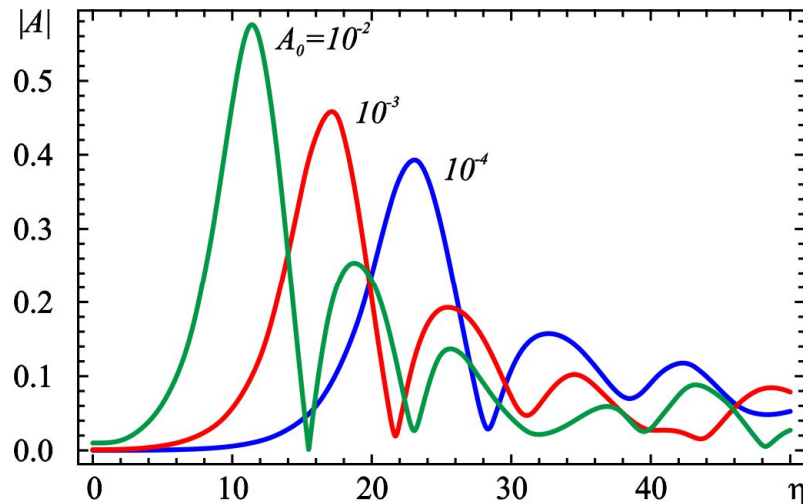
$$\xi = \sqrt{\tau}(Z + \tau),$$

$$F(Z, \tau) = \tau A(\xi), \quad \theta(Z, \tau) = \vartheta(\xi).$$

Автомодельные решения подчиняются системе обыкновенных ДУ

$$\frac{d^2 \vartheta}{d\xi^2} = -\operatorname{Re}(Ae^{i\vartheta}),$$

$$\frac{dA}{d\xi} = -\frac{2}{\xi} \left(A + \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\vartheta} d\vartheta_0 \right).$$



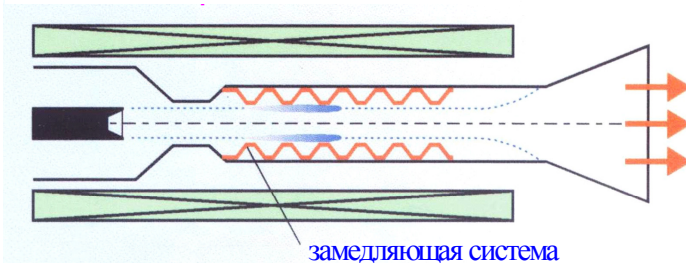
Характеристики импульса:

Пиковая амплитуда $A_{\max} \sim \tau$, Ширина импульса $\Delta \sim 1/\sqrt{\tau}$

Положение максимума $\xi_{\max} = \xi_0 - \tau + \frac{\eta_0}{\sqrt{\tau}}$

Экспериментальное наблюдение черенковского СИ

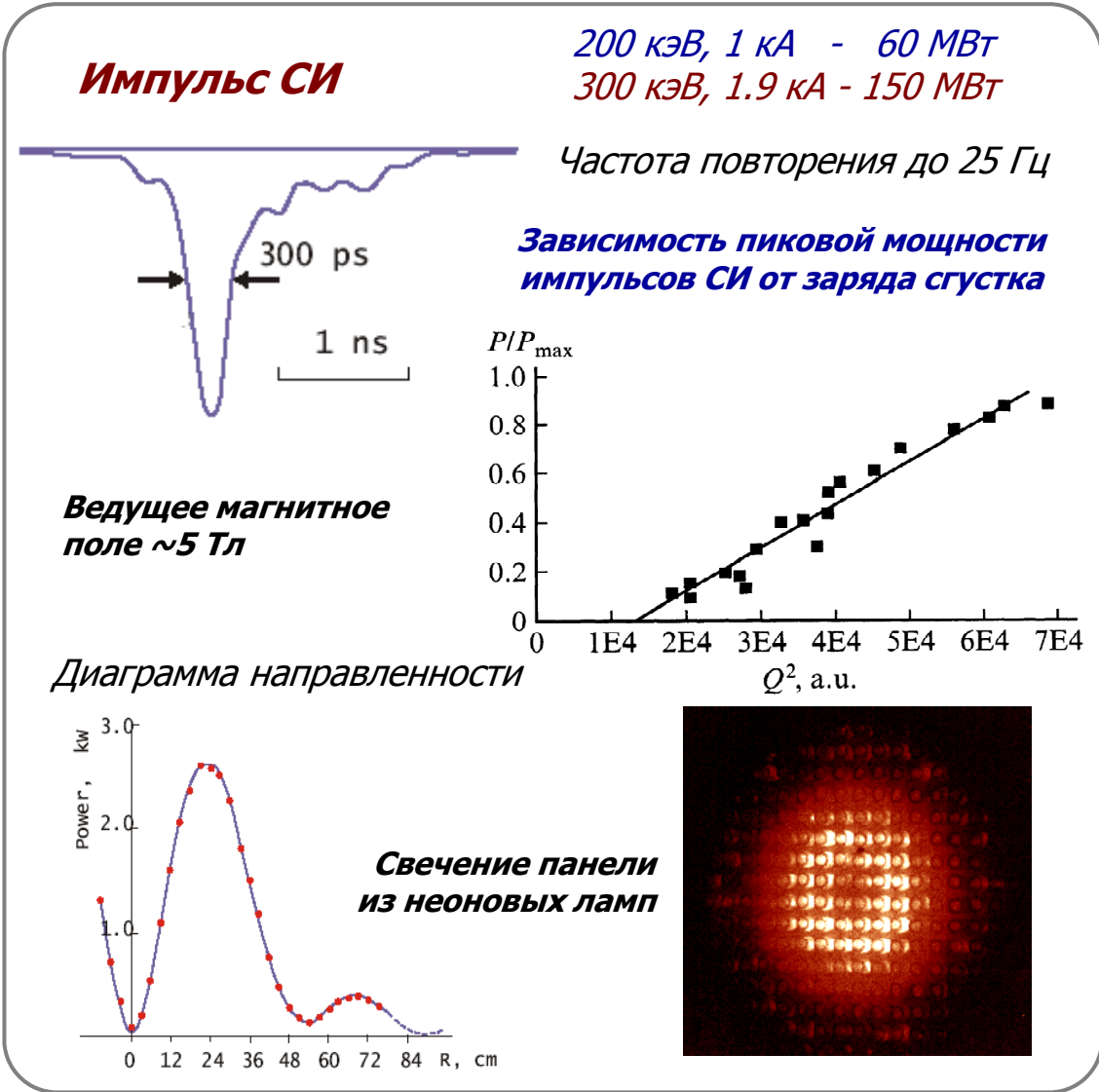
2000 - 2002 г.



Ka-band (рабочая частота 38 ГГц)



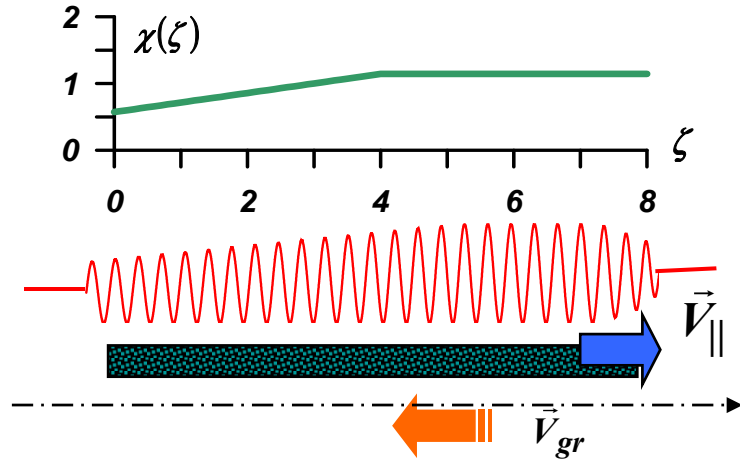
ИПФ РАН (Н.Новгород)
ИЭФ УрО РАН (Екатеринбург)
Strathclyde University (Glasgow, UK)



Генерация импульсов СИ с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного пучка

S.Korovin, V.Rostov, V.Shpak, M.Yalandin, N. Ginzburg, I.Zotova, A.Sergeev Phys.Rev.E 74, 016501 (2006)

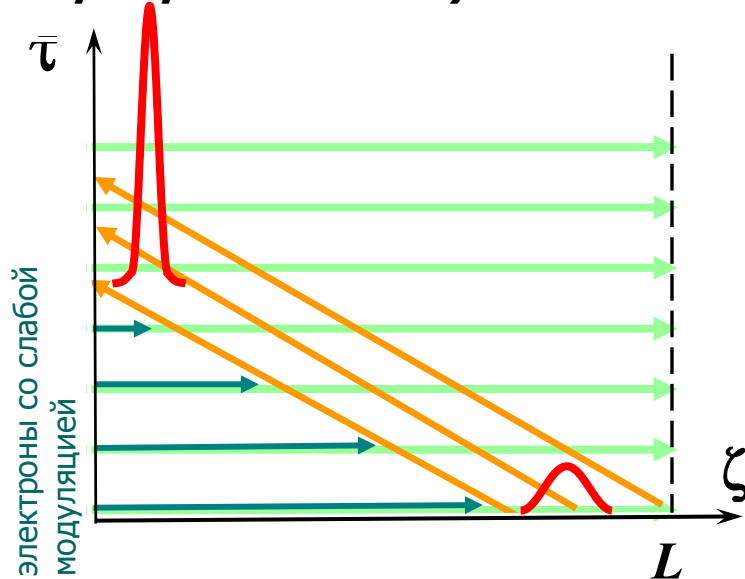
Профилированная зам.система



$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} = \left\{ \left[1 + v \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \right]^{3/2} \right\} \chi(\zeta) \operatorname{Re}(a e^{i\theta})$$

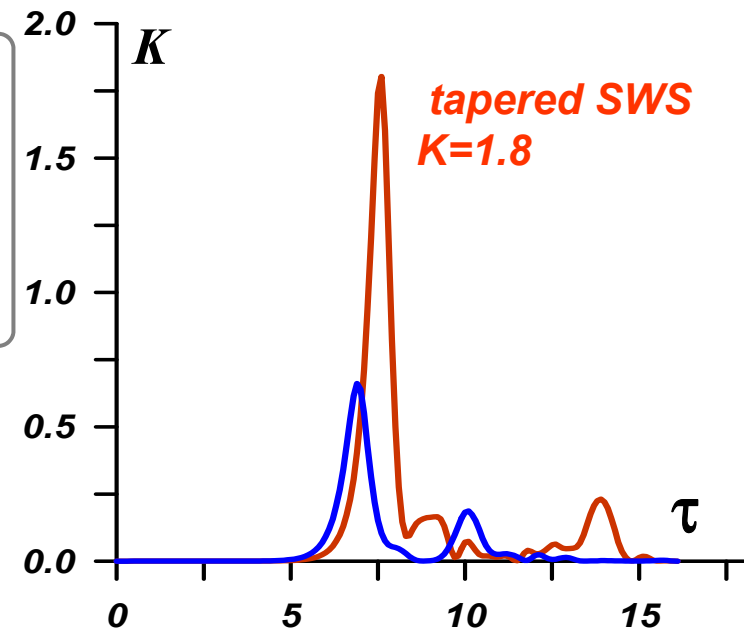
$$\frac{\partial a}{\partial \tau} - \frac{\partial a}{\partial \zeta} = \chi(\zeta) f(\tau) \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$$

Формирование импульса СИ



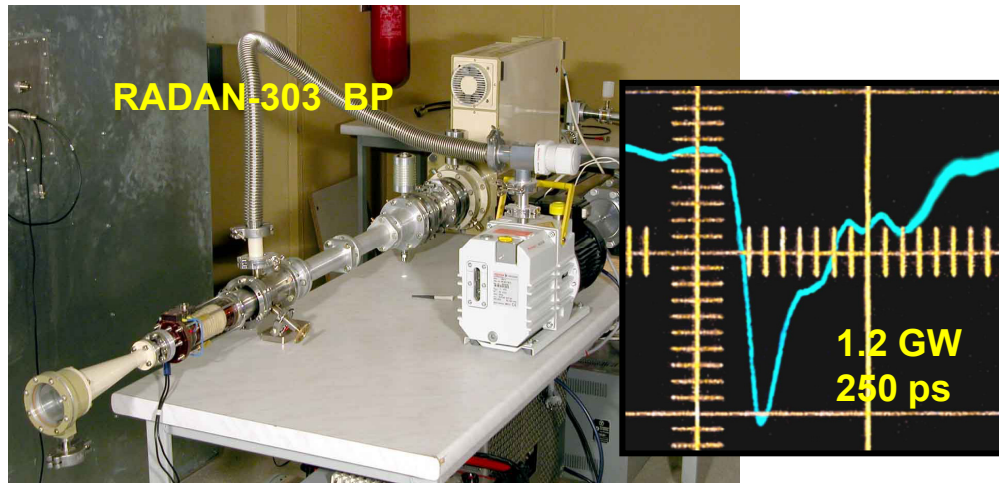
$$K = \frac{P_{SR}}{P_{beam}} > 1$$

- коэффициент конверсии



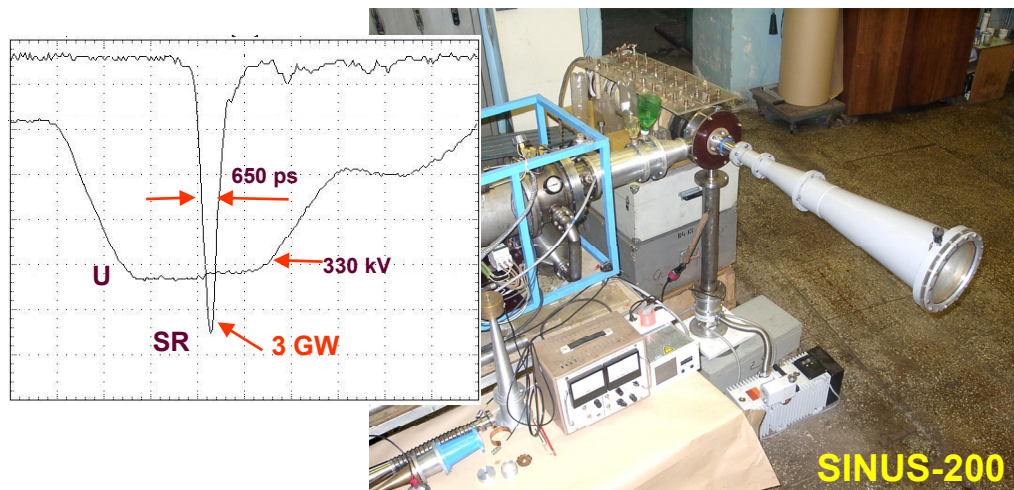
Генерация импульсов СИ с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного пучка

ИЭФ УрО РАН, ИСЭ РАН



Ka-BAND

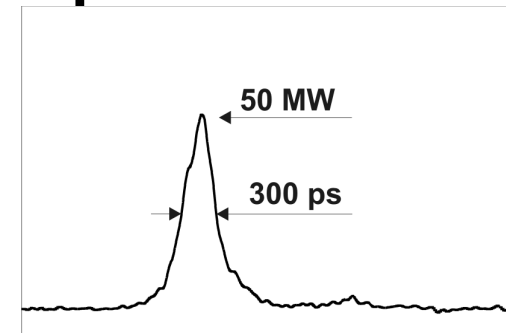
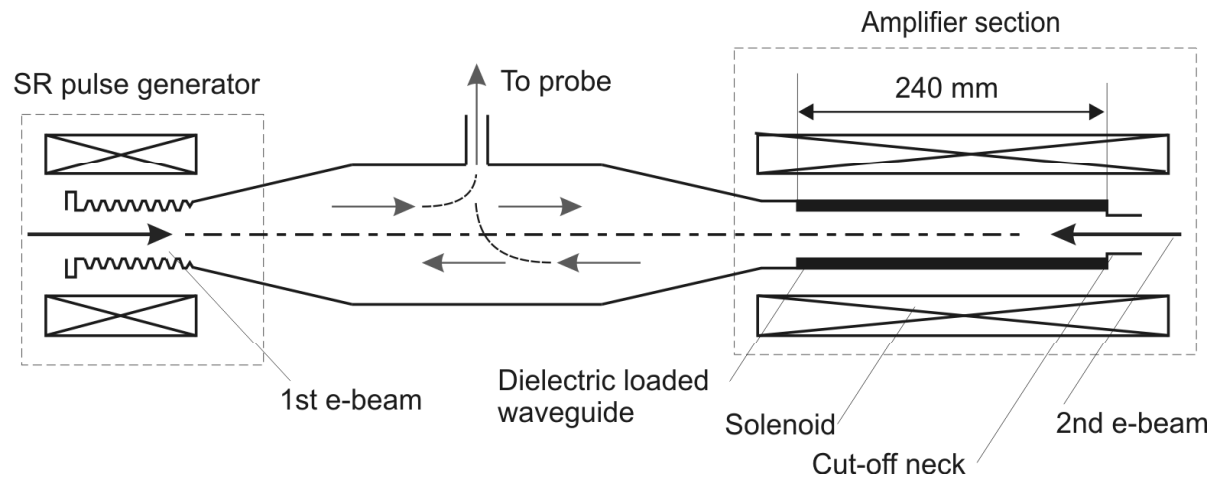
Энергия электронов – 300 кэВ
Ток пучка – 2.2 кА
Мощность пучка – **0.7 ГВт**
Длительность импульса СИ – 200 пс
Пиковая мощность – **1.2 ГВт**
Коэффициент конверсии – 1.5



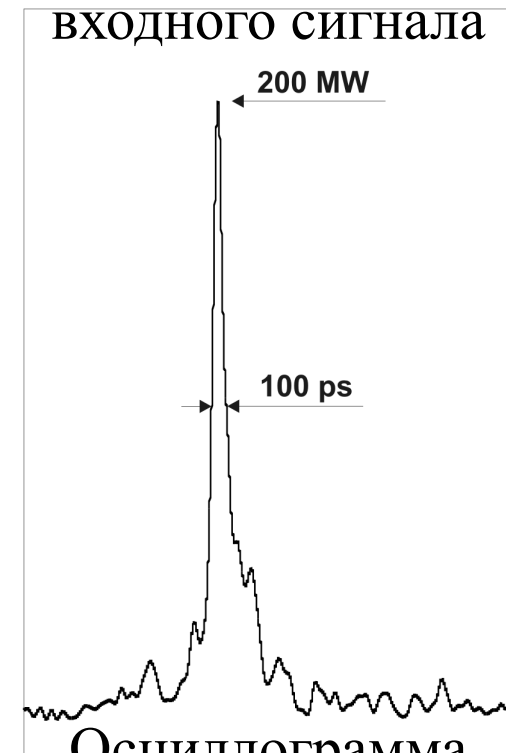
X-BAND

Энергия электронов – 330 кэВ
Ток пучка – 5 кА
Мощность пучка – **1.7 ГВт**
Длительность импульса СИ – 650 пс
Пиковая мощность – **3 ГВт**
Коэффициент конверсии – 1.8

Наблюдение усиления импульсов с одновременной компрессией



Осциллограмма
входного сигнала



Осциллограмма
выходного сигнала

Яландин М.И., и др. Эффект нелинейной компрессии ультракоротких микроволновых импульсов в процессе усиления квазистационарными электронными потоками // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т.91. С. 620.

Усиление короткого импульса в ЛБВ

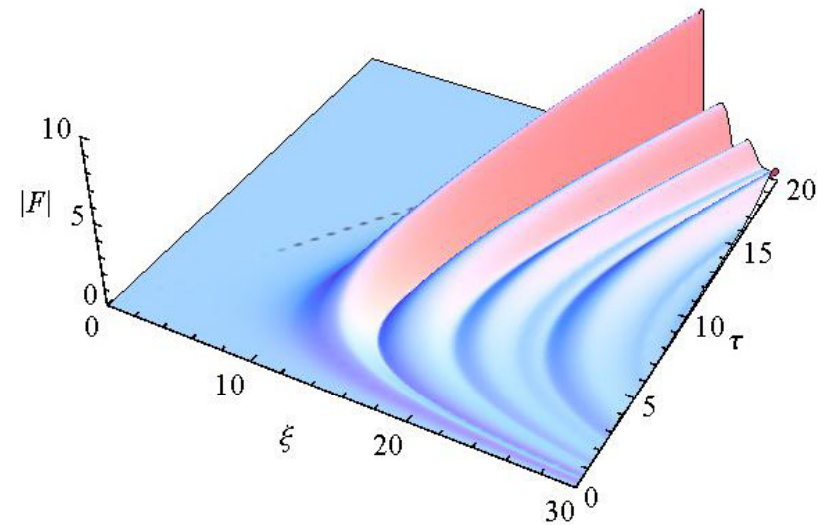
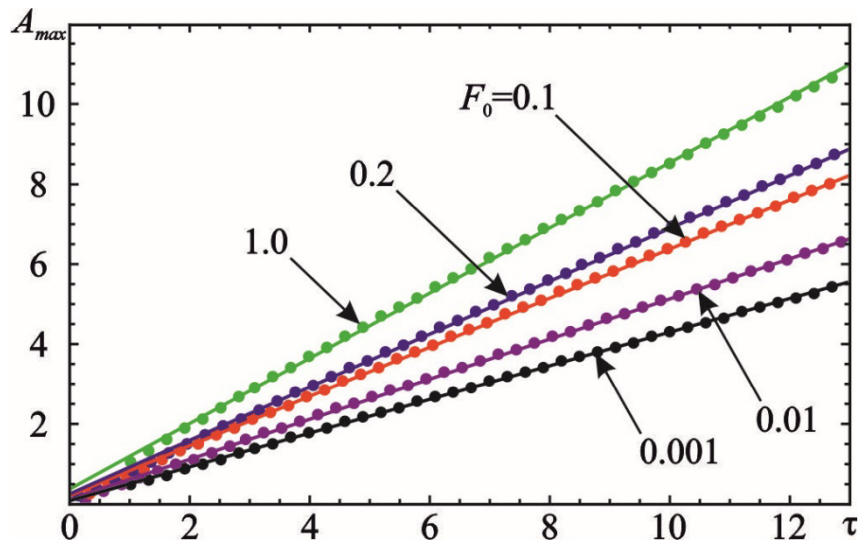
$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = -\text{Re}(F e^{i\theta})$$

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} + \frac{\partial F}{\partial Z} = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$$

Автомодельные решения

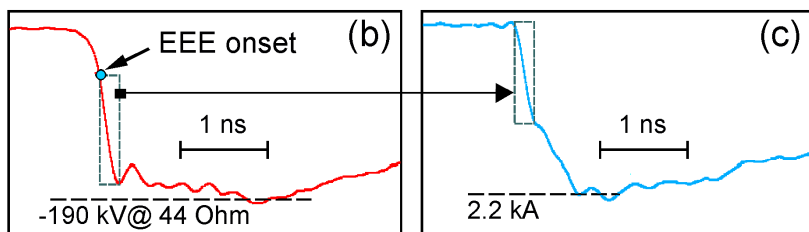
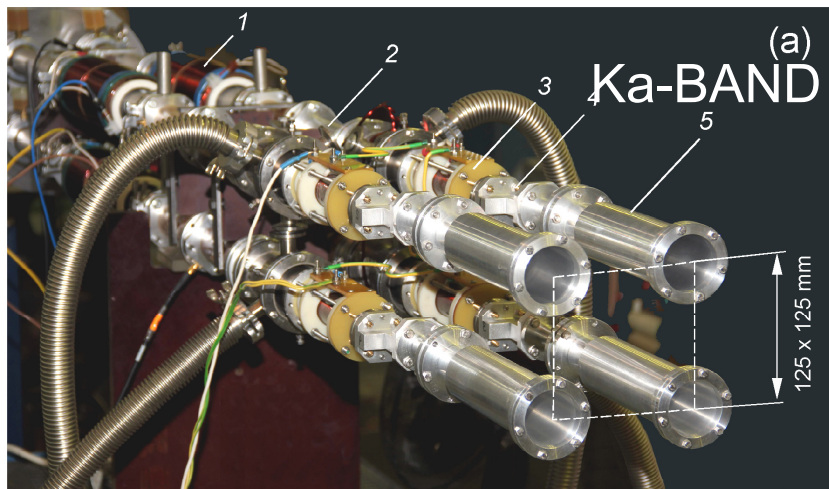
$$A_{\max} \propto \tau, \quad 1/\Delta^2 \propto \tau,$$

$$Z_{\max} = Z_0 + \tau + \xi_0/\sqrt{\tau}.$$



Когерентное сложение импульсов черенковского сверхизлучения, инициируемых резким фронтом электронного сгустка

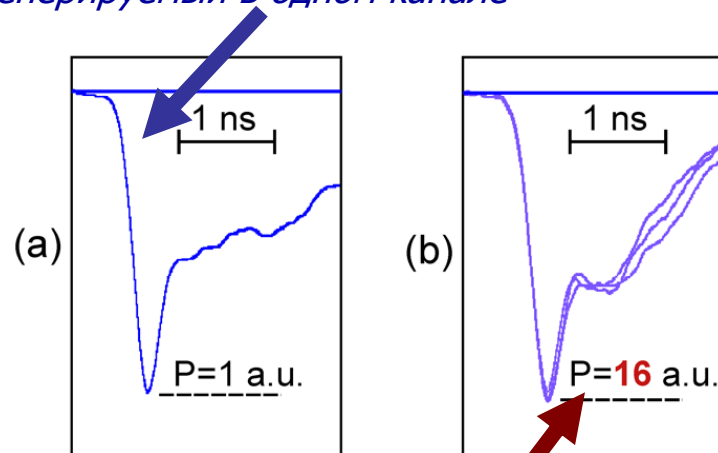
Четырёхканальная СИ ЛОВ 8 мм-диапазона



(b) Импульс ускоряющего напряжения с обостренным передним фронтом.
(c) Точный импульс на входе в зам. систему.

*Интенсивность излучения в максимуме
интерференционной картины
эквивалентна излучению от одного
источника с пиковой мощностью 10 ГВт.*

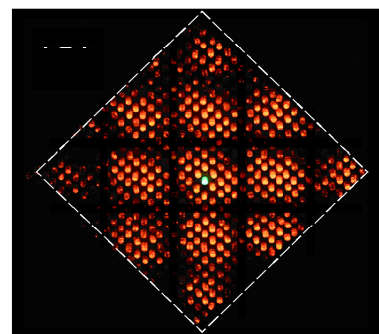
*Импульс СИ с пиковой мощностью 600 МВт,
генерируемый в одном канале*



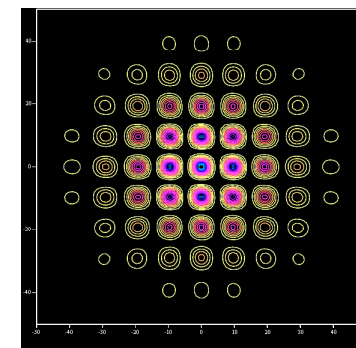
*Суммарные импульсы СИ с 16-ти кратным
ослаблением по мощности*

*Интерференционная картина
от 4-х источников импульсов СИ*

эксперимент

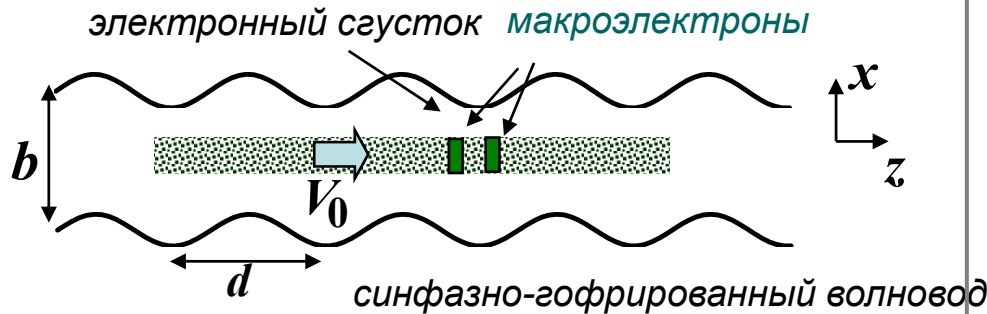


моделирование

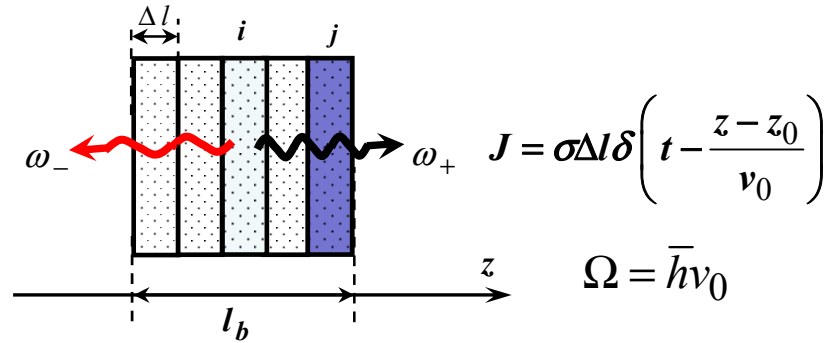


Инициация черенковского СИ спонтанным излучением фронта электронного сгустка

Модель планарного волновода со слабой синфазной гофрировкой



Электронный сгусток представляется как газ макрочастиц, взаимодействующих между собой через поля излучения



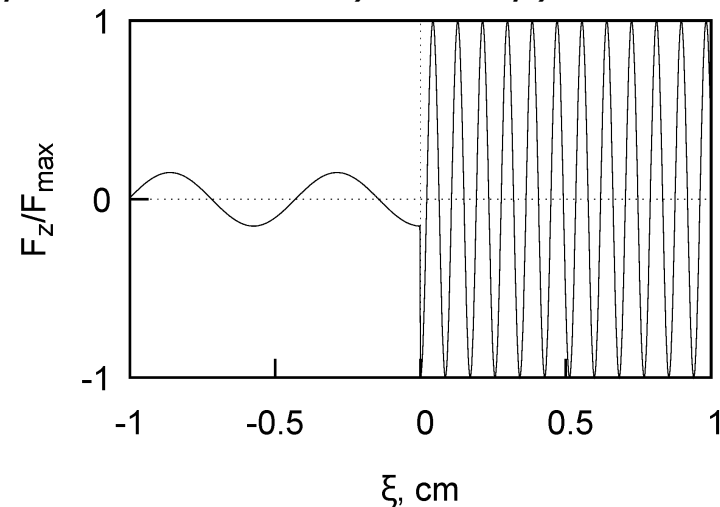
Поле излучения одной макрочастицы

$$E_x(\tau, \xi, \xi_0) = \begin{cases} \frac{2\pi\bar{h}b_1\sigma\Delta l\beta_0}{b} \cos\left[\Omega\tau + \frac{\bar{h}(\beta_0\xi + \xi_0)}{1+\beta_0}\right], & \xi < \xi_0, \\ \frac{2\pi\bar{h}b_1\sigma\Delta l\beta_0}{b} \cos\left[\Omega\tau - \frac{\bar{h}(\beta_0\xi - \xi_0)}{1-\beta_0}\right], & \xi > \xi_0, \end{cases}$$

Усреднённая продольная сила, с которой одна макрочастица действует на другие:

$$F_z = -e\langle E_z \rangle \quad E_z = -\bar{h}b_1 \cos(\Omega\tau + \bar{h}\xi)E_x$$

$$F_z = \begin{cases} -\frac{\pi(\bar{h}b_1)^2 e|\sigma|\Delta l\beta_0}{b(1+\beta_0)} \cos\left(\frac{\bar{h}(\xi - \xi_0)}{1+\beta_0}\right), & \xi < \xi_0 \\ -\frac{\pi(\bar{h}b_1)^2 e|\sigma|\Delta l\beta_0}{b(1-\beta_0)} \cos\left(\frac{\bar{h}(\xi - \xi_0)}{1-\beta_0}\right), & \xi > \xi_0 \end{cases}$$

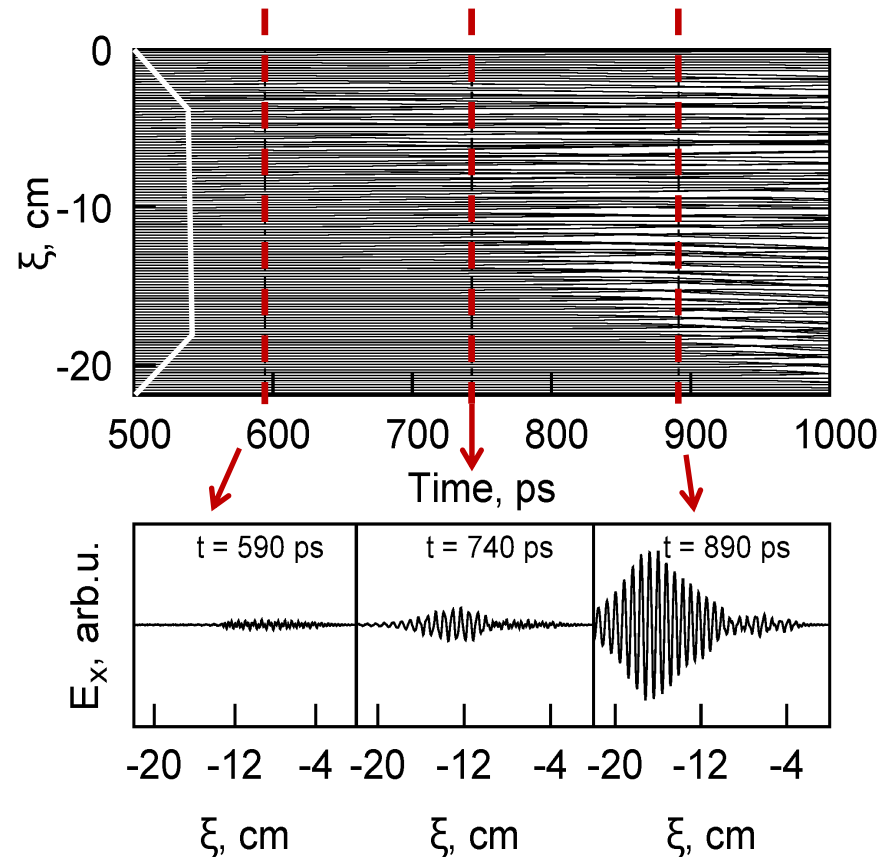
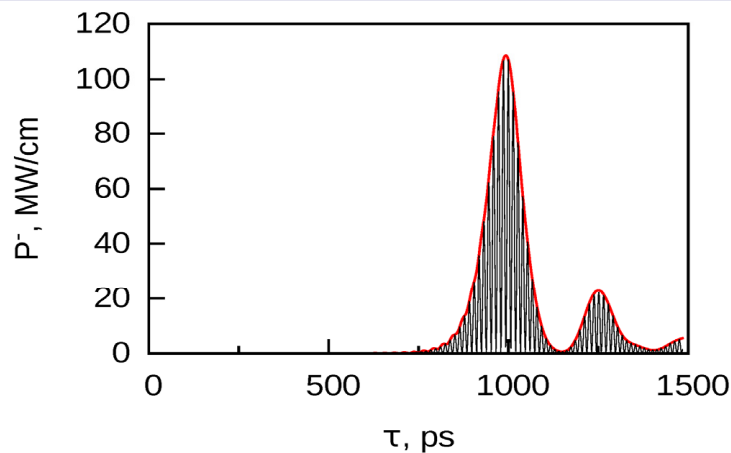


Инициация черенковского СИ спонтанным излучением фронта электронного сгустка

N.S.Ginzburg, A.A.Golovanov, G.A.Mesyats et.al, «Generation of Electromagnetic Fields of Extremely High Intensity by Coherent Summation of Cherenkov Superradiance Pulses» *Phys. Rev. Lett.* 115, 114802 (2015)

Параметры моделирования:

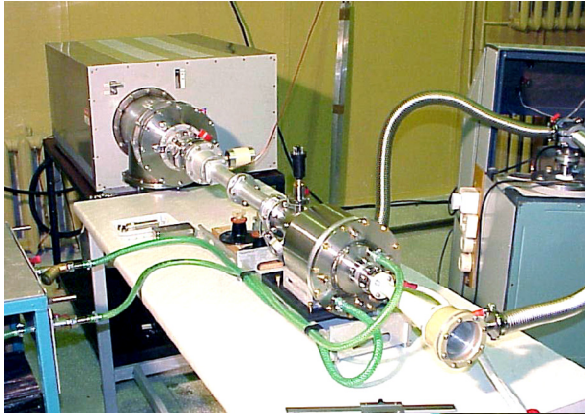
Энергия электронов	250 keV
Ток электронного сгустка	850 A/cm
Расстояние между стенками волновода b	0.2 cm
Период гофрировки d	0.33 cm
Амплитуда гофрировки b_1	0.013 cm
Длительность импульса тока	1 ns
Длительность фронтов	300 ps
Частота НЧ излучения	38 GHz



Голованов А. XVIII конкурс работ молодых ученых. ИПФ РАН

Новый класс генераторов импульсного электромагнитного излучения миллиметрового и сантиметрового диапазонов на основе эффектов СИ

Гибридный модулятор



Ka-band

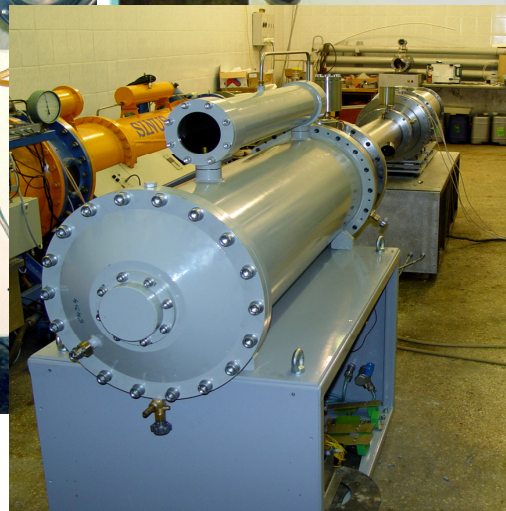
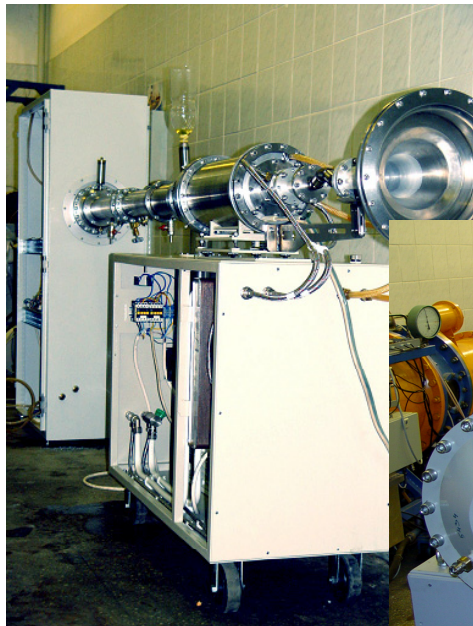
ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург

Длительность импульсов СИ – 250 пс
Пиковая мощность – 300 МВт
Частота повторения – 3500 Гц
Средняя мощность – 200 Вт

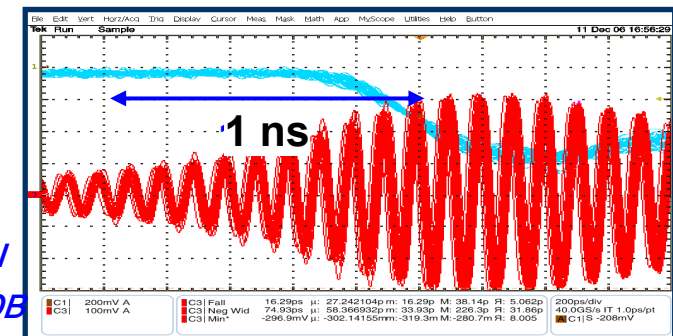
X-band

*ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург
ИСЭ СО РАН, Томск*

Длительность импульса СИ – 1.3 нс
Пиковая мощность – 0.4-1.2 ГВт
Частота повторения – 10-1000 Гц
Средняя мощность – 3 кВт



*Осциллограммы
10 СИ-импульсов*



Сверхизлучение электронных сгустков при возбуждении поверхностных волн

Гофрированный волновод

$D/\lambda \sim 1$

X-band
Ka-band
W-band
G-band

электронный сгусток

**RADAN
SINUS**

Сильноточные ускорители

THz-band

Формирование поверхностной волны

Переход к сверхразмерным или открытым электродинамическим системам

Требования к источникам электронных сгустков

- Укорочение длительности сгустков до 20-40 пс
- Повышение энергии до нескольких МэВ
- Плотность тока 50-100 кА/см²

Фотоинжекторы

$L_{\perp} \sim \frac{\lambda \gamma}{2\pi}$

$b_e \leq L_{\perp} \quad H \leq L_{\perp}$

Квазиоптический метод описания формирования поверхностной волны
Ginzburg N.S., Malkin A.M. et.al Appl.Phys.Lett. 2011
Phys. Rev. Lett., 2013

$b(z) = b_1 \cos(\bar{h}z),$
 $\bar{h} = 2\pi/d, \quad b_1 \bar{h} \ll 1$

Представление поля в виде 2-х встречных квазиоптических пучков

$H_x = \text{Re}(A_+(z, y, t)e^{i(\omega t - kz)} + A_-(z, y, t)e^{i(\omega t + kz)}) \quad E_z = -\text{Re} \left(\frac{\partial A_+}{\partial y} e^{i(\omega t - kz)} + \frac{\partial A_-}{\partial y} e^{i(\omega t + kz)} \right)$

$\frac{\partial A_+}{\partial z} + \frac{\partial A_+}{c \partial t} + i \frac{\partial^2 A_+}{\bar{h} \partial y^2} = i \alpha A_- \delta(y)$

$-\frac{\partial A_-}{\partial z} + \frac{\partial A_-}{\partial t} + i \frac{\partial^2 A_-}{\bar{h} \partial y^2} = i \alpha A_+ \delta(y)$

$\alpha = \bar{h} b_1 / 4$ - коэффициент связи

Поверхностный магнитный ток

$j_x^m = -\frac{c}{4\pi} E_z = -\frac{c}{4\pi} \left(\frac{\partial(b(z)E_y)}{\partial z} + i\omega H_x \frac{b(z)}{c} \right)$

$\omega_0 = \bar{h} c / 2$

$(\Omega c)^2 - \Gamma^2 = (\alpha \bar{h})^2$

Трёхмерная квазиоптическая модель черенковского СИ электронных сгустков, движущихся над гофрированной поверхностью

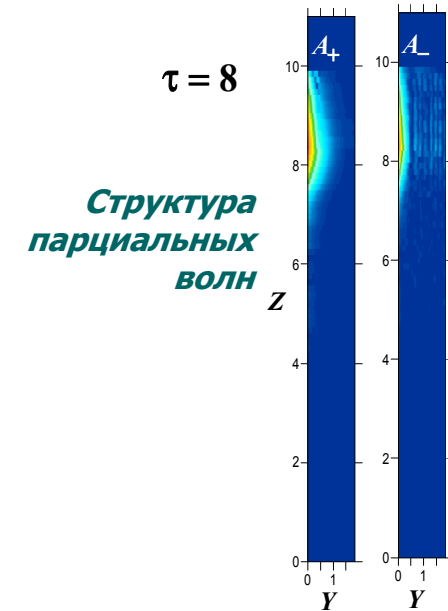
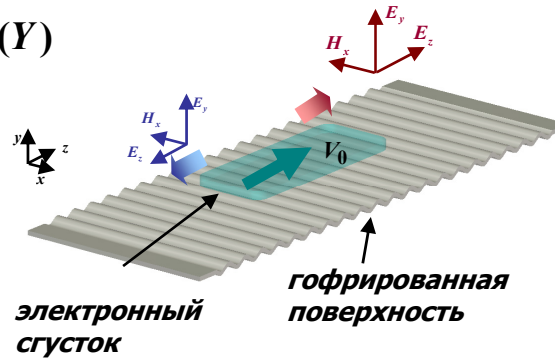
$$\frac{\partial A_+}{\partial Z} + \frac{\partial A_+}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 A_+}{\partial Y^2} + i \frac{\partial^2 A_+}{\partial X^2} = i \alpha A_- \delta(Y) - \frac{\chi(Z - \beta_0 \tau)}{B_e} \frac{\partial}{\partial Y} \left(F(Y) \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0 \right)$$

$$-\frac{\partial A_-}{\partial Z} + \frac{\partial A_-}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 A_-}{\partial Y^2} + i \frac{\partial^2 A_-}{\partial X^2} = i \alpha A_+ \delta(Y)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \text{Re} \left(\frac{\partial A_+}{\partial Y} e^{i\theta} \right)$$

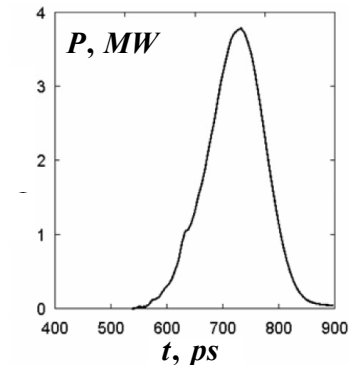
$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 + r \cos \theta_0, \quad \theta_0 \in [0, 2\pi),$$

$$(\partial/\partial Z + \partial/\partial \tau)\theta|_{Z=0} = \Delta$$

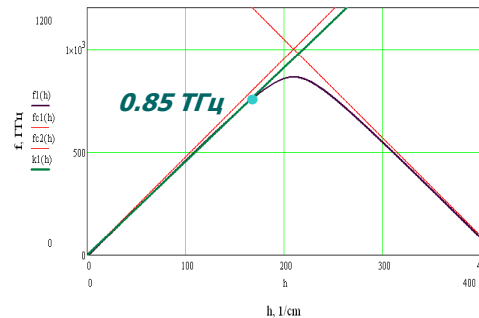


Параметры моделирования

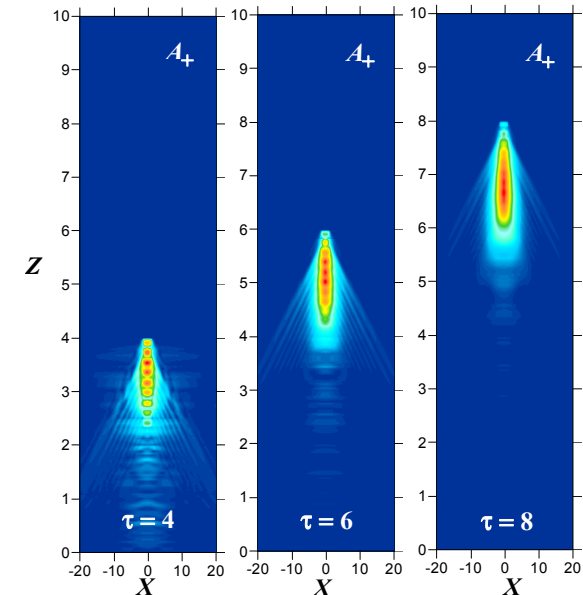
Энергия частиц **1.4 МэВ**
 Заряд сгустка **2 нКл**
 Длительность сгустка **40 пс**
 Глубина гофрировки **20 мкм**
 Период гофрировки **0.15 мм**
 Длина взаимодействия **13 см**



Импульс СИ
 Пиковая мощность **~3.7 МВт**
 Длительность **100 пс**
 Центральная частота **0.9 ТГц**



Формирование кильватерной волны



Эксперименты по генерации импульсов СИ в коротковолновой части миллиметрового диапазона при возбуждении поверхностной волны в сверхразмерном гофрированном волноводе.

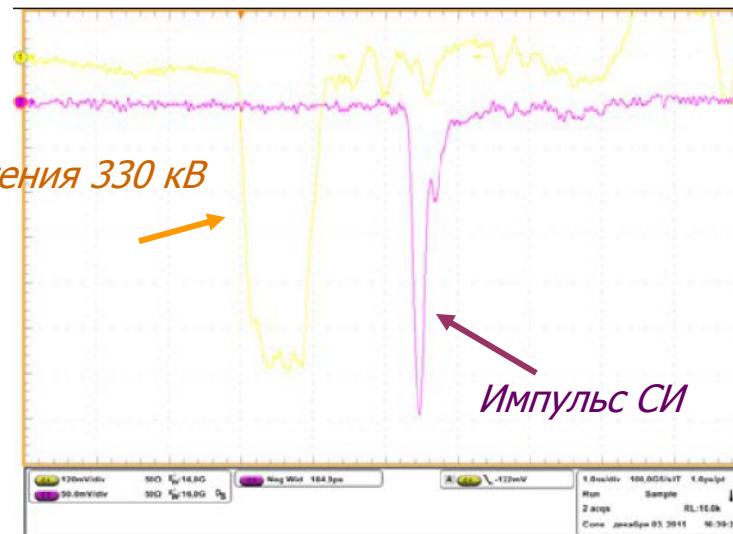
Общий вид экспериментальной установки



Параметры генерируемых импульсов СИ

Длительность ~ 180 пс
Центральная частота ~ 150 ГГц
Пиковая мощность не менее 70 МВт

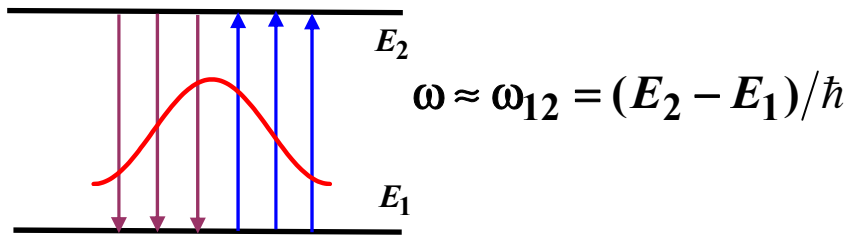
Импульс напряжения 330 кВ



2. Самоиндуцированная прозрачность и формирование солитонов в условиях циклотронного поглощения

Распространение ультракоротких световых импульсов в резонансных неинвертированных (пассивных) средах

Двухуровневая среда

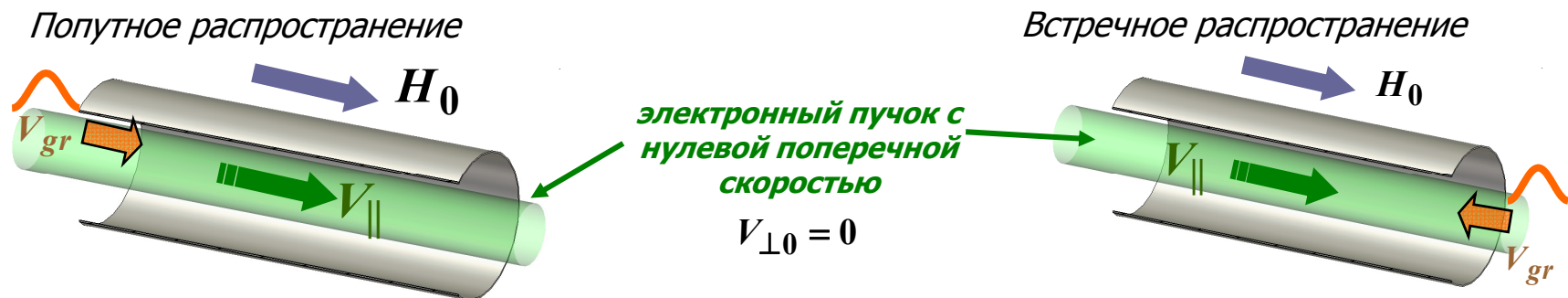


$$T_{pulse} \ll T_{1,2}$$

$$T_{pulse} \gg T = 2\pi/\omega$$

- Самоиндуцированная прозрачность
- Самосжатие импульсов

Классический аналог – распространение ультракороткого электромагнитного импульса в потоке невозбужденных циклотронных осцилляторов



$$\omega - hV_{\parallel} \approx \omega_H^0$$

← Условие циклотронного резонанса →

$$\omega + hV_{\parallel} \approx \omega_H^0$$

$\omega_H^0 = eH_0/mc\gamma$ - релятивистская гирочастота

Распространение излучения в потоке невозбужденных циклотронных осцилляторов

PRL 105, 265001 (2010)

Основные уравнения

$$\frac{\partial a}{\partial Z} \pm \frac{\partial a}{\partial \tau} = \mp p$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + ip(\delta + |p|^2) = a$$

$$p|_{Z=0} = 0$$

- начальный поперечный импульс отсутствует

Эффект самоиндуцированной прозрачности реализуется только при учете неизохронности циклотронных осцилляторов

Солитонные решения:

$$a(Z, \tau) = \tilde{a}(\zeta)e^{i\varphi(\zeta)} \quad \zeta = Z - U\tau$$

$$p(Z, \tau) = \tilde{p}(\zeta)e^{i\psi(\zeta)}$$

U - скорость солитона

Аналоги SIT солитонов:

Попутное распространение:

$$|a(Z, \tau)| = \frac{2}{(U-1)^{3/4}} \left[\operatorname{sech} \frac{2}{\sqrt{U-1}} (Z - U\tau) \right]^{1/2}$$

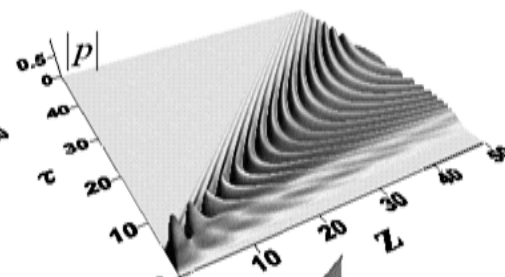
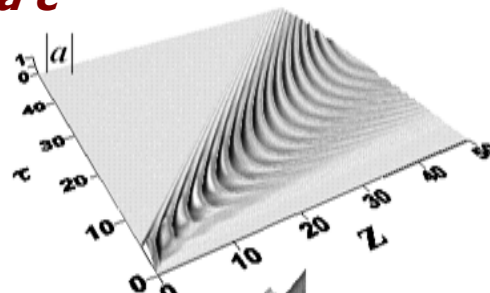
Встречное распространение:

$$|a(Z, \tau)| = \frac{2}{(U+1)^{3/4}} \left[\operatorname{sech} \frac{2}{\sqrt{U+1}} (Z - U\tau) \right]^{1/2}$$

Взаимодействие короткого импульса с попутным электронным потоком в условиях циклотронного резонанса

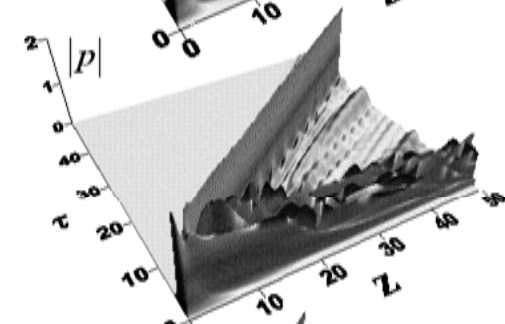
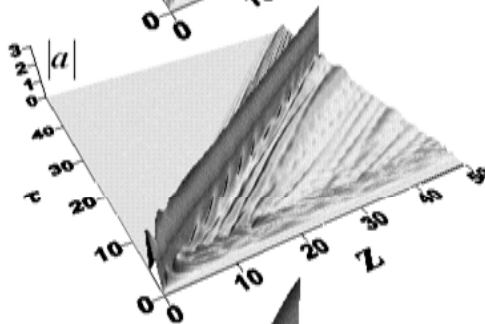
Циклотронное поглощение

$$a_0 = 1, T = 5$$



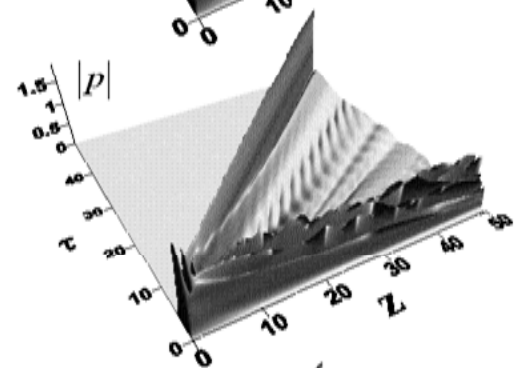
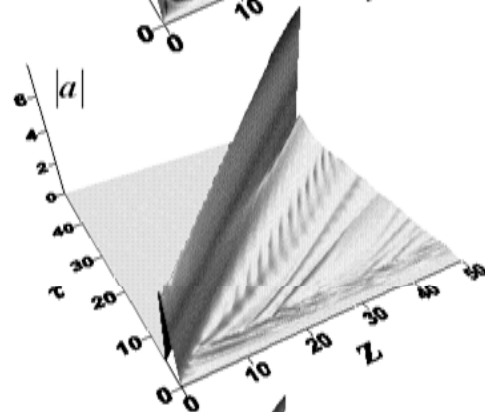
Самоиндуцированная прозрачность

$$a_0 = 3, T = 4.5$$



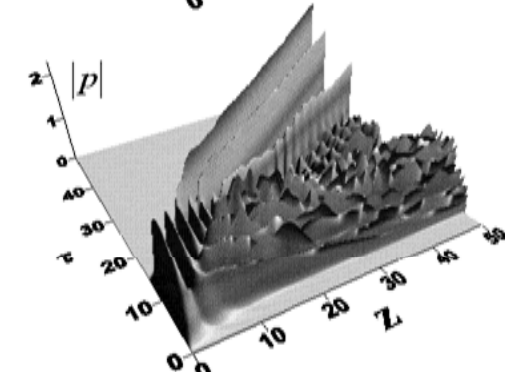
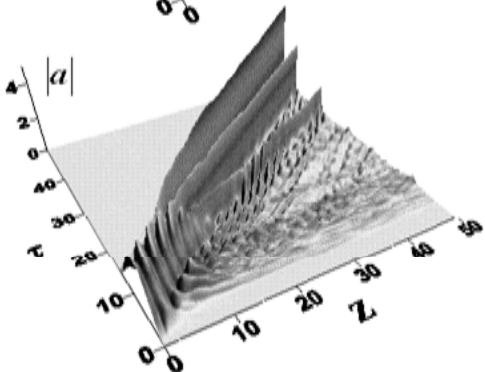
Эффект «самосжатия» входного импульса

$$a_0 = 5, T = 5$$

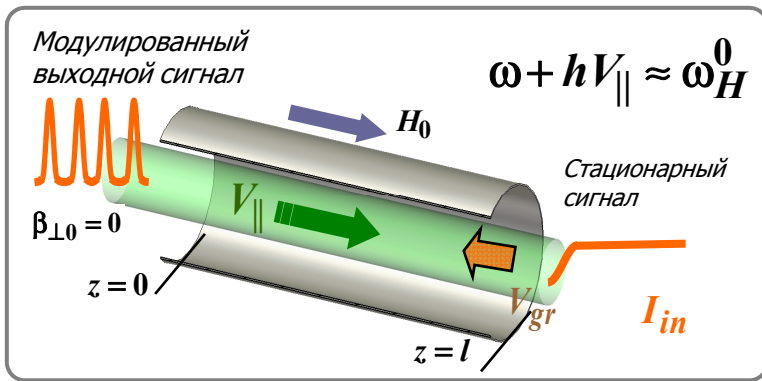


Распад входного импульса на несколько солитонов

$$a_0 = 3, T = 15$$



Трансформация стационарных СВЧ сигналов в последовательность солитонов при взаимодействии со встречным электронным пучком в условиях резонансного циклотронного поглощения



Основные уравнения

$$\frac{\partial a}{\partial Z} - \frac{\partial a}{\partial \tau} = p$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + ip(\delta + |p|^2) = a$$

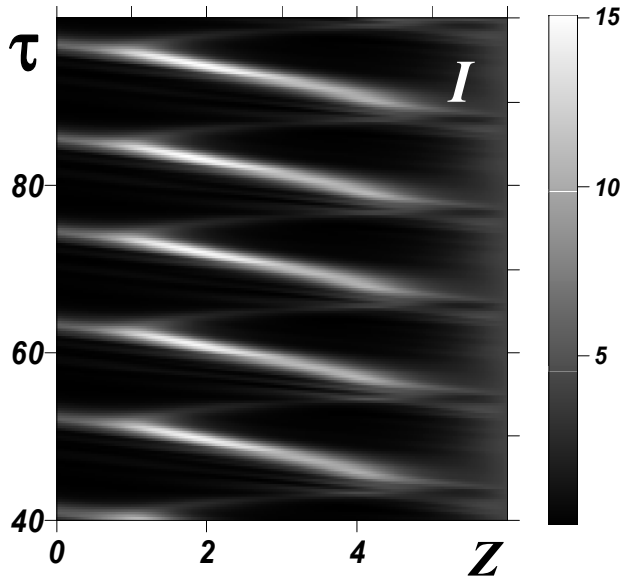
Граничные условия

$$p|_{Z=0} = 0 \quad a|_{Z=L} = a_{in}$$

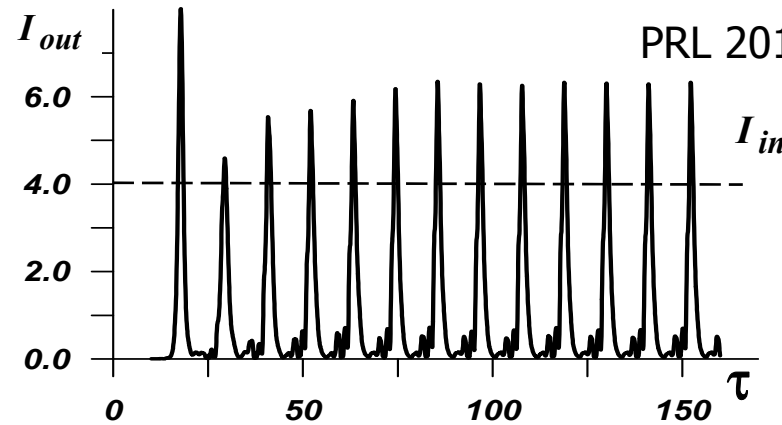
Параметры моделирования

Мощность входного сигнала	300 Вт
Частота входного сигнала	250 ГГц
Рабочая мода	TE₁₁
Ток пучка	60 мА
Энергия электронов	1 кэВ

Формирование солитонов в пространстве взаимодействия

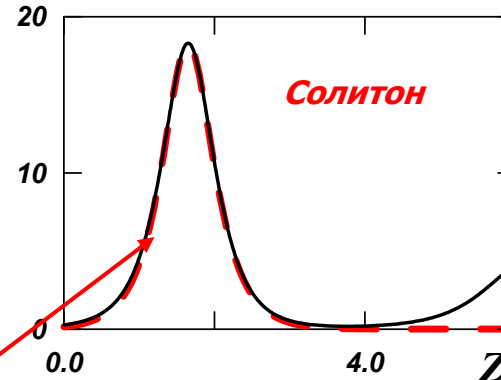


$$I = \frac{4}{(1+U)^{3/2}} \operatorname{sech} \left[\frac{2}{\sqrt{1+U}} (Z - U\tau) \right]$$



PRL 2014, V. 113, 143901

Режим периодического следования импульсов

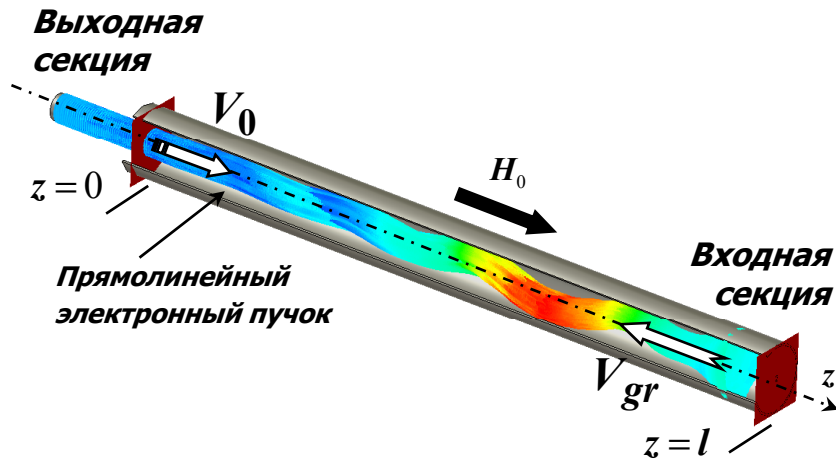


Пиковая мощность выходного излучения 450 Вт

Длительность импульсов 0.7 нс
Средняя мощность 100 Вт

Результаты PIC-моделирования на основе кода CST Studio Suite

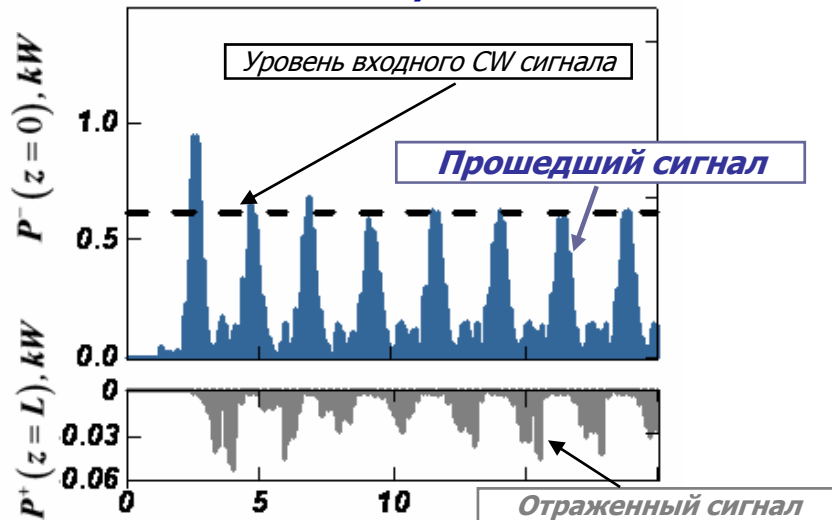
Схема пространства взаимодействия



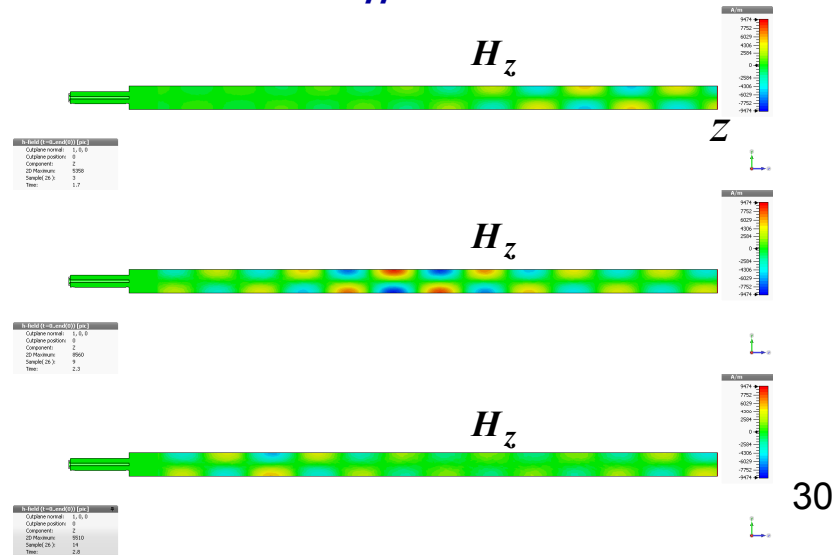
Параметры моделирования

Ток пучка	60 мА
Энергия электронов	1 кэВ
Ведущее магнитное поле	~8.9 Тл
Длина пространства взаимодействия	20 мм
Мощность входного сигнала	~300 Вт
Частота входного сигнала	240 ГГц

Мощность прошедшего и отраженного излучения в режиме периодической автотодуляции

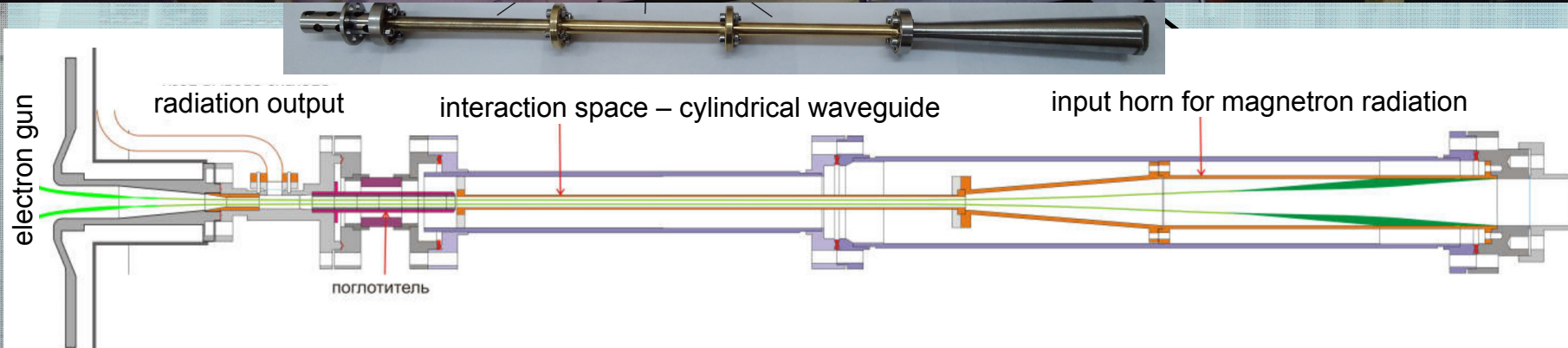
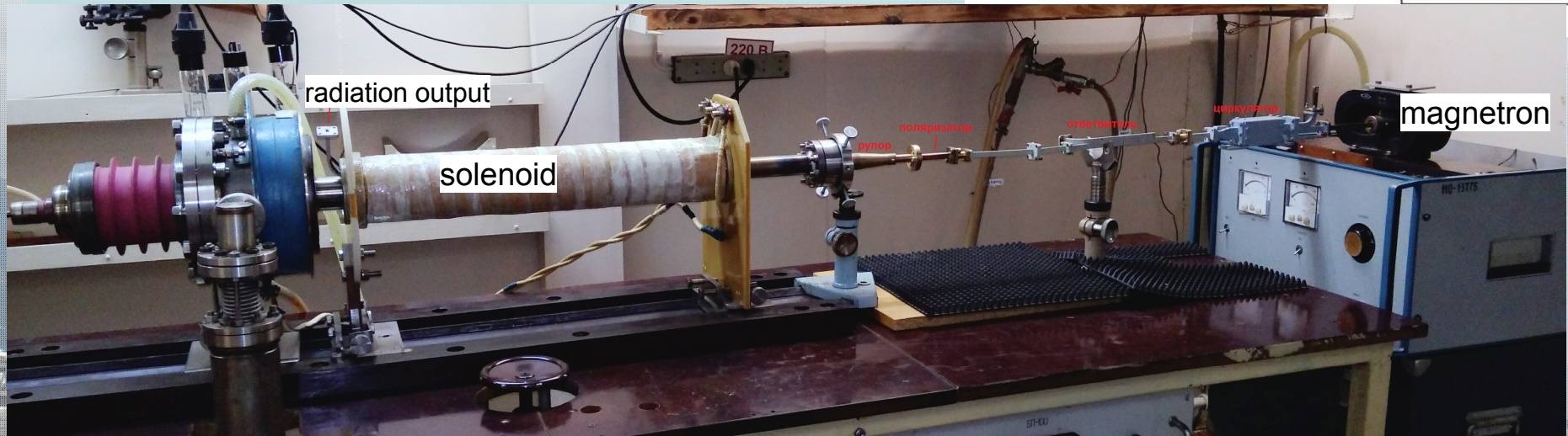
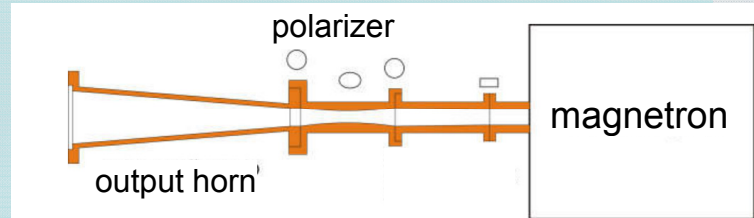


Распространение солитона через пространство взаимодействия



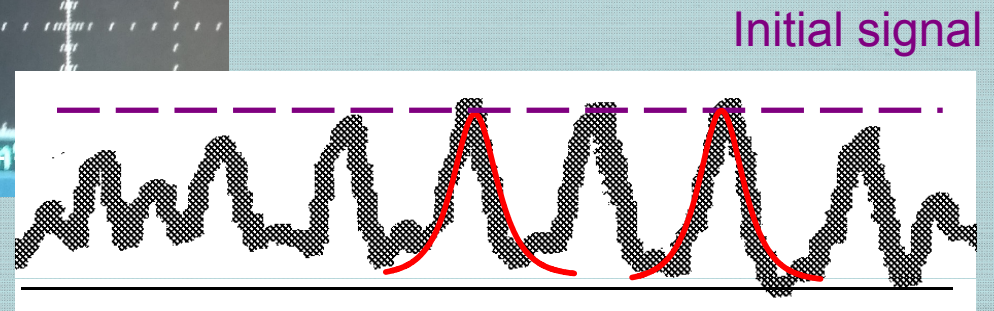
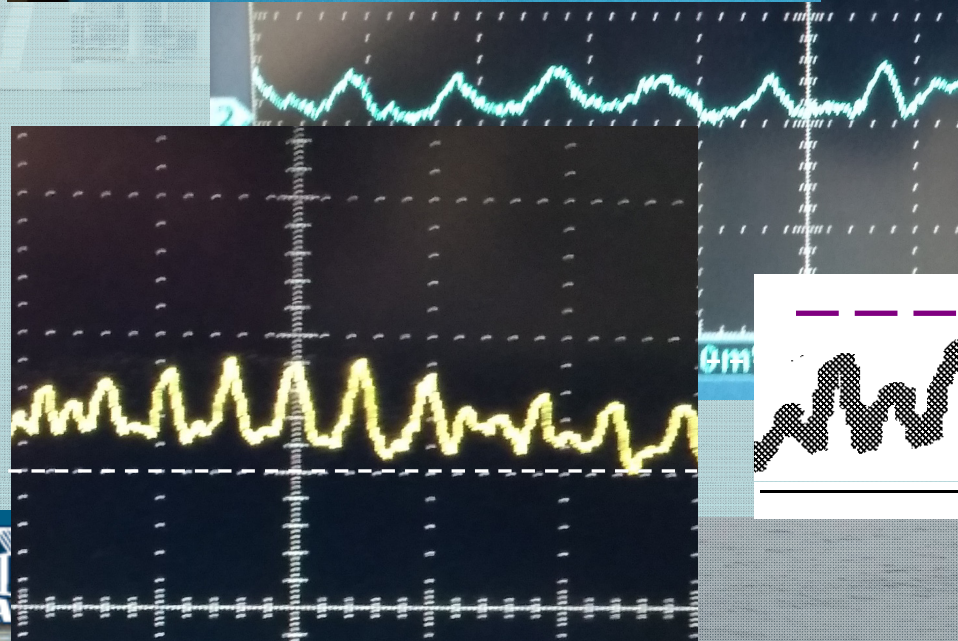
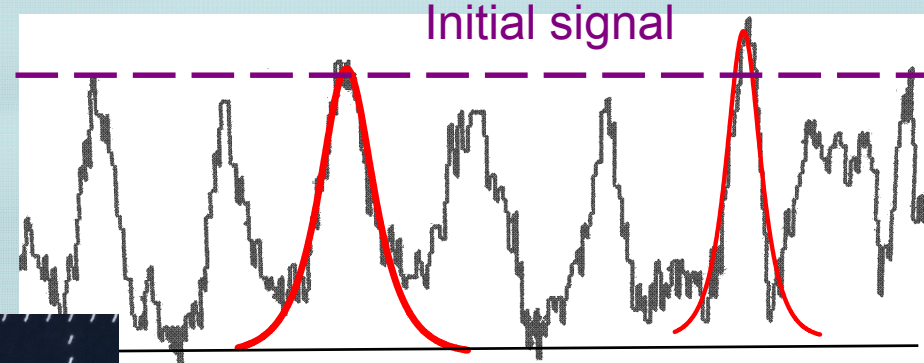
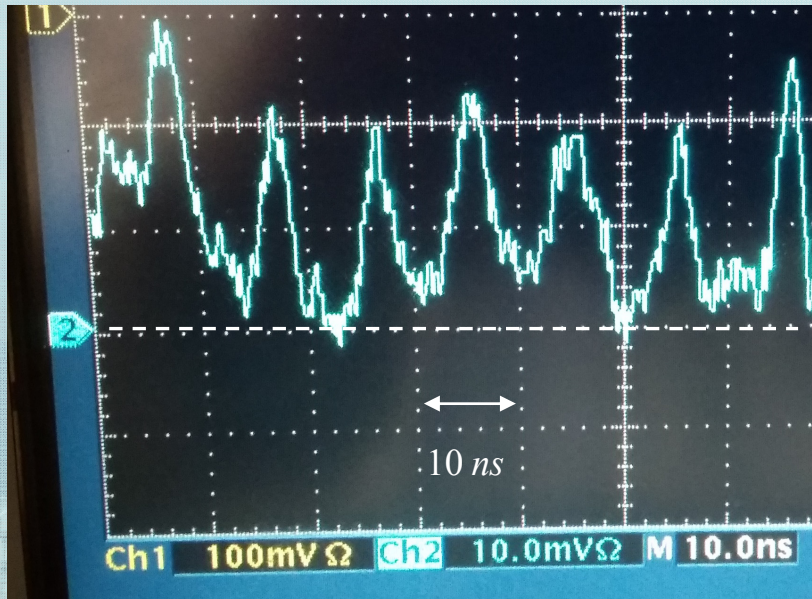
A. Fedotov

Experimental set-up (36 GHz)



Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences

Experimental results



Passive mode-locking in lasers

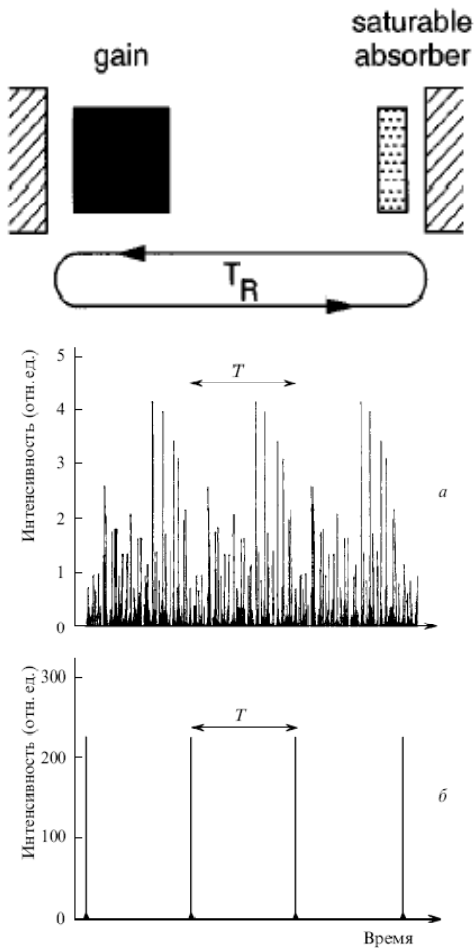
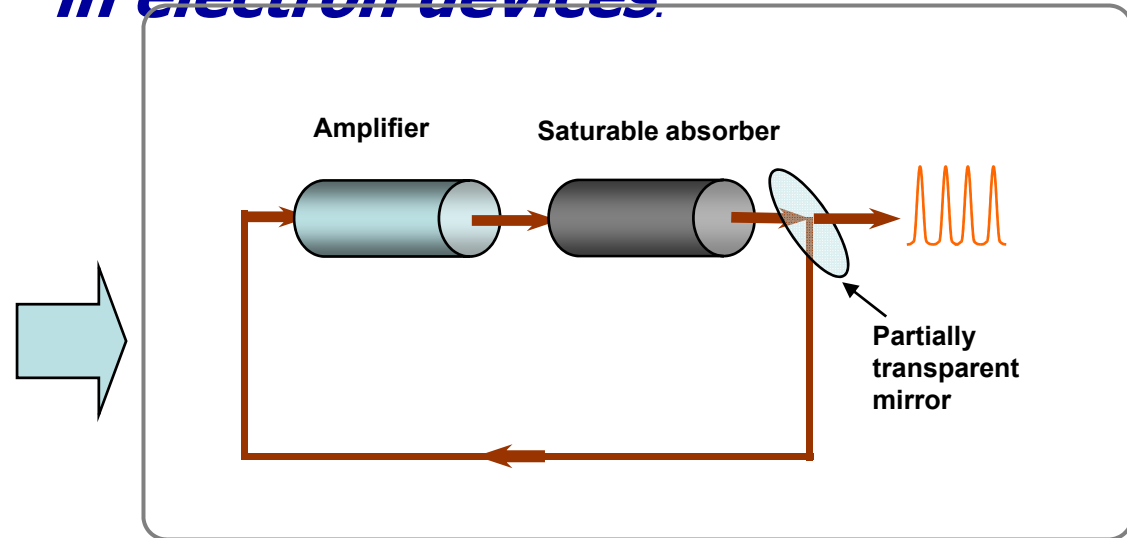


Рис. 1. Зависимости интенсивности многомодового излучения от времени при беспорядочном наборе мод (а) и в случае их синхронизации (б).

Passive mode-locking and dissipative solitons formation in electron devices.



Гинзбург Н.С., Кочаровская Е.Р., Вилков М.Н., Сергеев А.С. Пассивная синхронизация мод и формирование диссипативных солитонов в электронных генераторах с просветляющимся поглотителем в цепи обратной связи // ЖЭТФ (2017)

Ginzburg N.S., Kocharovskaya E.R., Vilkov M.N., Sergeev A.S., Fil'chenkov S.E. Dissipative solitons in electron oscillators with a saturable absorber // Physics of Plasmas (2018)

Grishin S.V., Dmitriev B.S., Moskalenko O.I., Skorokhodov V.N., Sharaevskii Y.P. Self-generation of chaotic dissipative multisoliton complexes supported by competing nonlinear spin-wave interactions // PHYSICAL REVIEW E (2018).

Ultra-short pulses electron oscillator with high-Q resonator and saturable absorber in the feedback loop

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \left(1 + \frac{\sigma_0}{1 + \nu |a|^2} \right) \alpha + i \varepsilon \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} = \int_0^L J dZ,$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + s \frac{\partial}{\partial \xi} \right)^2 \theta = \text{Re}(\alpha e^{i\theta}),$$

$$\theta|_{z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi], \quad \left(\frac{\partial}{\partial Z} + s \frac{\partial}{\partial \xi} \right) \theta|_{z=0} = \Delta.$$

Cyclic boundary condition

$$\tilde{\alpha}(\xi + \bar{T}, \bar{\tau}) = \tilde{\alpha}(\xi, \bar{\tau})$$

$$T = \omega l C / (V_{gr} (1 - R)^{1/3}) \quad - \text{normalized round-trip}$$

Each harmonic can be considered as a cavity mode with a longitudinal index m

$$\alpha(\tau, \xi) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \alpha_m \exp(-ip_m \xi)$$

$$Z = zC \omega / (c(1 - R)^{1/3}) \quad - \text{longitudinal coordinate}$$

$$\xi = (t - z / V_{gr}) \omega C / (1 - R)^{1/3} \quad - \text{traveling-wave variable}$$

$$p_m = 2\pi m / T$$

τ - *slow-time which is proportional to a number of trips of a wave along the cavity*

$$s = (c / V_{||0} - c / V_{gr}) \quad - \text{slippage parameter}$$

ε - *dispersion parameter*

Dissipative solitons in the group synchronism regime

$$\boxed{(v_{\parallel} = v_{gr}, s = 0)}$$

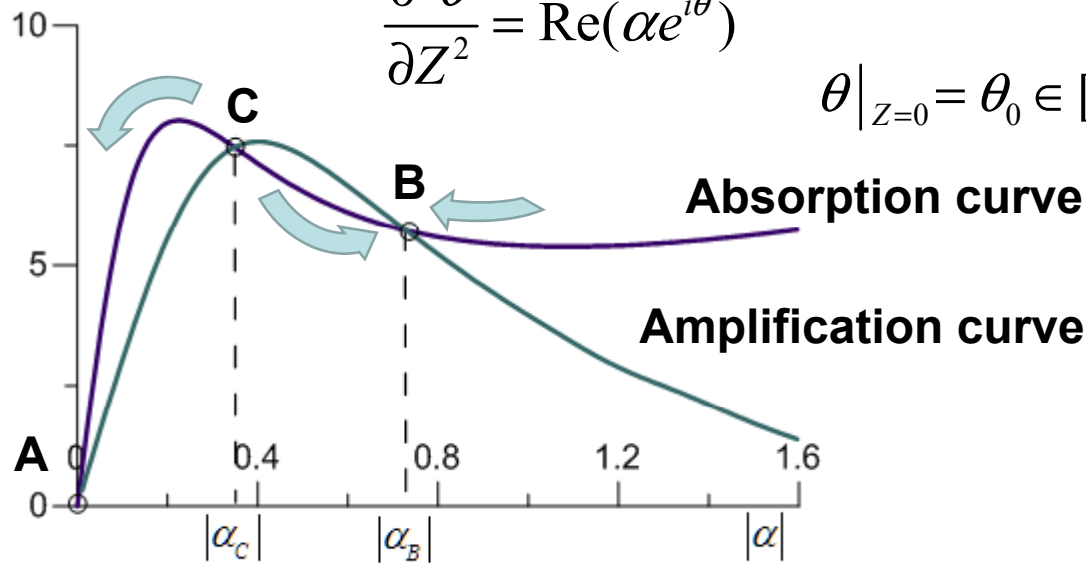


$$\frac{\partial \alpha}{\partial \bar{\tau}} + \left(1 + \bar{\sigma}(|\alpha|^2)\right) \alpha + i\bar{\varepsilon} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} = F(|\alpha|),$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = \text{Re}(\alpha e^{i\theta})$$

$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi]$$

$$\boxed{F(|\alpha|) = \int_0^L J dZ}$$



$$\Delta L = -3$$

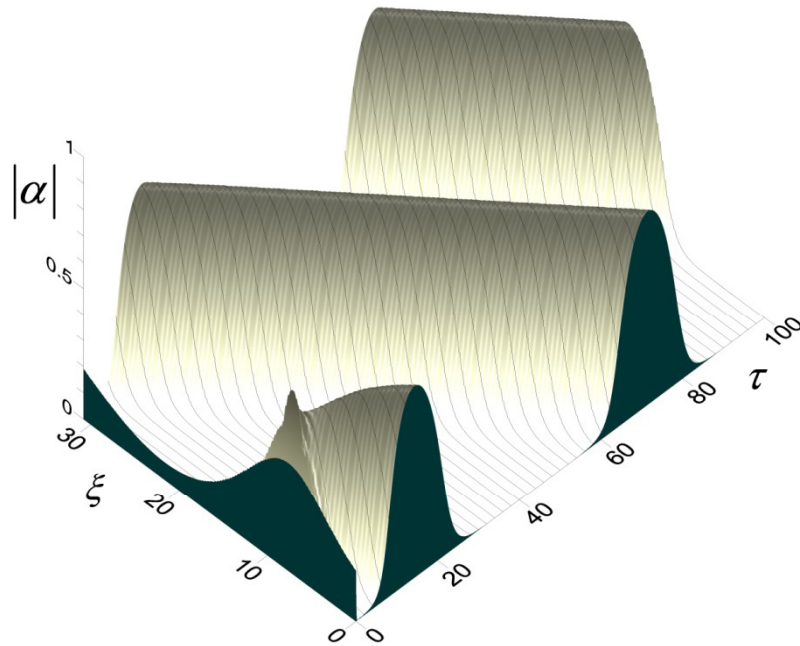
$$\bar{\sigma}_0 = 30$$

$$\bar{\nu} = 22.5$$

**points A and B stable equilibrium states,
point C - unstable state**

Group synchronic regime. Dissipative solitons formation from initial random fluctuations

An isolated short pulses can be interpreted as a dissipative solitons. Its existence is owing to a balance of amplification, nonlinear absorption, generation of harmonics, and dispersion of the group velocities

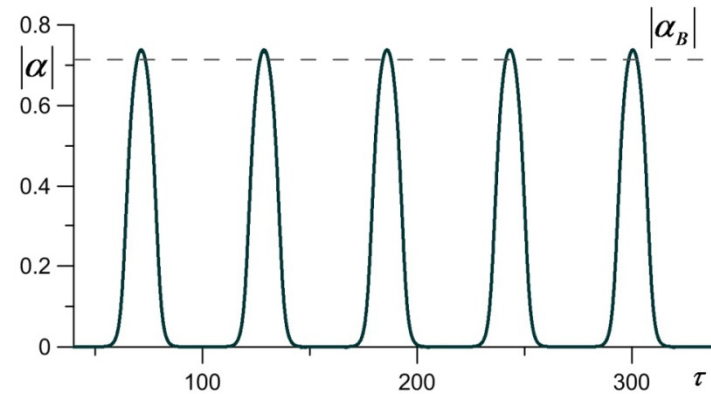


$$\varepsilon = 7.1 \quad T = 30.8$$

$$\sigma_0 = 30 \quad \Delta L = -3$$

$$\nu = 22.5$$

- N. Akhmediev, A. Ankiewicz, *Dissipative Solitons*, Springer, 2006, pp. 137-167.
- N.N. Rosanov, *Physics-Uspekhi*, 2000. 43, pp. 421-424.



Soliton amplitude corresponds to amplitude of stable equilibrium state (point B)

Dissipative solitons in slippage regime

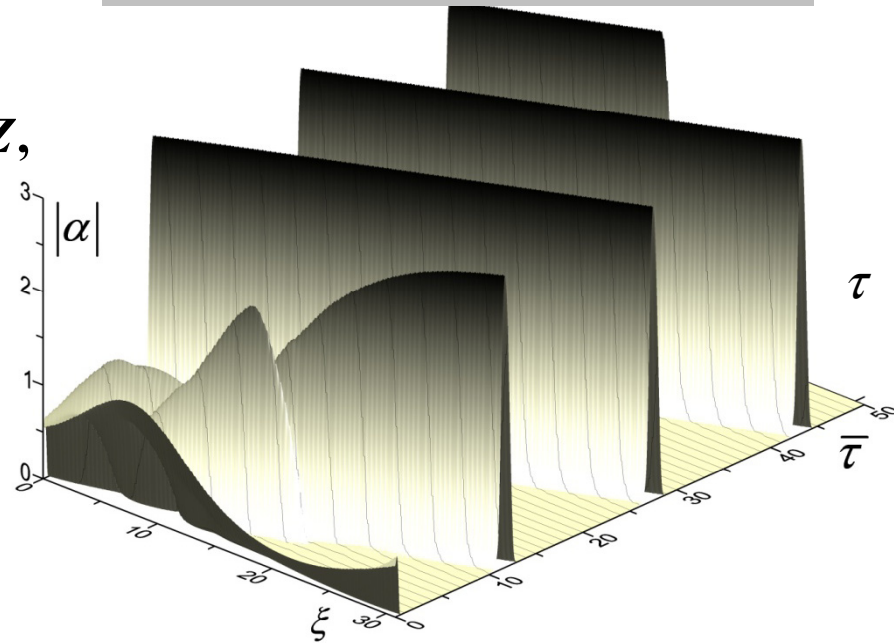
$$\boxed{(v_{\parallel} \neq v_{gr}, s \neq 0)}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \left(1 + \frac{\sigma_0}{1 + \nu |a|^2} \right) \alpha + i \varepsilon \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} = \int_0^L J dZ,$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + s \frac{\partial}{\partial \xi} \right)^2 \theta = \text{Re}(\alpha e^{i\theta}),$$

$$\theta|_{z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi], \quad \left(\frac{\partial}{\partial Z} + s \frac{\partial}{\partial \xi} \right) \theta|_{z=0} = \Delta.$$

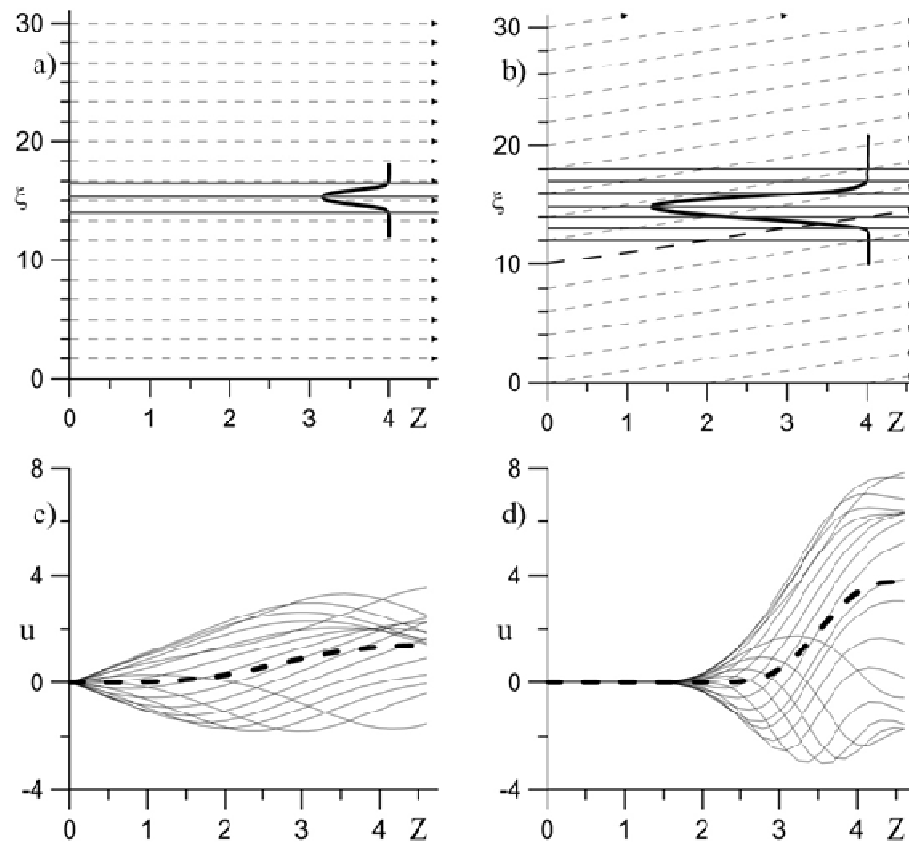
Formation of solitons



$$\sigma_0 = 30 \quad \Delta L = -3 \quad s = 1$$

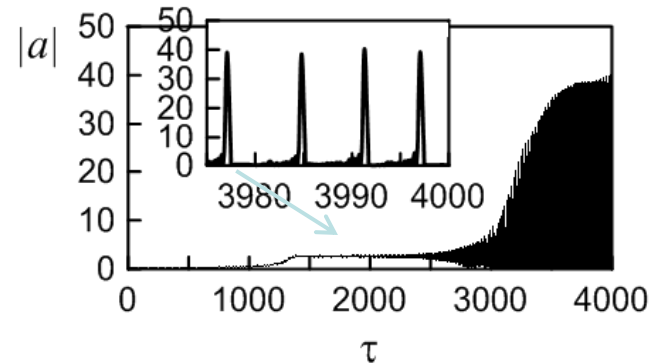
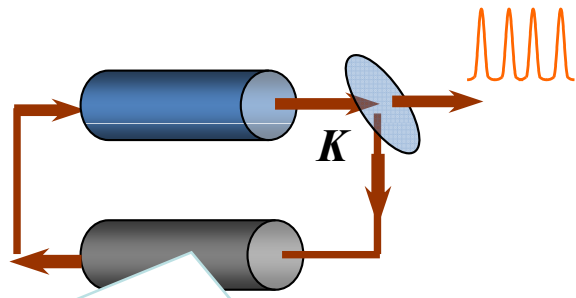
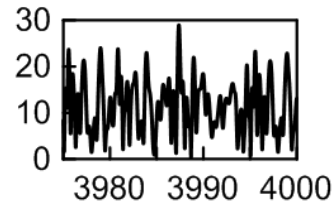
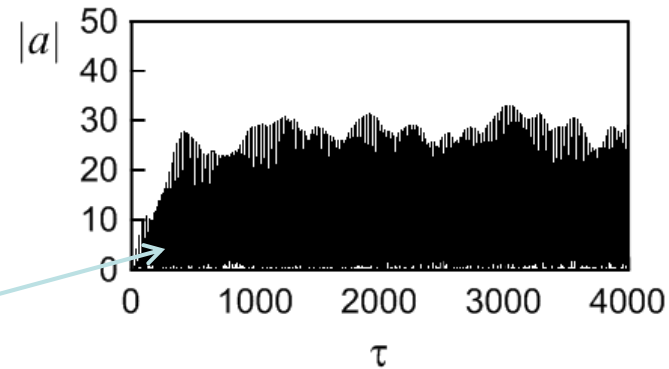
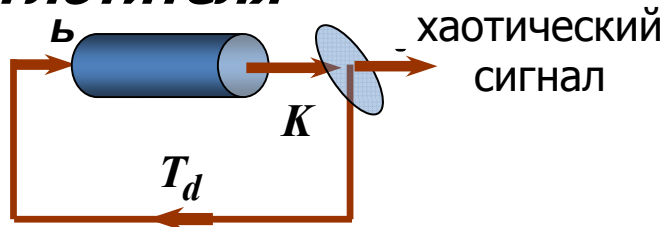
$$\varepsilon = 0.47 \quad \nu = 22.5 \quad T = 30.8$$

Solitons in group synchronism regime vs solitons in slippage regime



The soliton amplitude in the slippage regime strongly exceed its amplitude in the group synchronism regime. The phenomenon is explained by a cumulative effect of an energy input into the soliton from different electron fractions during a continuous shift of the soliton along the electron beam. Neglecting a wave dispersion, one can prove that the peak amplitude of the microwave pulse does not depend on the slipping parameter, , and the pulse duration is proportional to this parameter.

Трансформация режима динамического хаоса в режим пассивной синхронизации мод и генерации регулярной последовательности УКИ при включении насыщающегося поглотителя



Идеальный поглотитель с насыщающимся коэффициентом поглощения

$$\sigma(\omega_2) = \frac{\sigma_0}{1 + \nu |a_2|^2}$$

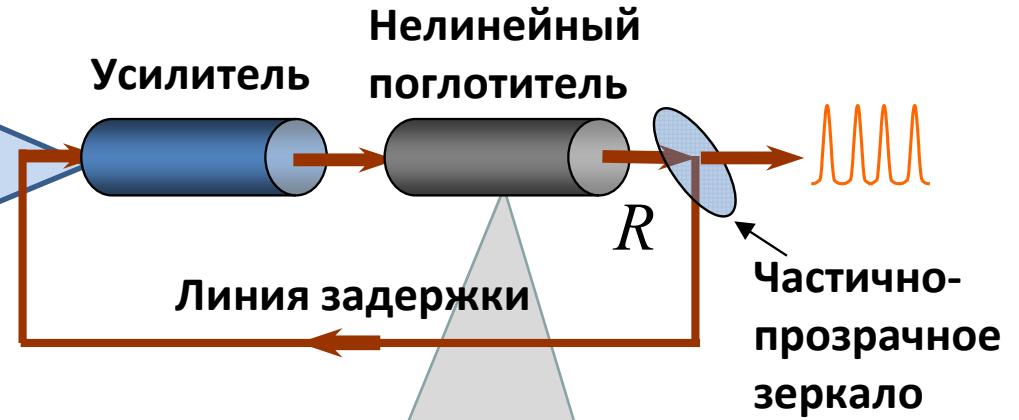
$$L_2 = 5 \quad \sigma_0 = 0.63 \quad \nu = 0.25$$

Релятивистская черенковская ЛБВ с циклотронным поглотителем в цепи обратной связи

ЛБВ

$$\frac{\partial a_n}{\partial \tau} + \frac{\partial a_n}{\partial \zeta} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} = \left(1 + v \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \right)^{3/2} \operatorname{Re} \left(a_n e^{i\theta} \right)$$



Гиро - поглотитель на первой циклотронной гармонике (режим касания)

$$E_z = \operatorname{Re} \left\{ A(z, t) E_z^s(r) \exp(i\omega t - ihz - i\bar{h}z) \right\}$$

$$\tau = \frac{\omega C (t - z/V_0)}{1 - V_0/V_{gr}} \quad \zeta = \frac{\omega C z}{V_0} \quad a_n = \frac{e A_n E_z^s(r_b)}{m \omega C^2 \gamma_0^3 V_0}$$

$$C = \left(\frac{e I_b \hat{Z}}{2 m c^2 \gamma_0^3} \right)^{1/3} \ll 1 \quad \hat{Z} = 2 |E_z^s(r_b)|^2 / k^2 N$$

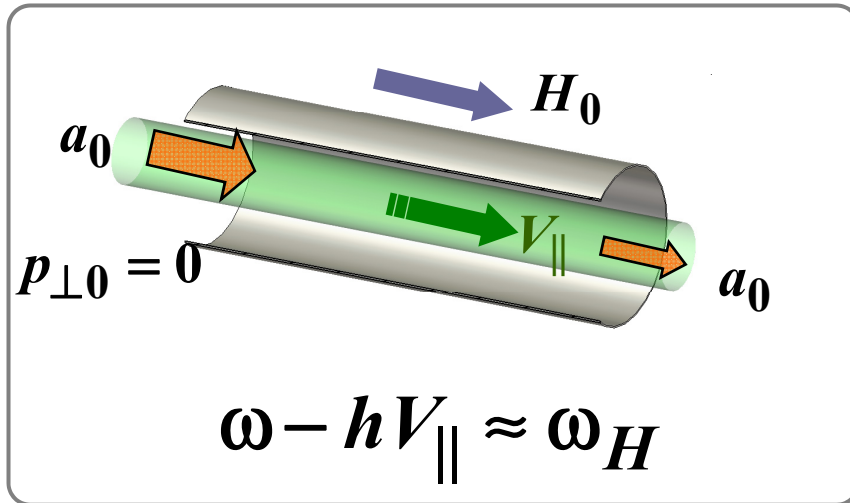
$$v = 2 C \gamma_0^2 \quad - \text{Параметр Пирса}$$

$$\frac{\partial a}{\partial Z} = I_{abs} P \quad V_{||} = V_{gr}$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + ip(\delta + |p|^2) = -a$$

$$p|_{Z_{abs}=0} = 0$$

Нелинейный поглотитель на основе резонансного циклотронного поглощения излучения первоначально прямолинейным электронным пучком.



Нелинейность поглощения обусловлена релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии частиц

$$\omega_H = eH_0 / mc\gamma \quad - \text{гирочастота}$$

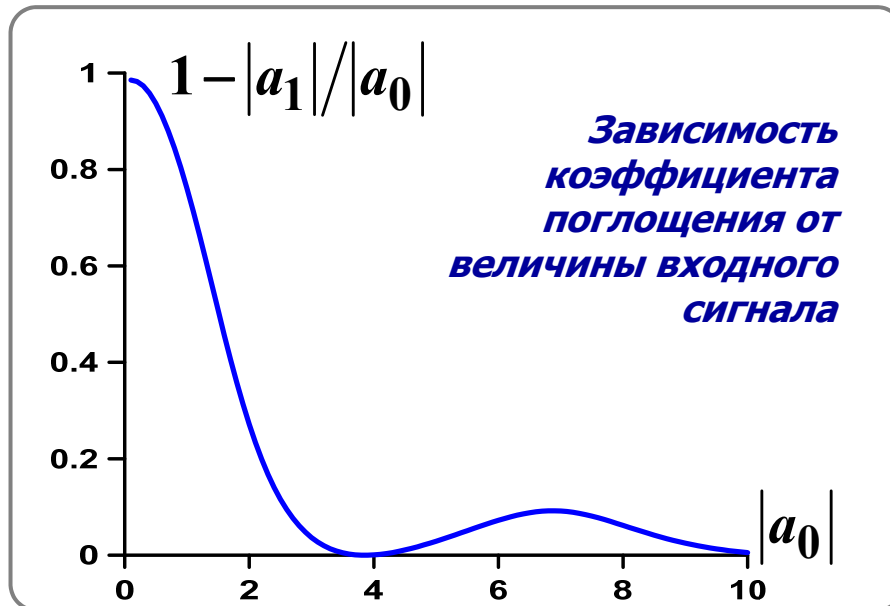
Основные уравнения:

$$\frac{\partial a}{\partial Z} = Ip \quad V_{\parallel} = V_{gr}$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + ip(\delta + |p|^2) = -a$$

$$p|_{Z=0} = 0$$

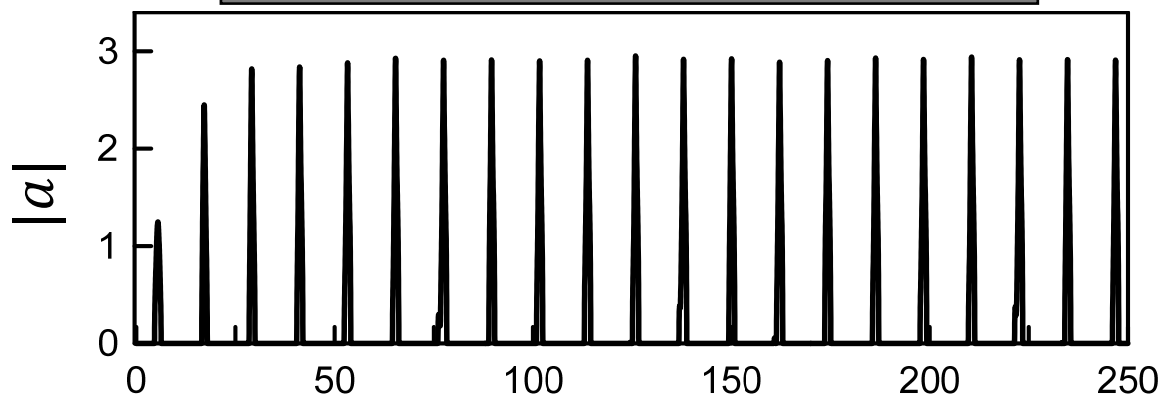
- начальный поперечный импульс отсутствует



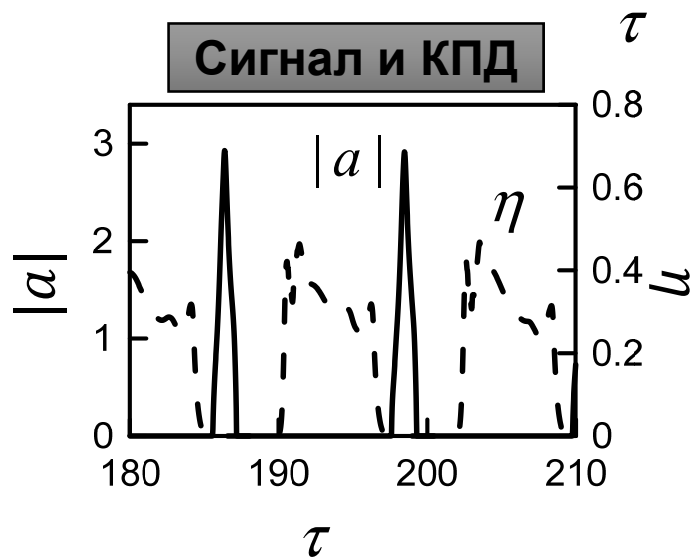
Результаты моделирования

Жёсткий режим

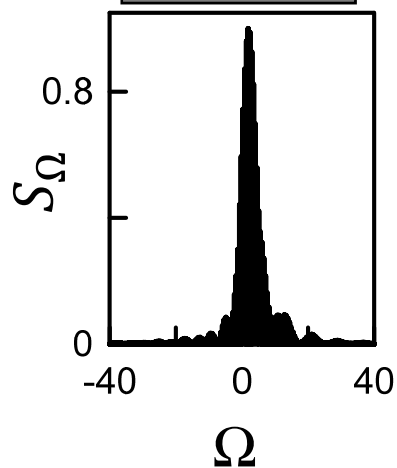
Генерируемый сигнал



Сигнал и КПД



Спектр



Коэффициент конверсии

$$K = \frac{P_{peak}}{P_{beam}} = \frac{(\gamma_0 + 1) v |a|_{peak}^2}{\gamma_0 \cdot 8}$$

$$K \sim 2$$

X-Band Gigawatt Amplifier
10 GHz

(E.B. Abubakirov, A.N. Denisenko,
and et al. IEEE Trans on Plasma
Sci. 30, 1041 (2002))

Ток 6 кА
Энергия электронов 0.8 МэВ

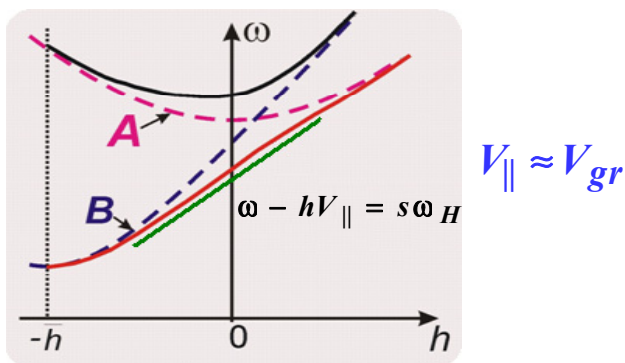
Пиковая мощность 10 ГВт
Длительность 0.8 нс

Гиро-ЛБВ на основе волновода с многозаходной винтовой гофрировкой + циклотронный поглотитель в цепи обратной связи

$$r(\varphi, z) = r_0 + \tilde{r} \cos(\bar{m}\varphi - \bar{h}z)$$



Дисперсионная диаграмма



$$\omega \approx \omega_A \approx s\omega_H$$

Винтовая гиро-ЛБВ

Денисов Г.Г., Братман В.Л., Самсонов С.В.

Винтовая гофрировка обеспечивает связь между двумя противоположно вращающимися парциальными модами гладкого волновода

$$\vec{E}_A = \text{Re}[A(z, t) \vec{E}_\perp^A(r) e^{i(\omega t - m_A \varphi)}]$$

- критическая мода

$$\vec{E}_B = \text{Re}[B(z, t) \vec{E}_\perp^B(r) e^{i(\omega t - h_B z + m_B \varphi)}]$$

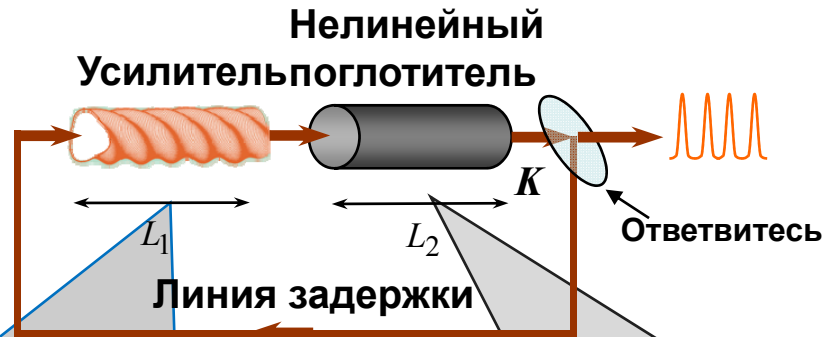
- бегущая мода

$$\bar{m} = m_A + m_B, \quad \bar{h} \approx h_B$$

Преимущества гиро-ЛБВ с винтовым волноводом

- широкая полоса усиления;
- снижение чувствительности к скоростному разбросу электронного пучка

Генератор 32 ГГц УКИ включающий винтовую гиро-ЛБВ на второй гармонике и поглотитель на основе циклотронного взаимодействия на первой гармонике с прямолинейным электронным пучком



Усилитель – гиро-ЛБВ с винтовым волноводом

$$\frac{i}{2H} \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + i\alpha b = \frac{G}{2\pi} \int_0^{2\pi} p^s d\theta_0$$

$$\left(\frac{1}{\eta} \frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) b - i\Delta_g b + i\alpha a = 0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) p + i \frac{P}{s} (\Delta - 1 + |p|^2) = ia(p^*)^{s-1}$$

$$p|_{Z_{amp}=0} = e^{i\theta_0} \quad \theta_0 \in [0; 2\pi)$$

Первоначально винтовой пучок

Нелинейный поглотитель на основе циклотронного взаимодействия на первой гармонике с первоначально прямолинейным пучком в регулярном волноводе (режим касания)

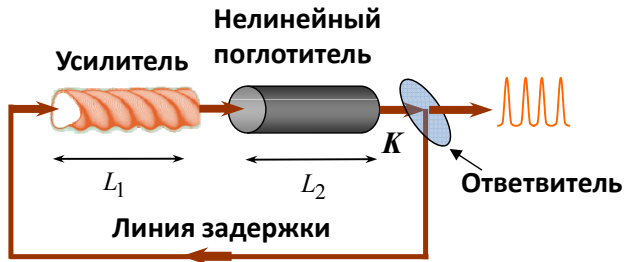
$$i \frac{1}{2H} \frac{\partial^2 f}{\partial Z^2} + \frac{\partial f}{\partial \tau} = Gp,$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{\partial p}{\partial \tau} + ip(\delta + |p_2|^2) = -f$$

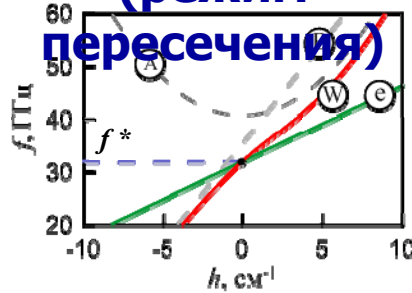
$$p|_{Z=0} = 0$$

Первоначально прямолинейный пучок

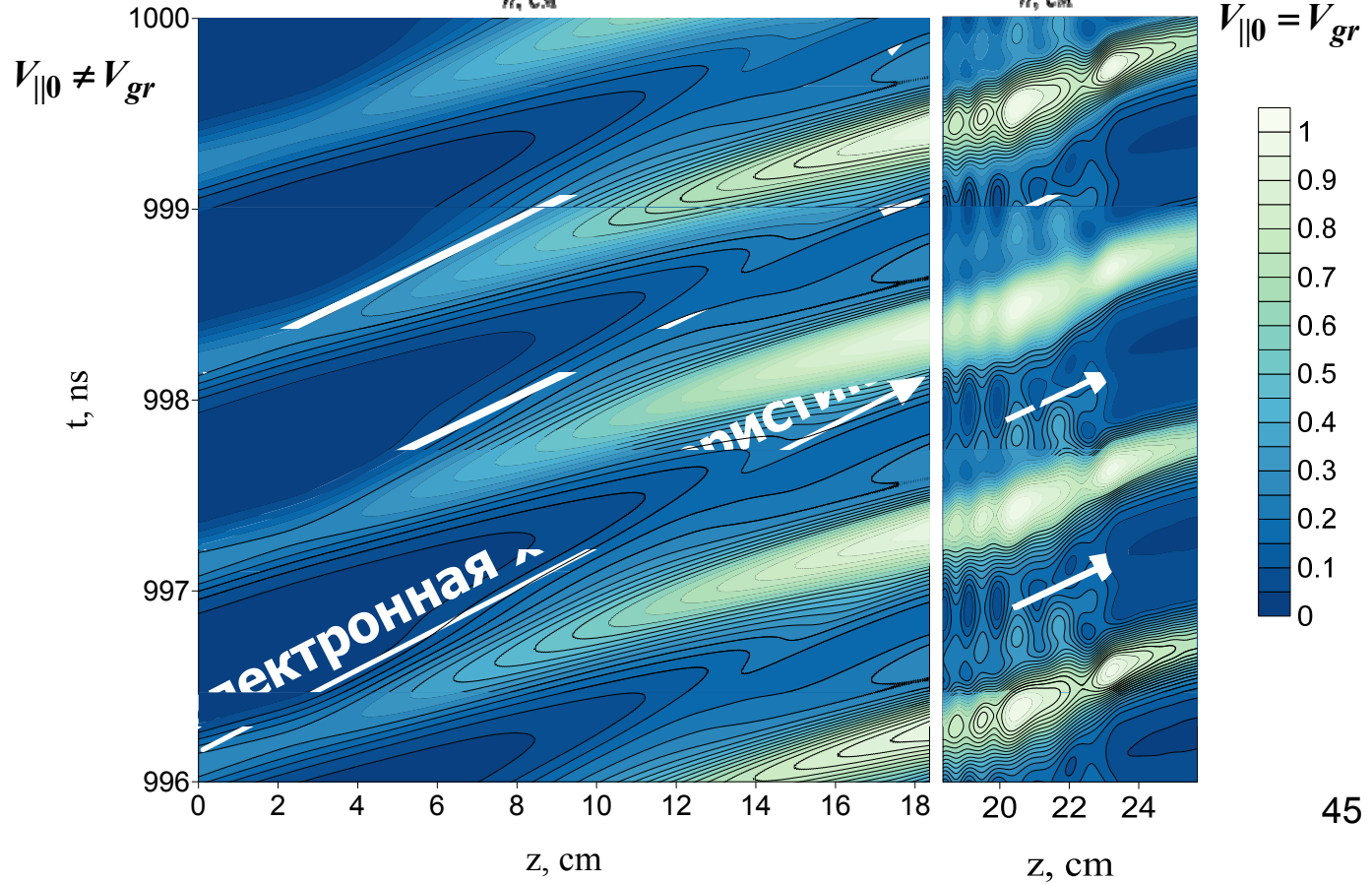
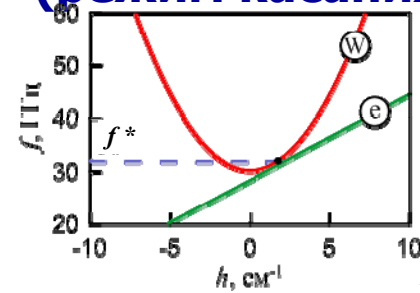
Пространственно-временная диаграмма, иллюстрирующая распространение, усиление и нелинейное поглощение импульсов в оптимальном режиме генерации



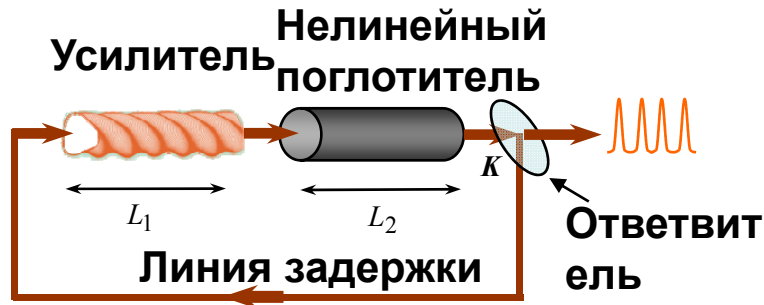
**Усилитель
(режим
пересечения)**



**Поглотитель
(режим касания)**



Последовательность импульсов обладает высокой степенью фазовой корреляции



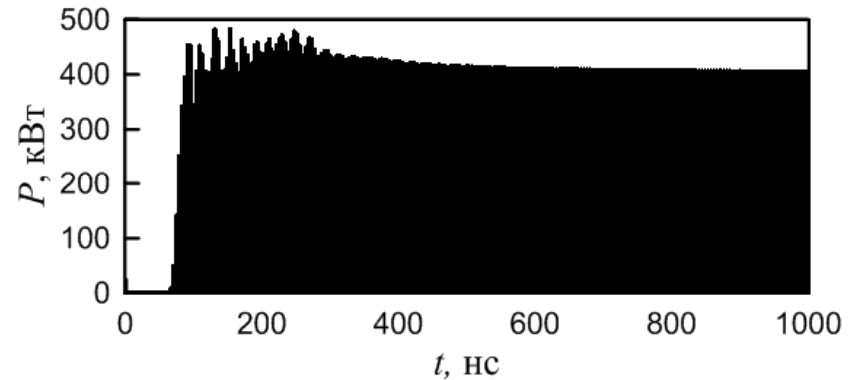
Пиковая мощность импульсов 400 кВт, длительность по полувысоте мощности 200 пс,

частота повторения 1 ГГц

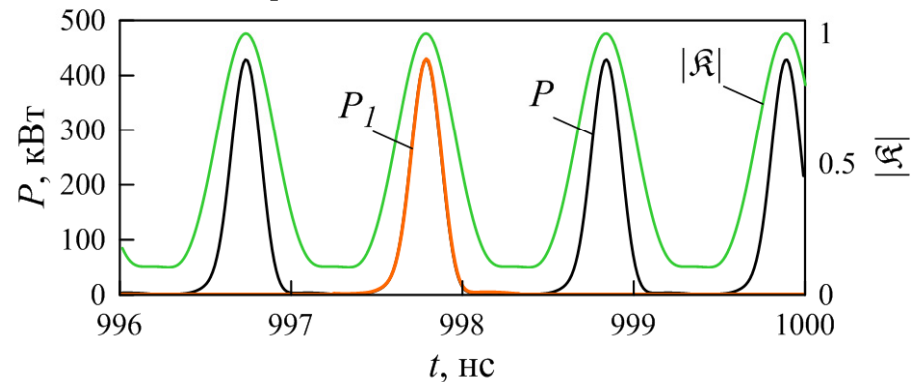
$$K(t) = \frac{\int_0^T b_1(\tau) b^*(\tau-t) d\tau}{\sqrt{\int_0^T |b_1(\tau)|^2 d\tau \int_t^{T+t} |b(\tau)|^2 d\tau}}$$

- корреляционная функция

Установление генерации УКИ (мягкий старт)



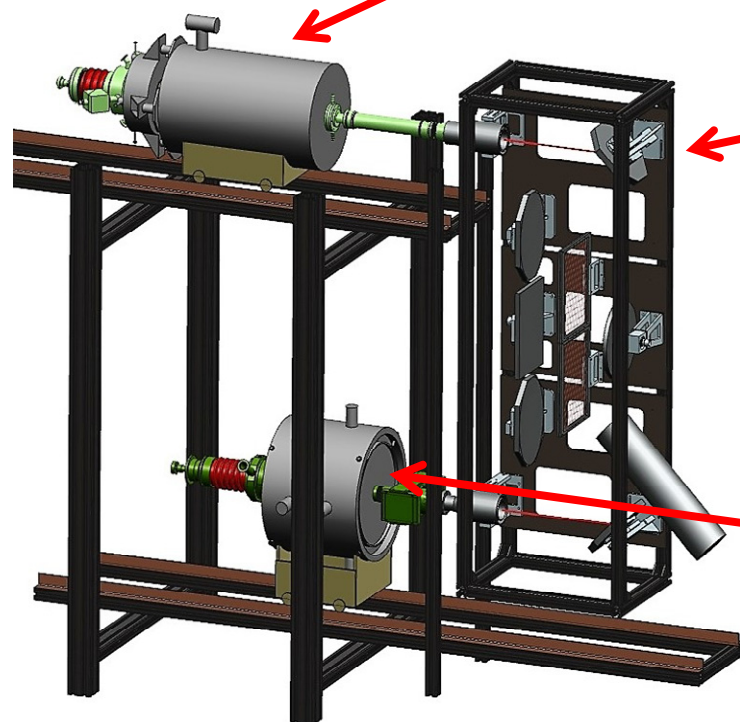
Детальный профиль импульсов и модуль корреляционной функции в развернутом по времени масштабе



Экспериментальный макет генератора УКИ с пассивной синхронизацией мод на основе винтовой гиро-ЛБВ и циклотронного поглотителя в цепи обратной связи

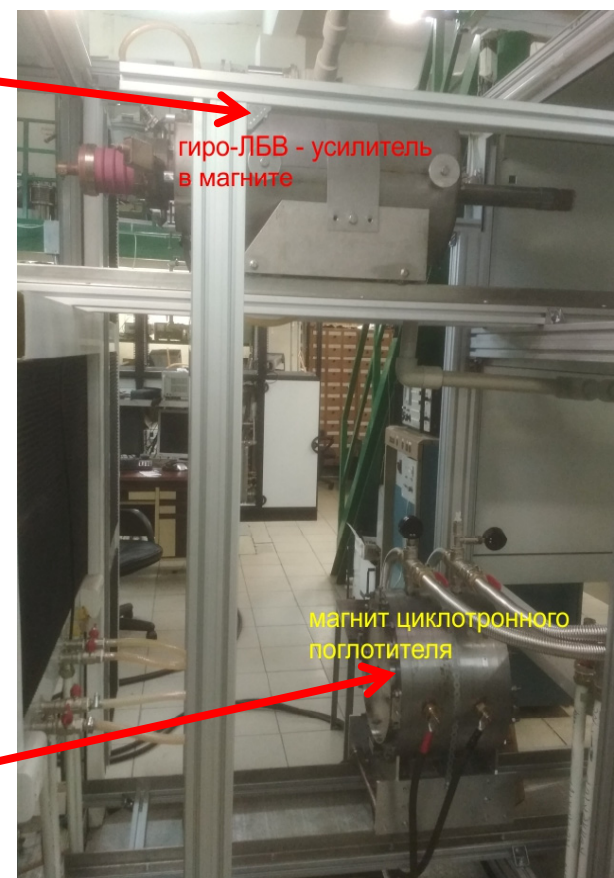
Усилитель - винтовая гиро-ЛБВ
33.5ГГц

70 кэВ, 6 А, питч-фактор 1.2, 0.68 Тл

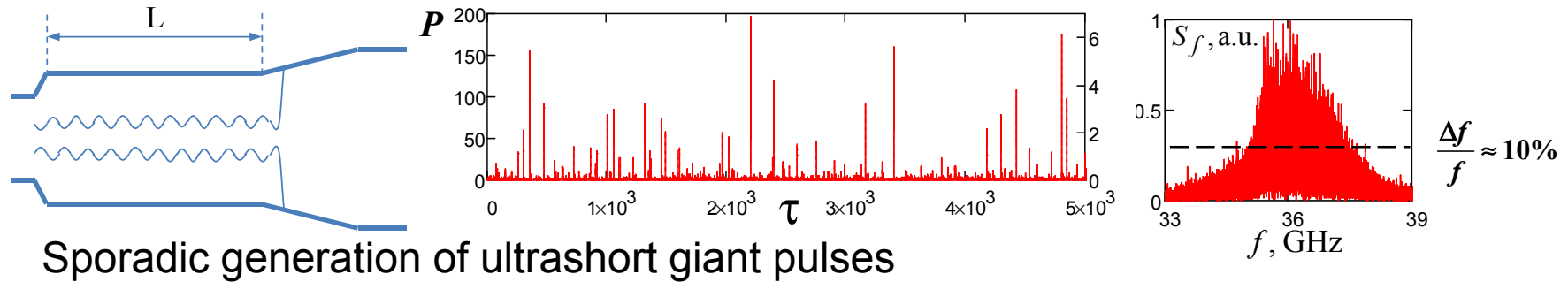


Внешняя квазиоптическая линия задержки

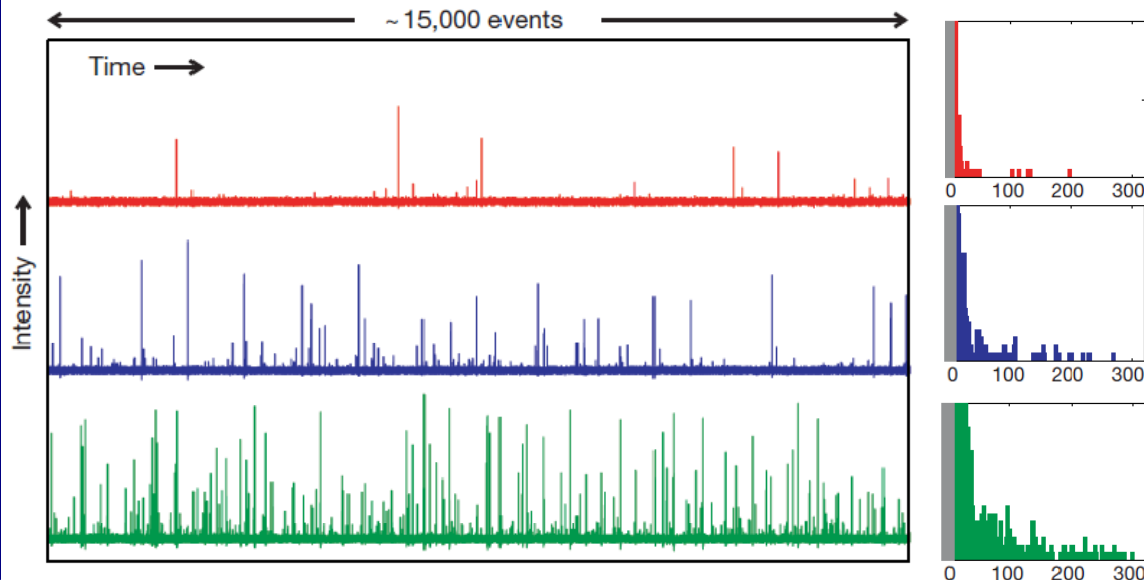
Насыщающий циклотронный поглотитель
50 кэВ, 1 А, 1.06 Тл



Atypical chaotic dynamics of gyrotrons with high excess over the threshold



Rogue waves in nature: Extreme events which occur with low probability but much more frequently than expected in ordinary wave statistics.

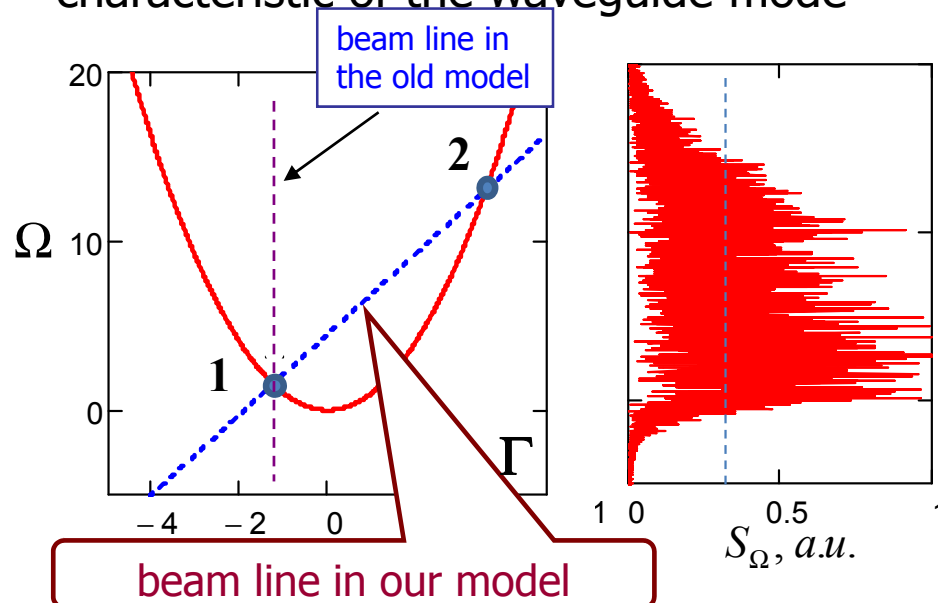


Rogue waves in non-linear optics and lasers

- D.R. Solli, et al Nature 2007
- C. Lecaplain, et al PRL 2012
- F. Selmi, et al PRL 2016
- J. Peng, et al Opt. Express 2016

Important factors for correct description of "rogue waves" generation

1. The inclination of the beam line with respect to the dispersion characteristic of the waveguide mode



N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, and I.V. Zotova, *Phys. Plasmas* **22**, 033101 (2015)

The maximum spectrum bandwidth is determined by the difference between high frequency (point 1) and low frequency (point 2) resonances

2. The change of the longitudinal momentum of electrons

Strong transverse magnetic fields are initiated at the steep fronts of giant ultrashort pulses

$$H_{\perp} \propto \frac{\partial E}{\partial z}$$

The energy of the translational motion transforms to the energy of the transverse rotation and then in the energy of an em pulse

Basic equations

$$\omega_c \approx \omega_H$$

$$\Psi(r, \varphi) = J_m(\kappa r) e^{-im\varphi}$$

$$\vec{E}_\perp = \kappa^{-1} \operatorname{Re}(A(z, t) [\nabla_\perp \Psi \times \vec{z}_0] e^{i\omega_c t}), \quad \vec{H}_\perp = \kappa^{-2} \operatorname{Re} \left(i \frac{\partial A(z, t)}{\partial z} \nabla_\perp \Psi e^{i\omega_c t} \right)$$

$$i \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} = i \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\hat{p}_\perp}{\hat{p}_\parallel} d\theta_0$$

$$\frac{\partial \hat{p}_\perp}{\partial Z} + \frac{g_0^2}{4} \frac{\partial \hat{p}_\perp}{\partial \tau} + i \frac{\hat{p}_\perp}{\hat{p}_\parallel} \left(\Delta - 1 + |\hat{p}_\perp|^2 + \frac{\hat{p}_\parallel^2 - 1}{g_0^2} \right) = i \frac{a}{\hat{p}_\parallel}$$

$$\frac{\partial \hat{p}_\parallel}{\partial Z} + \frac{g_0^2}{4} \frac{\partial \hat{p}_\parallel}{\partial \tau} = -g_0^2 \frac{\beta_{\perp 0}^2}{2} \operatorname{Re} \left(\frac{\hat{p}_\perp^*}{\hat{p}_\parallel} \frac{\partial a}{\partial Z} \right)$$

$$g_0 = \frac{\beta_{\perp 0}}{\beta_{\parallel 0}}$$

is the initial pitch-factor

$$I_0 = 16 \frac{e I_b \beta_{\parallel 0}}{m c^3 \beta_{\perp 0}^6} \frac{J_{m-1}^2(\kappa R_0)}{(\nu_n^2 - m^2) J_m^2(\nu_n)}$$

$$\Delta = \frac{2(\omega_c - \omega_H)}{\omega_c \beta_{\perp 0}^2} \text{ is the initial cyclotron detuning}$$

Boundary conditions

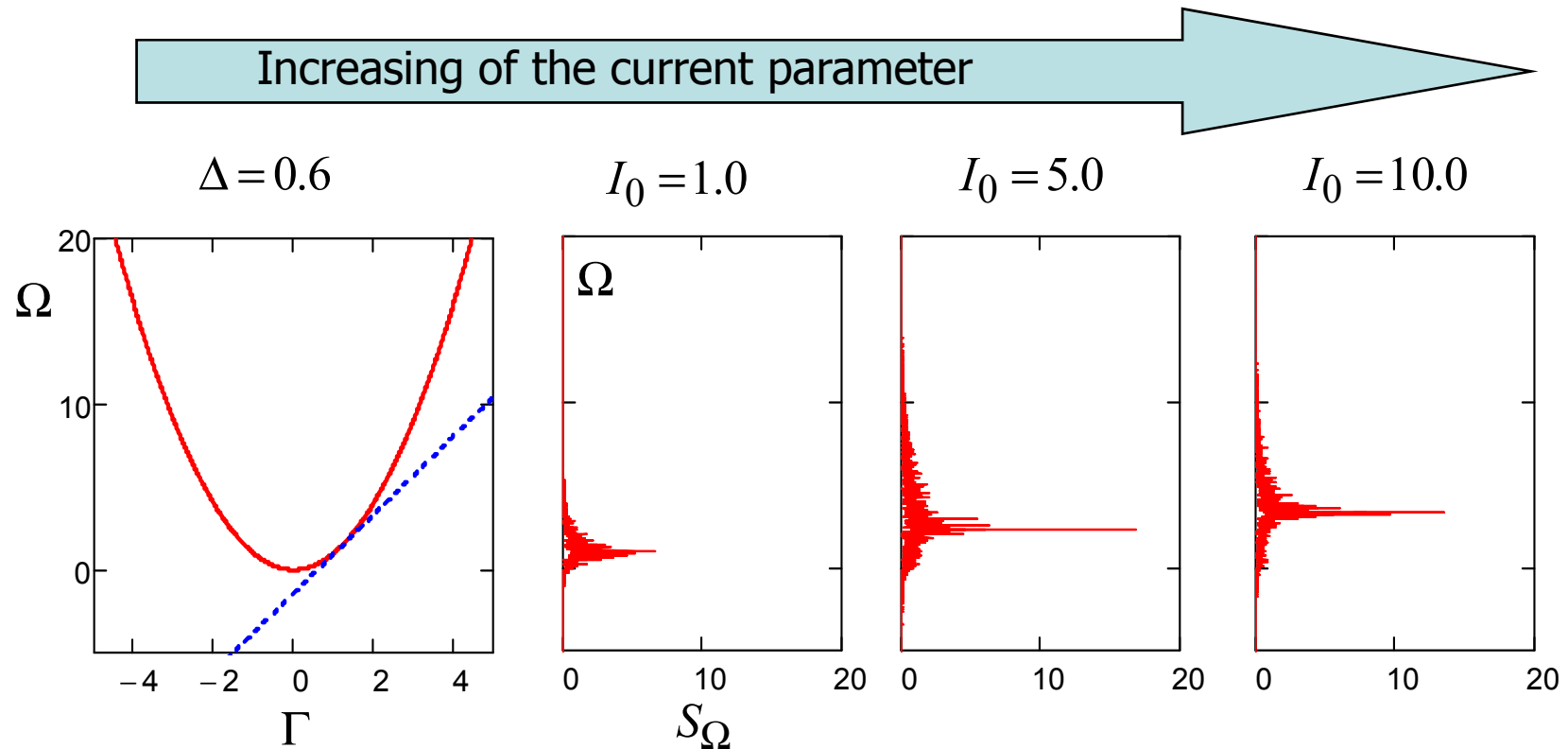
$$\hat{p}_\perp(Z=0) = e^{i\theta_0}, \theta_0 \in [0, 2\pi)$$

$$\hat{p}_\parallel(Z=0) = 1 \quad a(Z=0) = 0$$

$$a(L, \tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a(L, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 0$$

Results of simulations

Normalized parameters: $L = 15$, $g_0 = 1.3$, $\beta_{\perp 0} = 0.2$

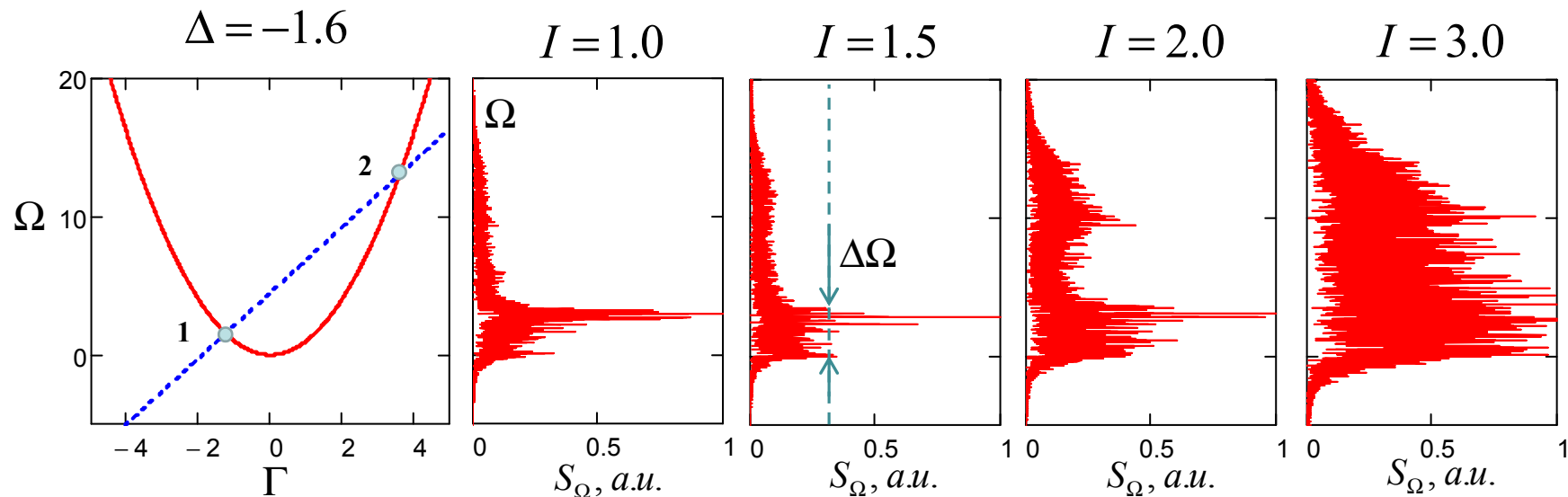


The grazing incidence between the beam line and the dispersion characteristic of a waveguide mode

Results of simulations

Normalized parameters: $L = 15$, $g_0 = 1.3$, $\beta_{\perp 0} = 0.2$

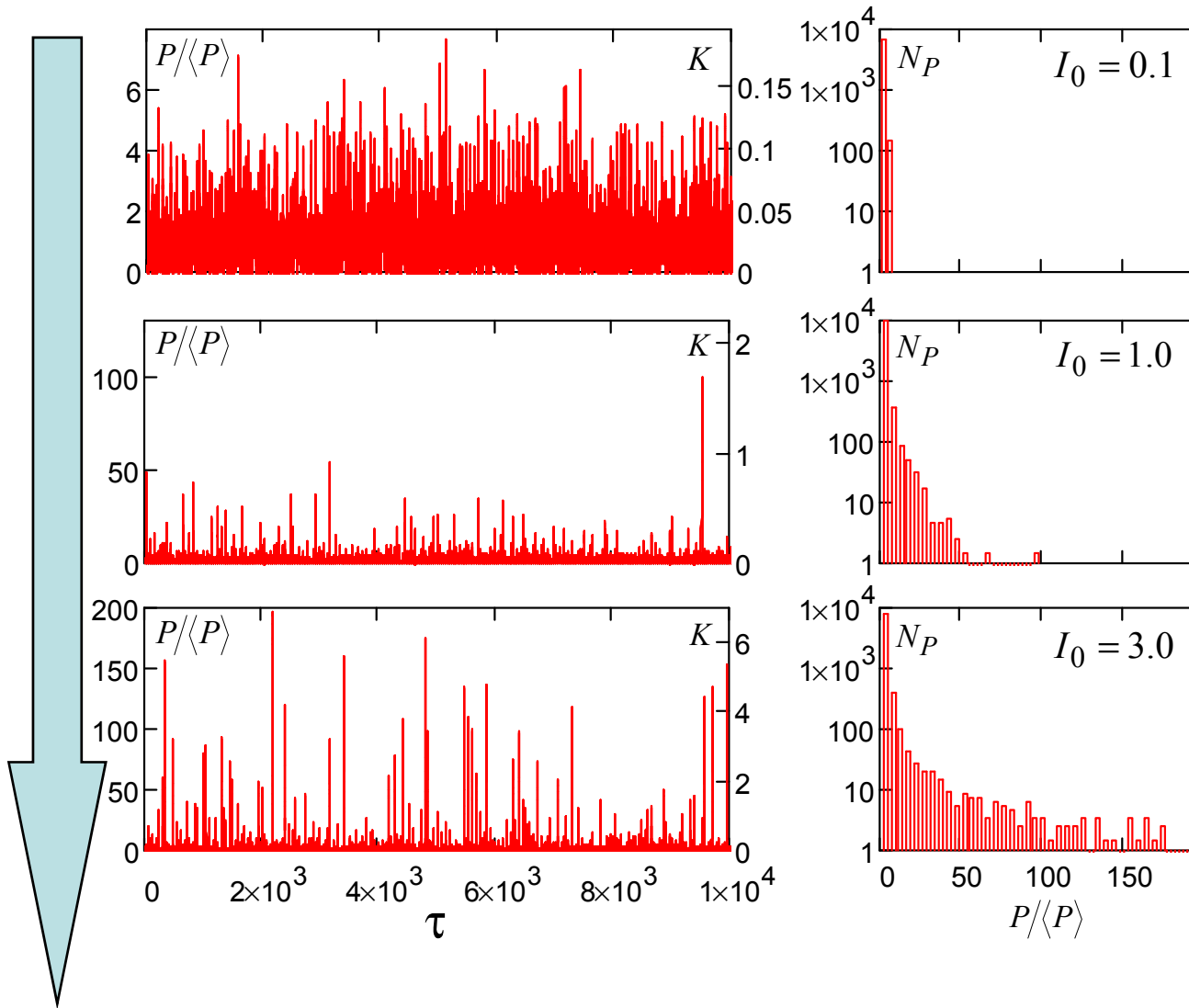
Increasing of the current parameter



The intersection between the beam line and the dispersion characteristic of a waveguide mode

$$\Delta\Omega_{\max} \approx \Omega_2 - \Omega_1$$

Regimes of chaotic generation in a gyrotron



$$\frac{P}{\langle P \rangle} \approx 4 \div 6$$

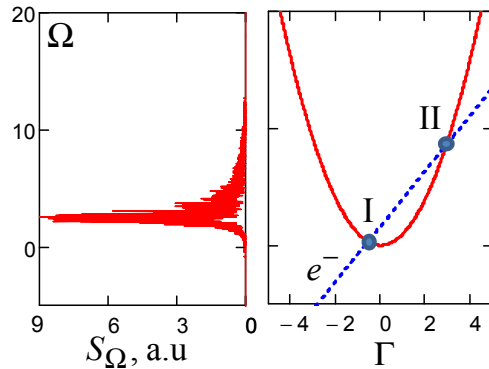
$$\frac{P}{\langle P \rangle} \approx 150 \div 200$$

$$K = \frac{P}{P_{beam}} \approx 4 \div 6$$

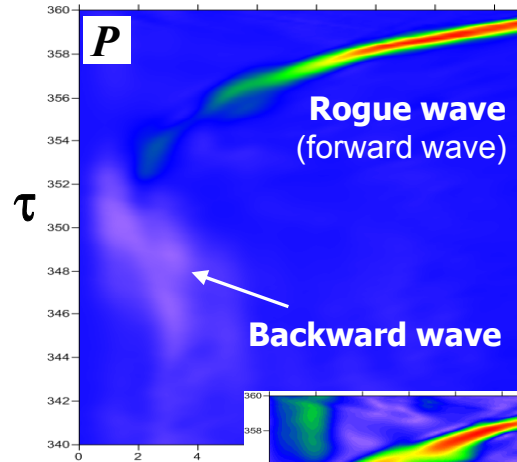
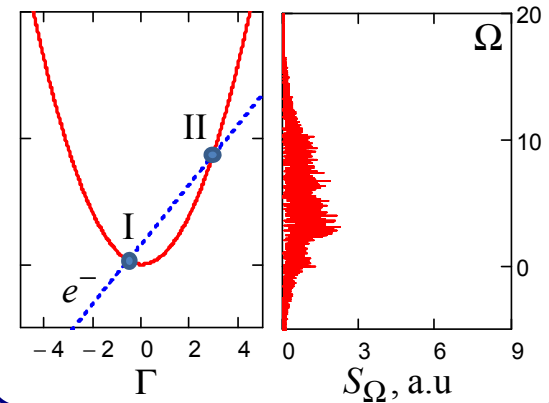
N_p is the number of spikes in the intensity bins with a given ratio $P/\langle P \rangle$

Formation of "rogue waves"

Spectrum of em field at the gyrotron entrance

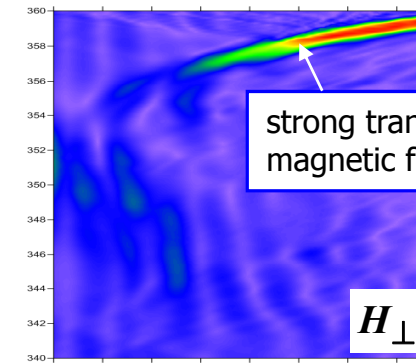
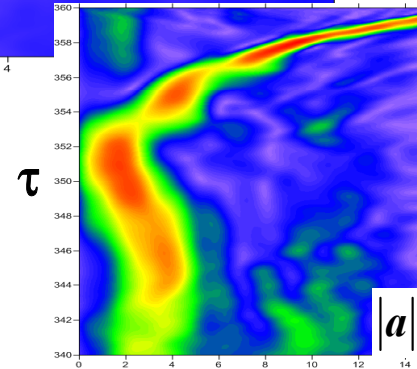


Radiation spectrum at the gyrotron output

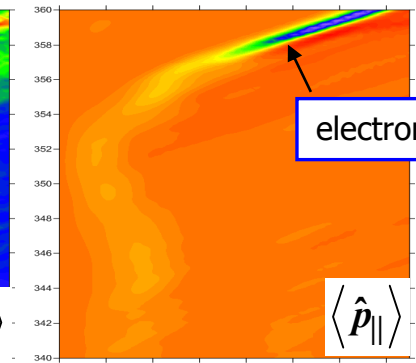
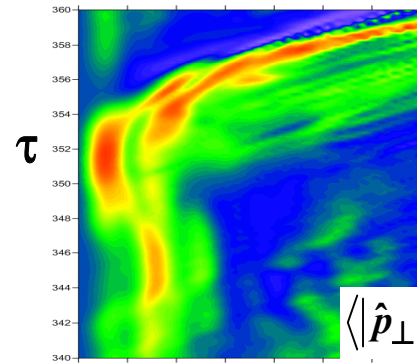


1st stage: The electrons leaving the interaction space at an early moment of time impart their transverse energy with the backward wave to the later injected electrons which produce a forward propagating em pulse.

2nd stage: The em pulse front steepening is accompanied by excitation of a strong transverse magnetic field, that leads to the transformation of the longitudinal to transverse momenta of particles.



strong transverse magnetic field

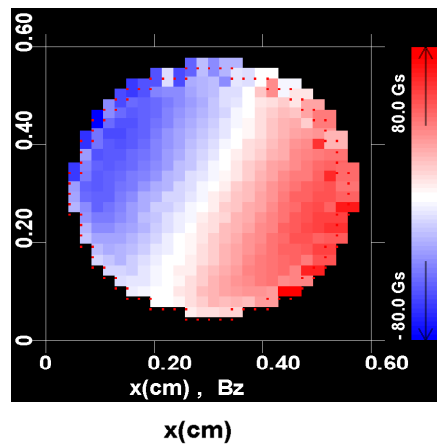
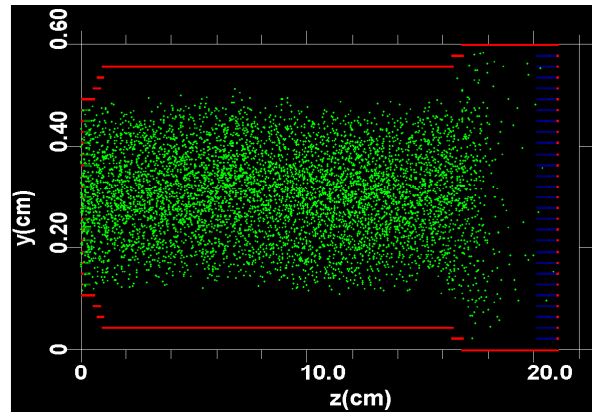


electrons deceleration

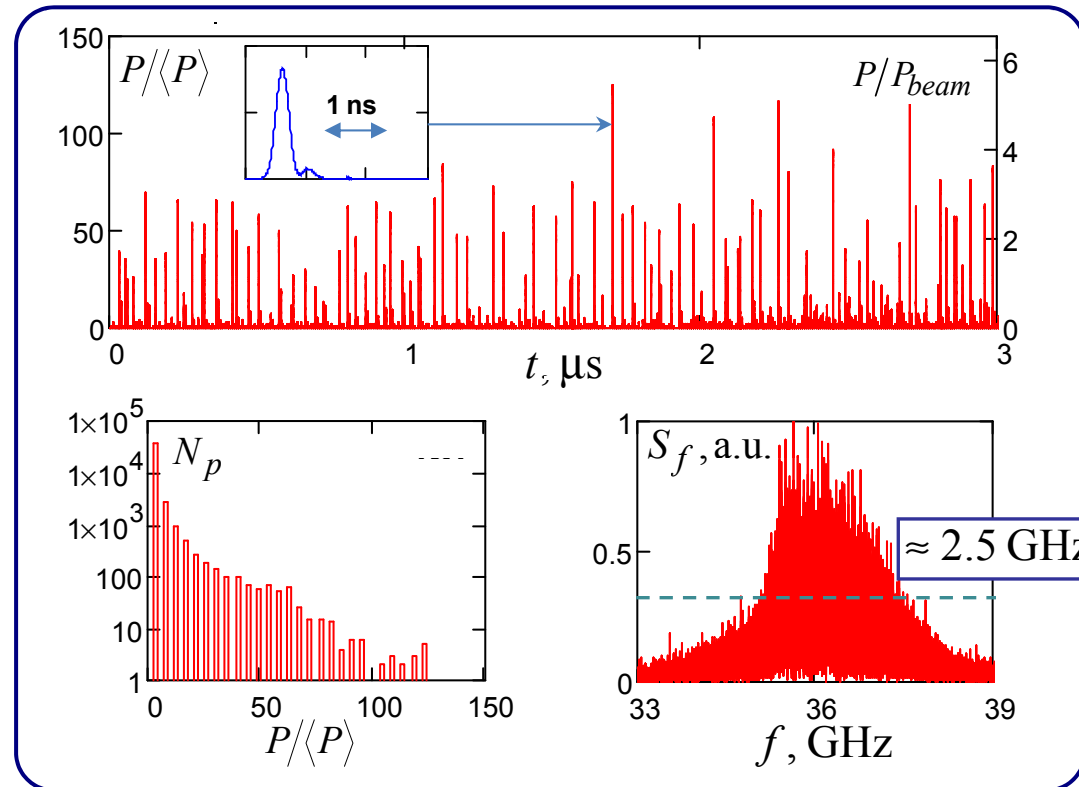
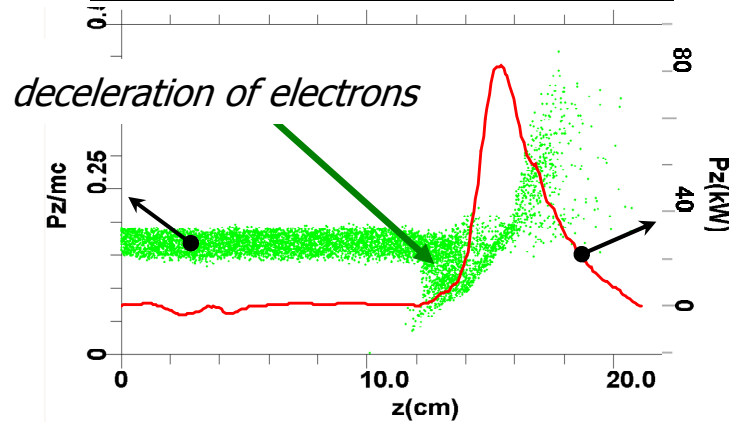
Z

Z

3D PIC simulations of "rogue waves" generation in a 35-GHz gyrotron



Voltage	20 kV
Current	2 A
Pitch-factor	1.3
Operating mode	TE ₁₁
Operating frequency	35 GHz
Cavity radius	2.5 mm
Injection radius	1 mm
Cavity length	150 mm



The required exceeding over the threshold can be provided due to operation at the lowest modes of the microwave cavities.

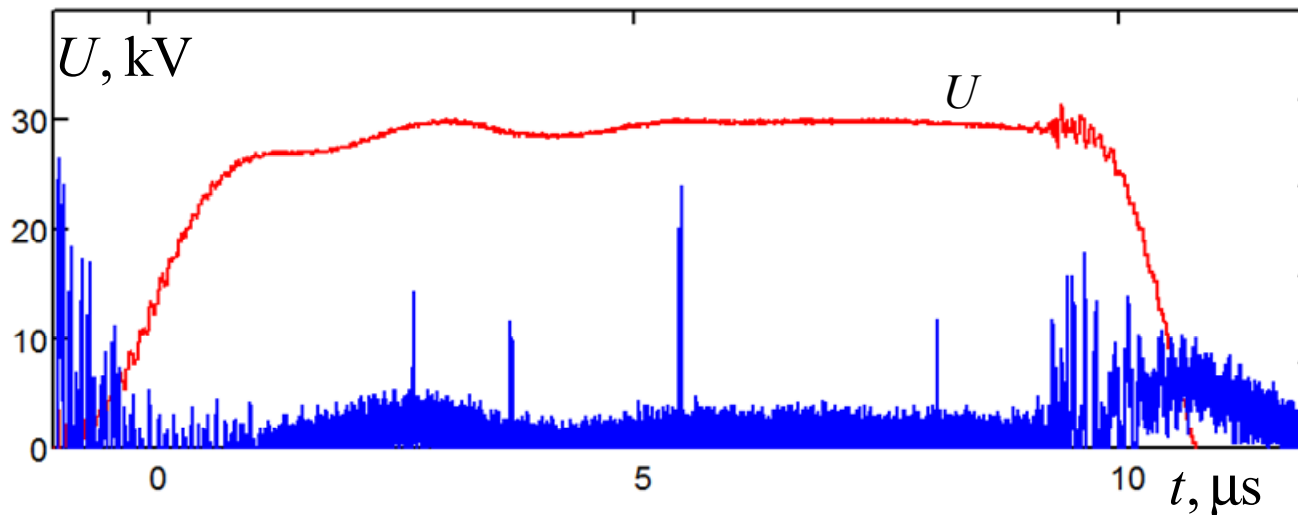
$$P_{peak} \sim 200 - 230 \text{ kW}$$

$$\langle P \rangle \sim 1.5 \text{ kW}$$

Экспериментальная регистрация «волн-убийц» в 33 ГГц гиротроне

Параметры пучка	
Энергия	30 keV
Ток	0.2 A
Питч-фактор	1.0
Магнитное поле	~ 1.2 T

Параметры резонатора	
Рабочая мода	TE ₁₁
Радиус	2.65 mm
Критическая частота	≈ 33 GHz
Длина	250 mm



$$I/I_{start} \geq 10^3$$

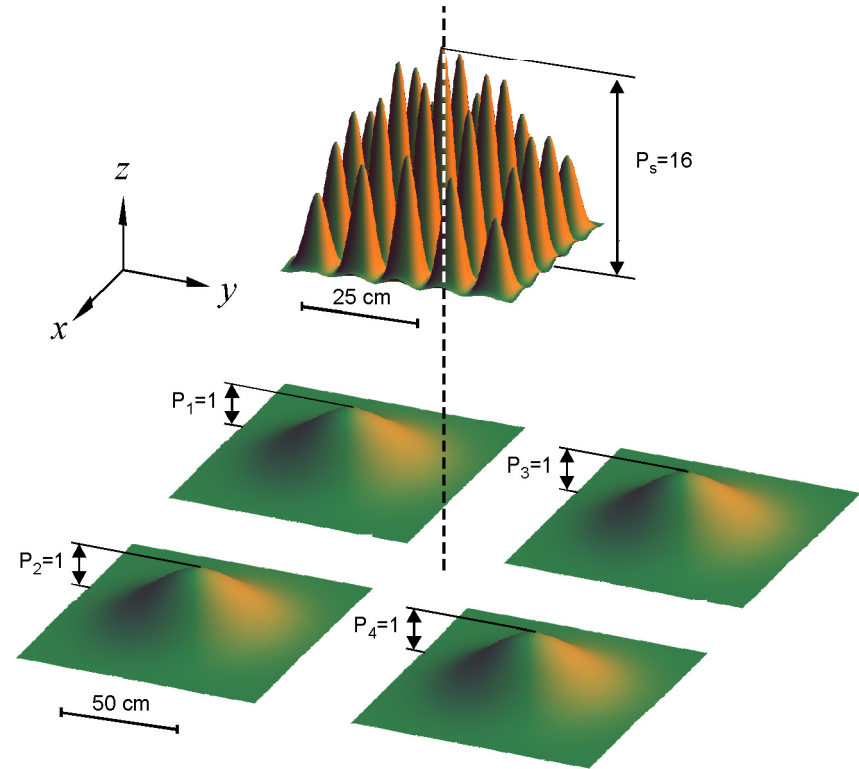
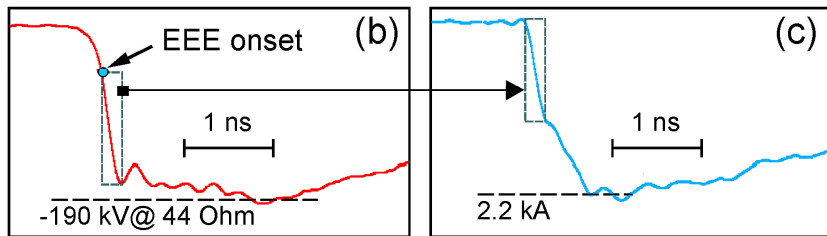
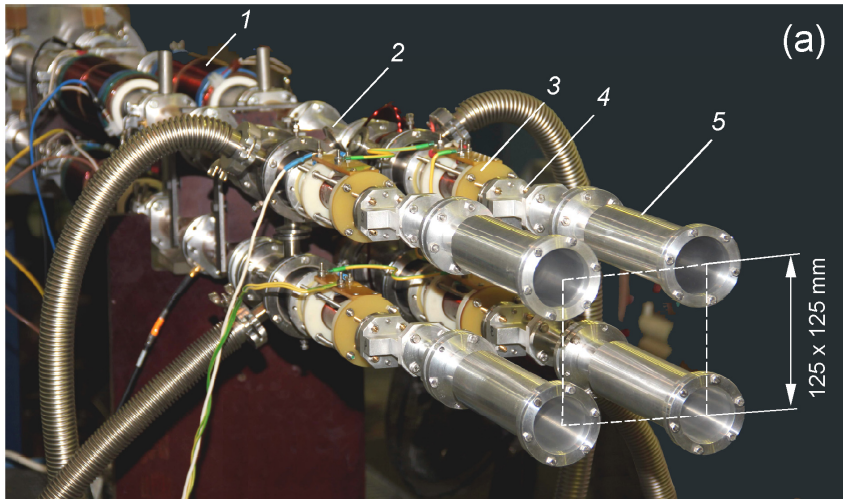
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. *Теоретически и экспериментально исследованы новые методы генерации ультракоротких микроволновых импульсов, основанные на аналогии с методами известными в квантовой электронике, включая*
 - *эффект сверхизлучения (СИ) протяженных электронных сгустков;*
 - *формирование солитонов в условиях циклотронного резонансного поглощения;*
 - *эффект пассивной синхронизации мод в электронных генераторах с насыщающимся циклотронным поглотителем в цепи обратной связи.*

2. *На основе эффекта сверхизлучения создан новый класс генераторов миллиметрового и сантиметрового излучения, характеризующихся высокой (гигаваттной) пиковой мощностью и ультракороткой (субнаносекундной) длительностью импульсов.*

3. *Возможные приложения генераторов импульсов СИ:*
 - *радиолокация высокого разрешения;*
 - *тестирование электронных схем;*
 - *диагностика различных сред;*
 - *спектроскопия;*
 - *биологические приложения.*

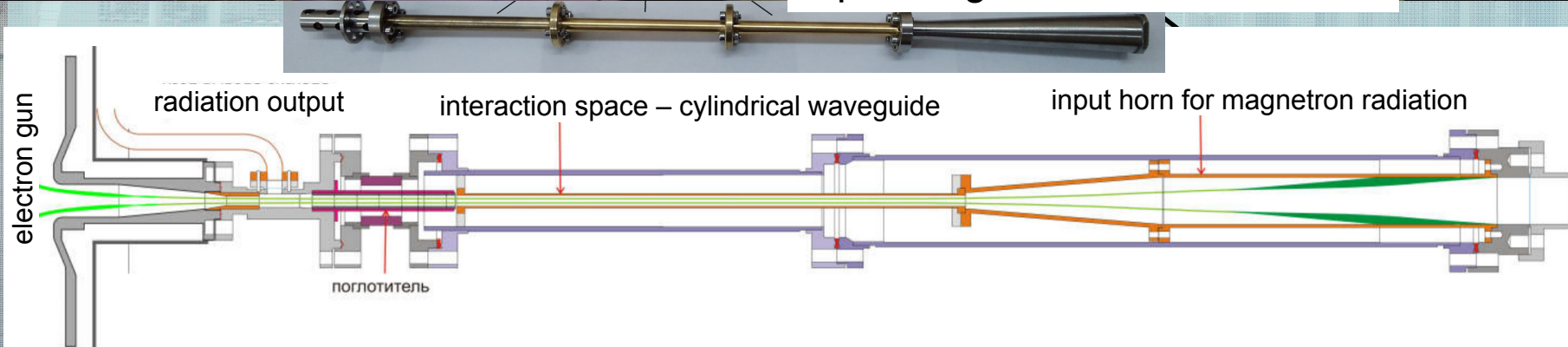
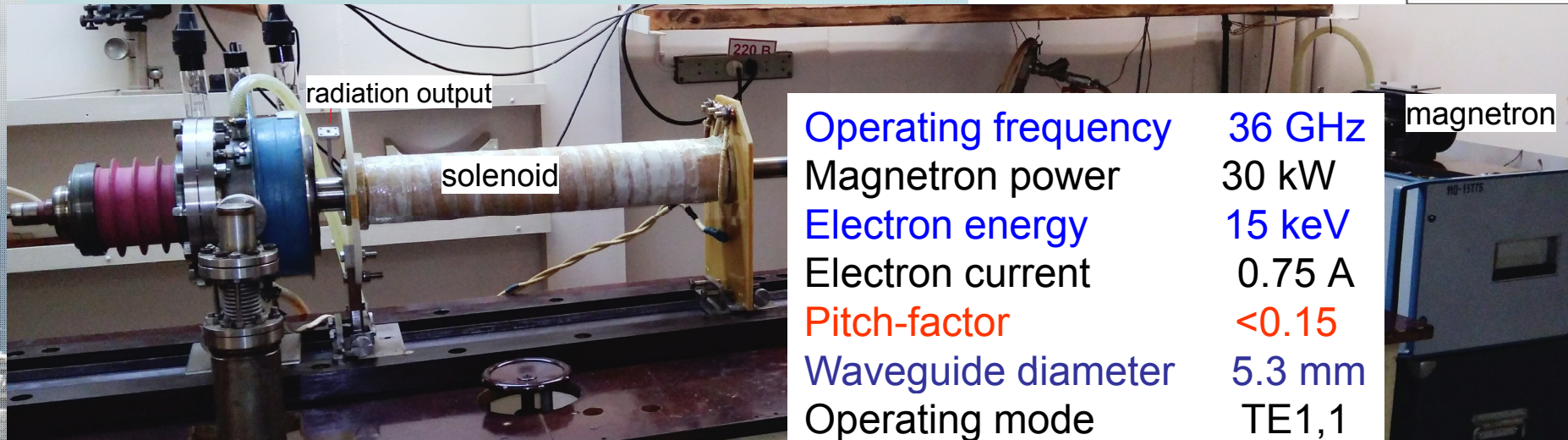
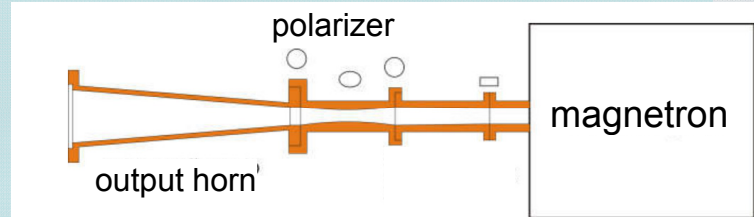
Generation of electromagnetic fields of extremely high intensity by 2D-array of coherent SR sources



Sharpened accelerating voltage pulse (b).
Electron beam current recorded in the input cross-section of interaction space (c).

A. Fedotov

Experimental set-up (36 GHz)

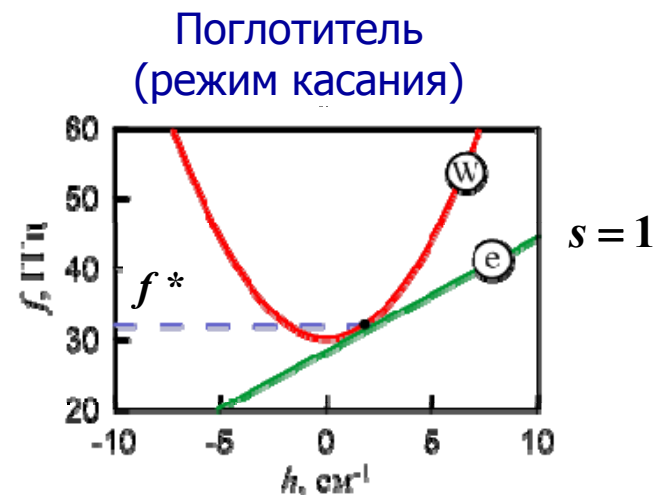
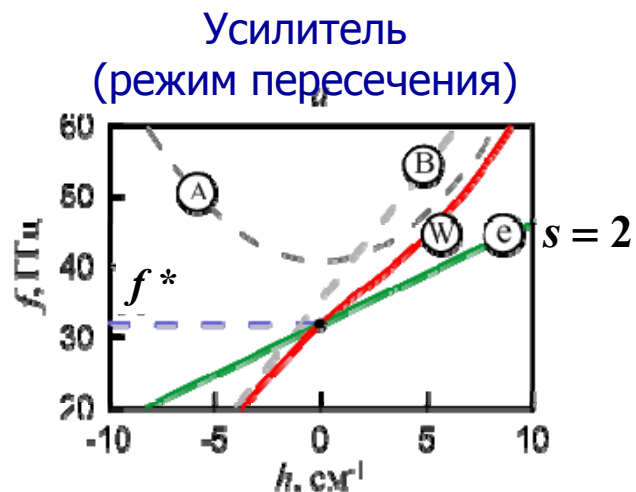


There is no any generation without input signal from magnetron



Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences

Параметры моделирования генератора УКИ 32 ГГц



	Усилительная секция	Секция поглощения
Средний радиус волновода	0.36 см	0.3 см
Амплитуда гофрировки	0.07 см	-
Период гофрировки	1.2 см	-
Длина пространства взаимодействия	18.3 см	3 см
Ведущее магнитное поле	0.64 Тл	1.07 Тл
Рабочая гармоника гирочастоты	2	1
Ускоряющее напряжение	68 кВ	32 кВ
Ток пучка	10 А	3.8 А
Радиус инжекции пучка	0 см	
Питч-фактор частиц	1.2	0

Усилитель - рабочая связка мод TE₂₁(критическая) и TE₁₁(бегущая), поглотитель - мода TE₁₁
Коэффициент отражения в цепь обратной связи по амплитуде $\kappa = 0.3$