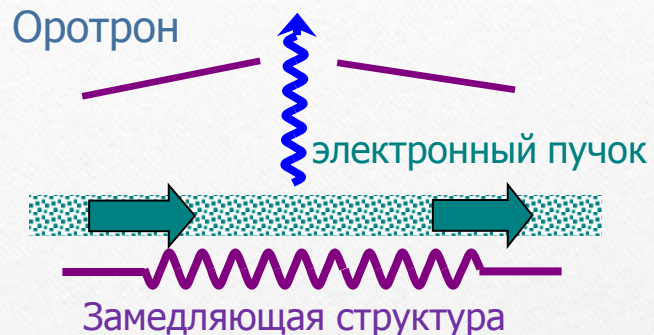


Генерация мощных ультракоротких электромагнитных импульсов на основе эффектов сверхизлучения

Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова

Стимулированное излучения квазистационарных электронных пучков

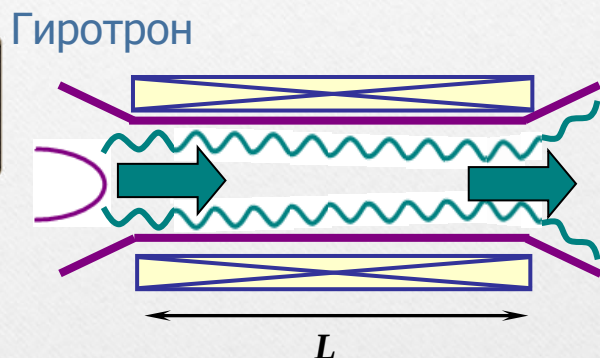


$$L_{beam} \gg \lambda$$

$$L_{beam} \gg L$$



ТГц оротроны
(0.4 ТГц, 100 мВт)

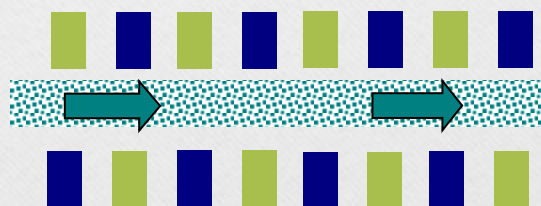


ТГц ЛОВ
(1.4 ТГц, 2 мВт)



ТГц гиротроны
(1 ТГц, 5 кВт)

Непрерывный ЛСЭ (МСЭ)



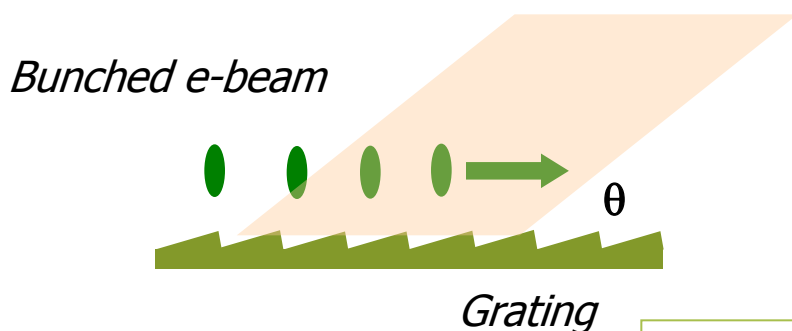
ондулятор

THz gyrotrons
(1 THz, 5 kW)



Когерентное излучение коротких электронных сгустков (когерентное спонтанное излучение)

Излучение Смита-Парселла



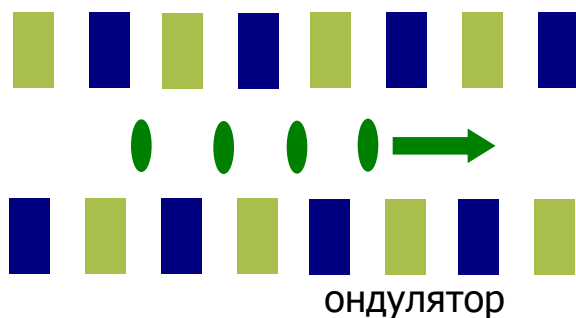
*S.E.Korbly, A.S.Kesar, J.R.Sirigiri, and
R.J.Temkin PRL 94, 054803 (2005)*

*Energy of electrons 15 MeV
Bunch duration 1 ps
Bunch charge 9 pC*

Operating frequency 0.25 THz

$$L_{\text{beam}} \ll \lambda$$

Ондуляторное излучение

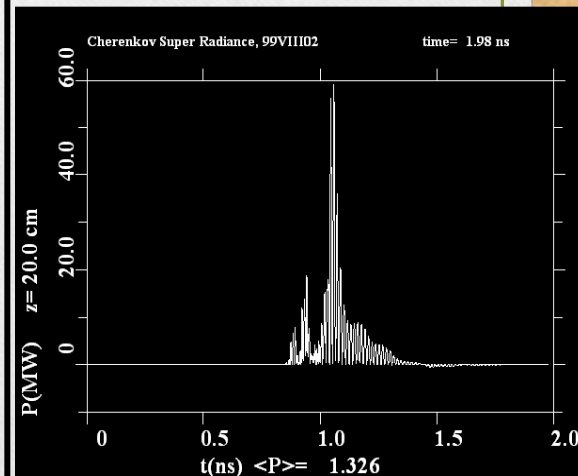
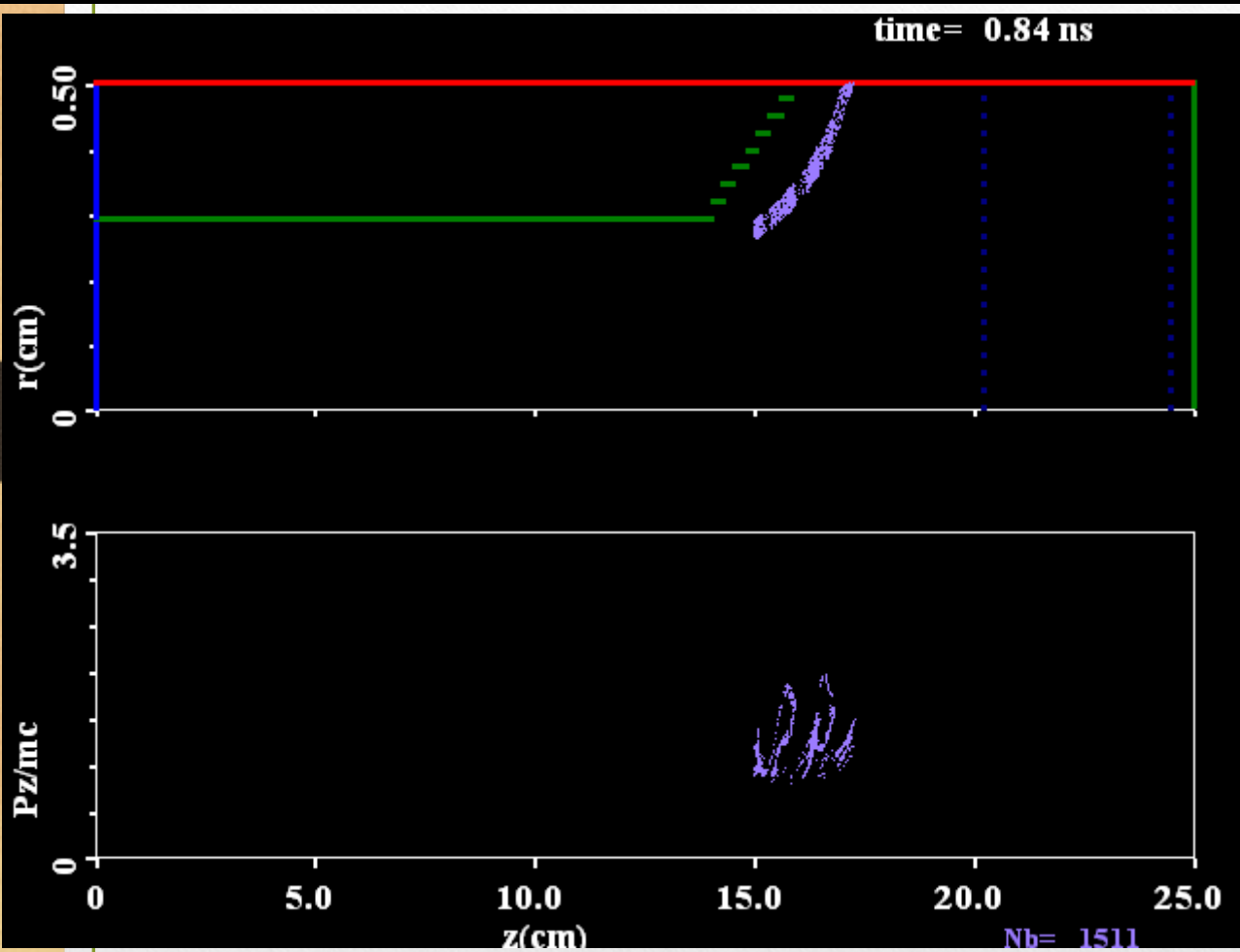
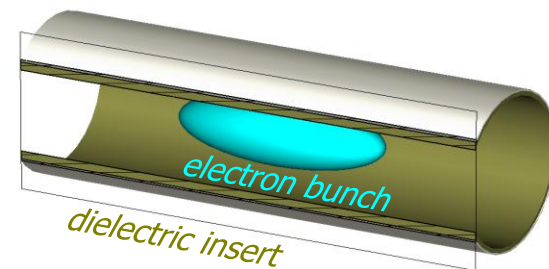


ENEA-Frascati FEL

*Energy of electrons 2.5 MeV
Bunch duration 3-10 ps
Operating frequency 0.07-0.7 THz
Radiation power 1.5 kW*

СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ - когерентное излучение электронных сгустков протяженных в масштабе длины волны

$$L_{beam} \approx 10 - 15\lambda$$

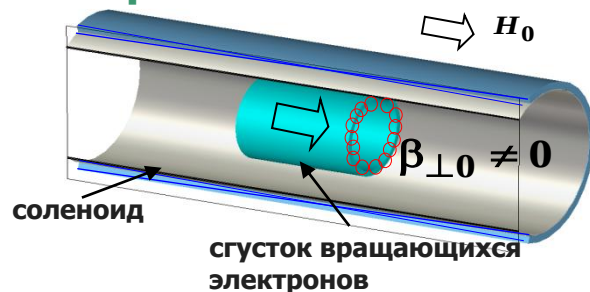


SR = selfbunching + slippage

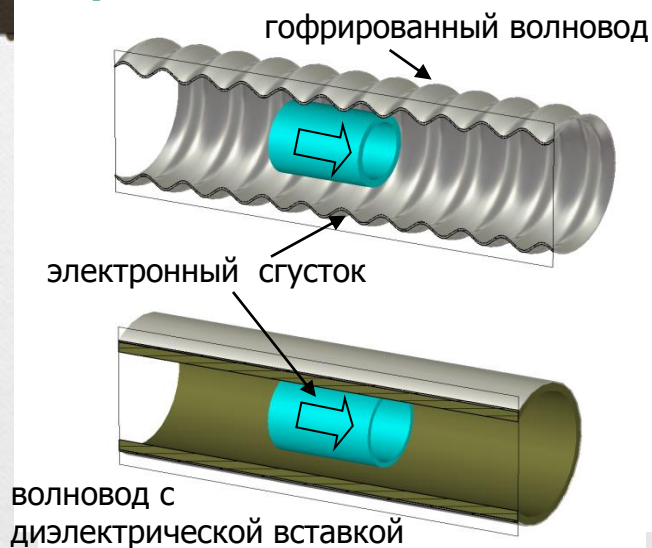
СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ - когерентное излучение электронных сгустков протяженных в масштабе длины волны

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

Циклотронное СИ



Черенковское СИ



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

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

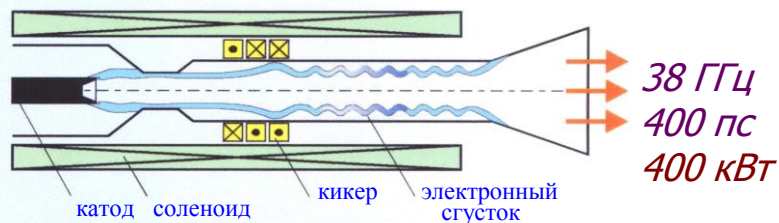
Когерентность излучения в отсутствии резонатора обеспечивается за счет:

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

Экспериментальное наблюдение эффектов СИ в мм диапазоне (ускоритель RADAN, ИЭФ УрО РАН – 200-300 кэВ, 0.2-2 кА, 0.5-1 нс)

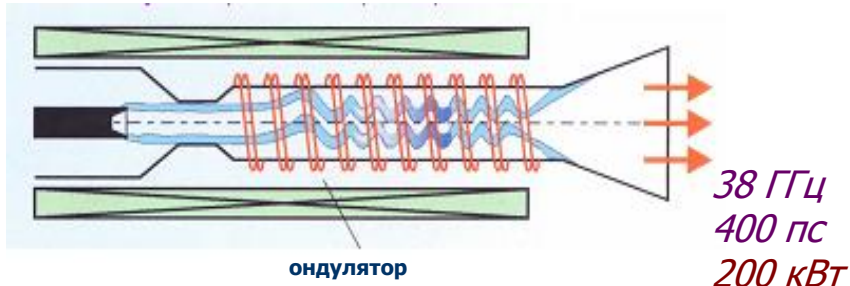
Циклотронное СИ

Phys. Rev. Lett. 1996



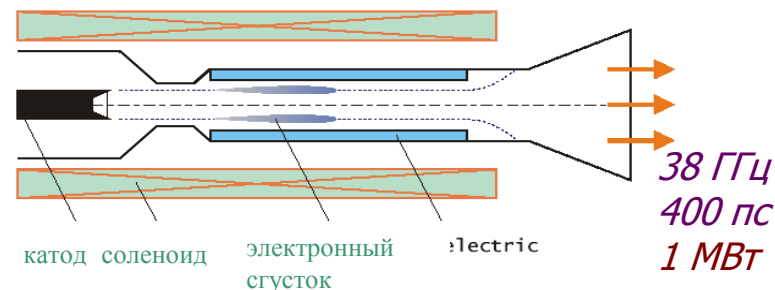
Ондуляторное СИ

NIMA 1997



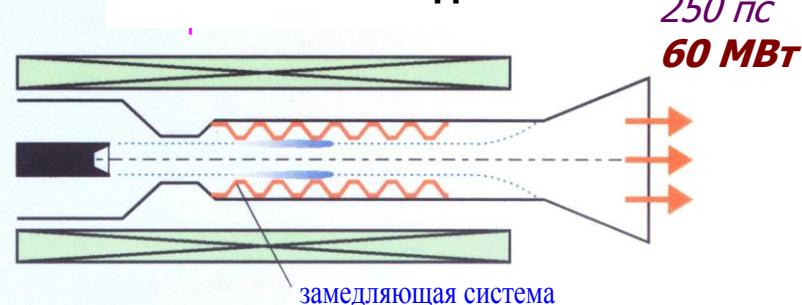
Черенковское СИ при взаимодействии с попутной волной

1999 г.



Черенковское СИ при взаимодействии со встречной волной

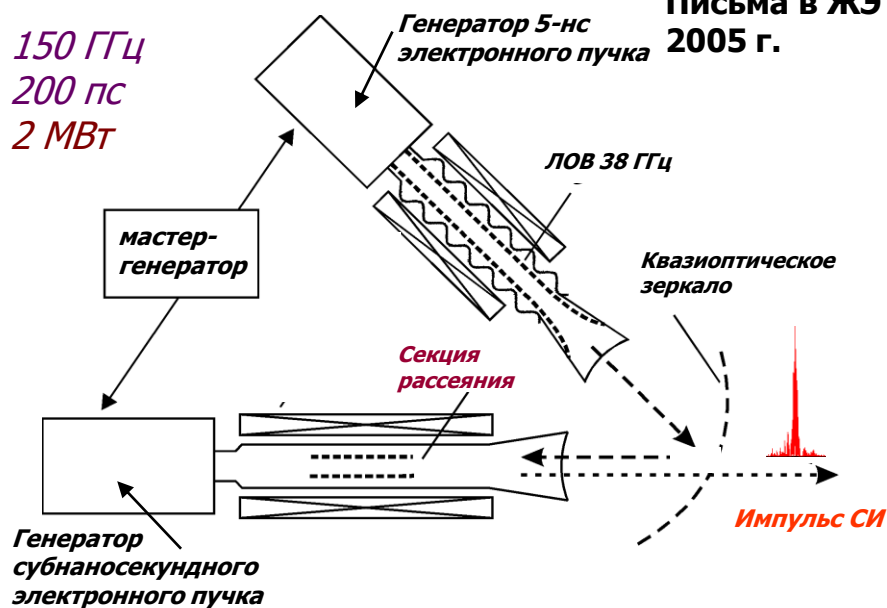
ДАН 2000 г.



СИ в процессе вынужденного встречного рассеяния

Письма в ЖЭТФ 2005 г.

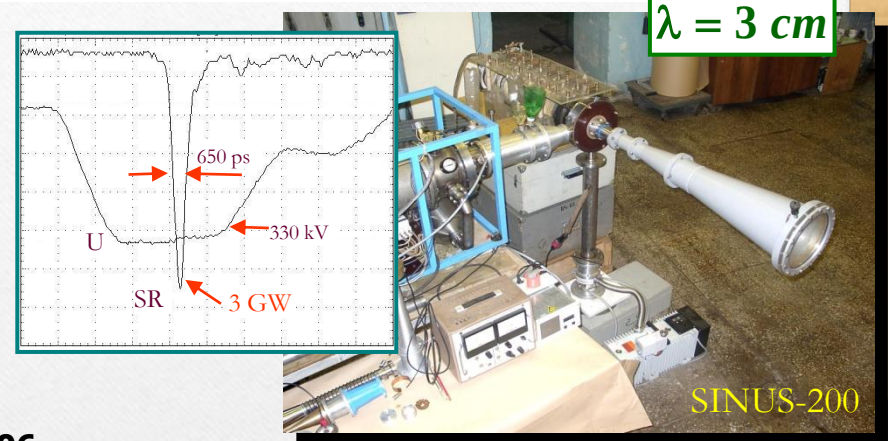
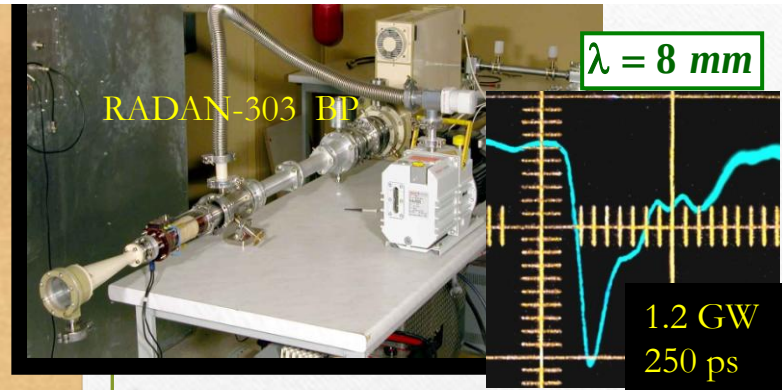
150 ГГц
200 пс
2 МВт



Generation of subnanosecond SR pulses with GW level of peak power

IEP RAS (Ekaterinburg), IHCI RAS (Tomsk), IAP RAS

IEP RAS (Ekaterinburg), IHCI RAS (Tomsk)

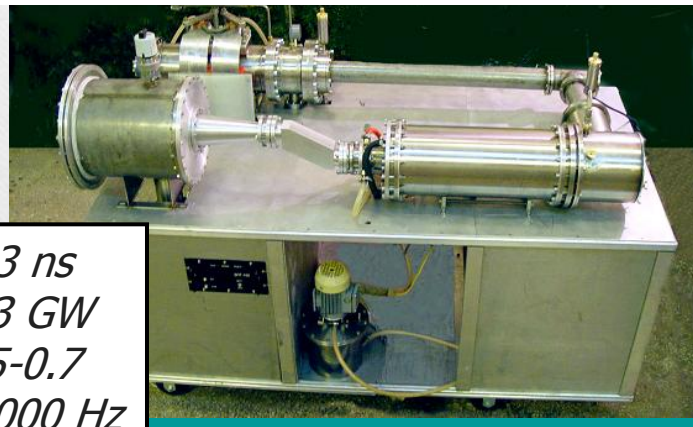


Phys. Rev. E. 2006.

Ka- and X-band SR sources with high repetition rate and high average power

IHCE RAS, Tomsk
IEP RAS, Ekaterinburg

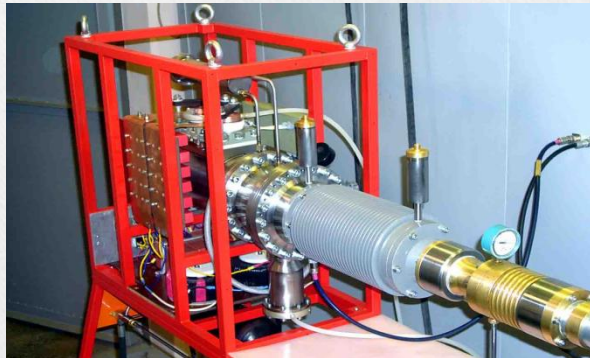
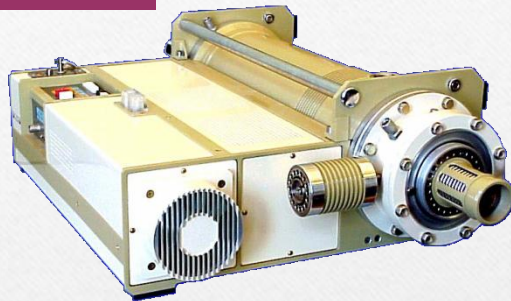
SR pulse duration -	0.3-3 ns
Peak power -	0.5-3 GW
Conversion coefficient -	0.5-0.7
Repetition frequency -	300-1000 Hz
Average power -	up to 3 kW



Compact short-pulse high-current drivers (accelerators)

*Institute of Electrophysics (Ekaterinburg, Russia)
Institute of High Current Electronics RAS (Tomsk, Russia)*

RADAN-303



SINUS-150



SM-3NS

	<i>SINUS</i>	<i>RADAN</i>	<i>SM-3NS</i>
<i>Voltage, kV</i>	<i>300-600</i>	<i>150-200</i>	<i>400</i>
<i>Voltage pulse duration, ns</i>	<i>5-20</i>	<i>0.2-4</i>	<i>5</i>
<i>Repetition rate, Hz</i>	<i>1-100</i>	<i>1-100</i>	<i>1-3500</i>
<i>Electrons energy, keV</i>	<i>300-500</i>	<i>200-300</i>	<i>250</i>
<i>Electron current, kA</i>	<i>2-5</i>	<i>1-2.5</i>	<i>2</i>
<i>Current pulse duration, ns</i>	<i>2-4</i>	<i>0.2-1</i>	<i>1</i>

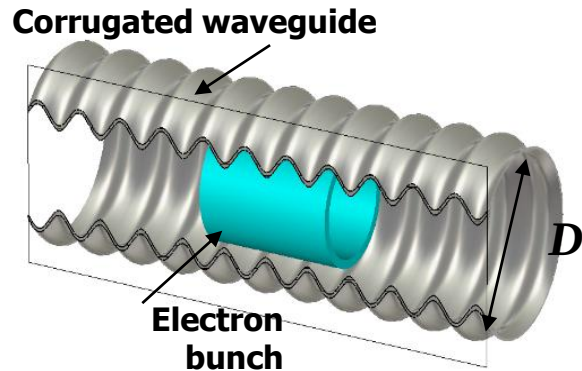
Продвижение источников СИ в коротковолновые диапазоны

1. Генерация импульсов СИ в сверхразмерных замедляющих системах с возбуждением поверхностных волн. Квазиоптическая теория и результаты экспериментов.
2. Генерация мультимегаваттных импульсов ТГц диапазона на основе ондуляторного СИ электронных сгустков, формируемых фотоинжектором.
3. Циклотронное СИ в режиме группового синхронизма.

Продвижение источников СИ в коротковолновые диапазоны

1. Генерация импульсов СИ в сверхразмерных замедляющих системах с возбуждением поверхностных волн. Квазиоптическая теория и результаты экспериментов.
2. Генерация мультимегаваттных импульсов ТГц диапазона на основе ондуляторного СИ электронных сгустков, формируемых фотоинжектором.
3. Циклотронное СИ в режиме группового синхронизма.

ADVANCEMENT OF SR SOURCES INTO SHORTWAVE RANGES



GW level of peak power in X-band and Ka-band

$$\frac{D}{\lambda} \sim 1$$

Less than 10 MW in W-band
and 5 MW in G-band !!

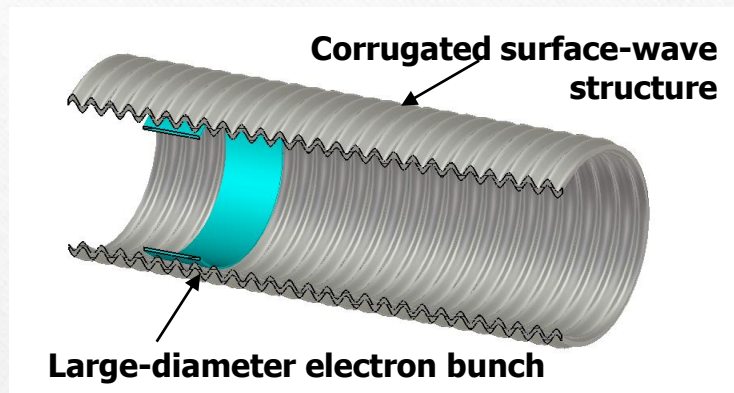
M.Yalandin, et al, IEEE Trans. on Plasma Sci. 28, 1615 (2000)

Use of low-oversize SWSs restricts

- the further increase in peak power (due to limitation in the current density);
- the advancement to shorter wavelength ranges (due to problems with beam transportation and an increase in the Ohmic losses)

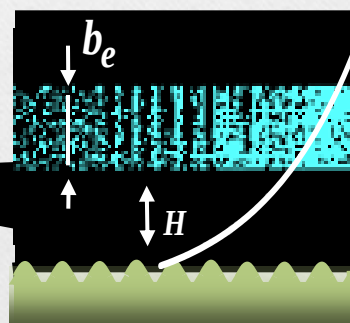
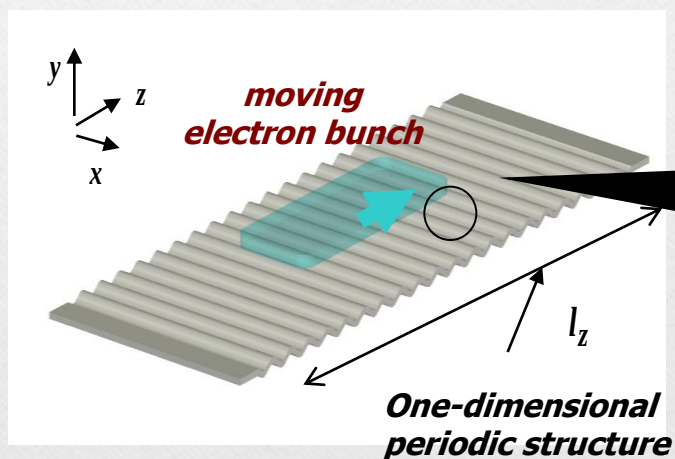
Возбуждение поверхностных волн в сверхразмерных или открытых замедляющих системах

$$\frac{D}{\lambda} \gg 1$$



Excitation of the evanescent surface wave in strongly oversized periodical structures

CW SWO (Surface-Wave Oscillators)



THz-band

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

$$\gamma = \left(1 - V^2/c^2\right)^{-1/2}$$

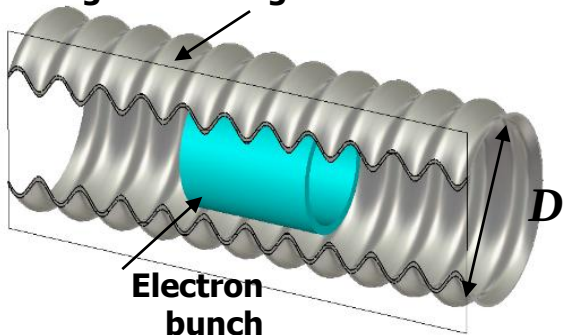
$$b_e \leq L_{\perp} \quad H \leq L_{\perp}$$

$L_{\perp}$

- scale of exponential decay of the surface wave

ADVANCEMENT OF SR SOURCES INTO SHORTWAVE RANGES

Corrugated waveguide



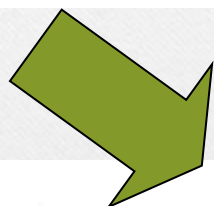
Electron bunch

GW level of peak power in X-band and Ka-band

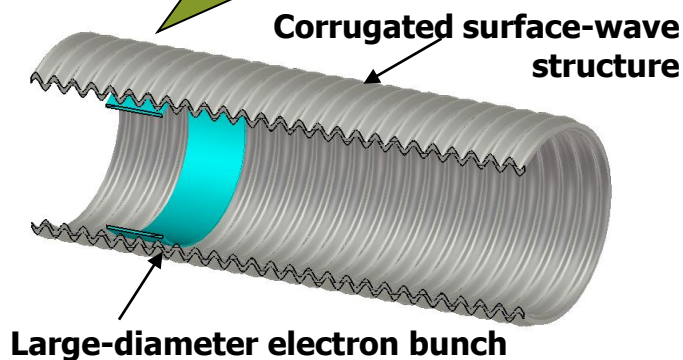
$$\frac{D}{\lambda} \sim 1$$

Less than 10 MW in W-band
and 5 MW in G-band !!

M.Yalandin, et al IEEE Trans. on Plasma Sci. 28, 1615 (2000)



$$\frac{D}{\lambda} \gg 1$$



Corrugated surface-wave structure

Large-diameter electron bunch

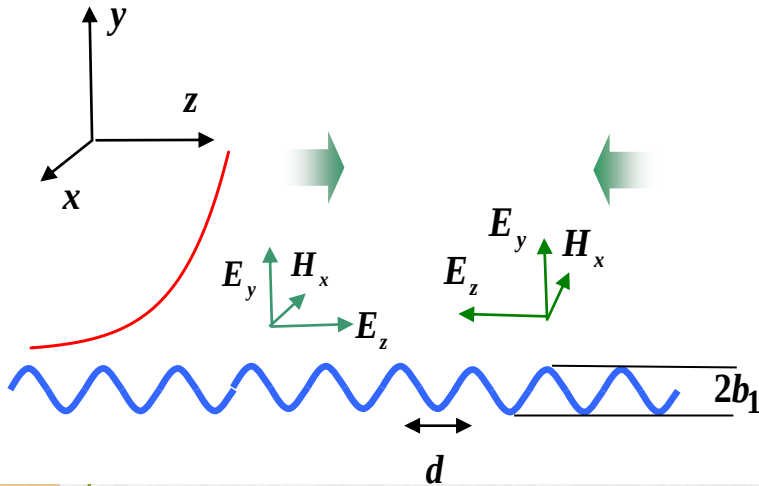
Excitation of the evanescent surface wave in strongly oversized periodical structures

CW SWO (Surface-Wave Oscillators)

Quasioptical model of wave propagation near a shallow corrugated surface

Ginzburg N.S., Malkin A.M. et.al Appl.Phys.Lett. 2011

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



Two counter-propagating
TM-polarized wave-beams :

$$H_x = \text{Re} \left[A_+(z, y, t) e^{i(\omega_0 t - k_0 z)} + A_-(z, y, t) e^{i(\omega_0 t + k_0 z)} \right]$$

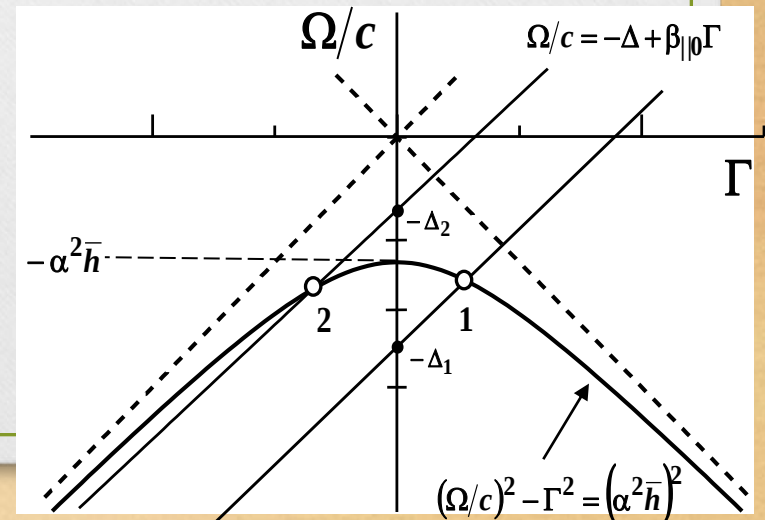
$$E_y = -\text{Re} \frac{i}{k_0} \left[A_+ e^{i(\omega_0 t - k_0 z)} + A_- e^{i(\omega_0 t + k_0 z)} \right]$$

$$E_z = -\text{Re} \frac{i}{k_0} \left[\frac{\partial A_+}{\partial y} e^{i(\omega_0 t - k_0 z)} + \frac{\partial A_-}{\partial y} e^{i(\omega_0 t + k_0 z)} \right]$$

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

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

Surface magnetic current



3D model of superradiance of electron bunch interacting with surface wave

Phys. Rev. Lett. 2013

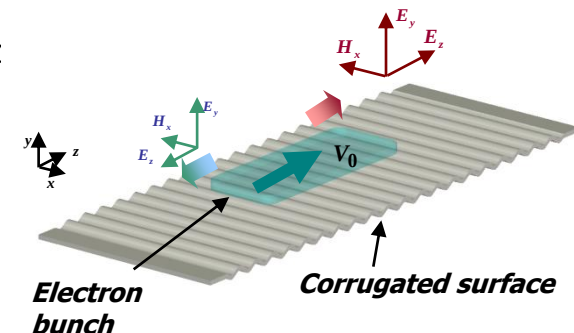
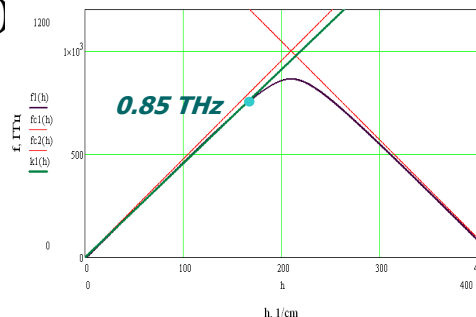
$$\frac{\partial A_+}{\partial Z} + \frac{\partial A_+}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 A_+}{\partial Y^2} + i \frac{\partial^2 A_+}{\partial X^2} = i \alpha A_- \delta(Y) - \frac{\chi(Z - \beta_0 \tau)}{B_e} \frac{\partial}{\partial Y} (F(Y)) \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta$$

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

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

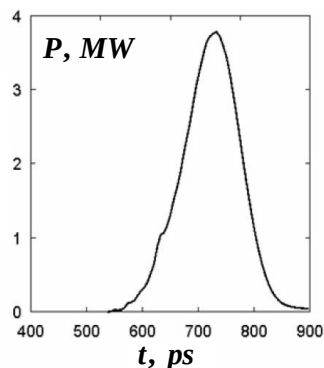
$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 + r \cos \theta_0, \quad \theta_0 \in [0, 2\pi),$$

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



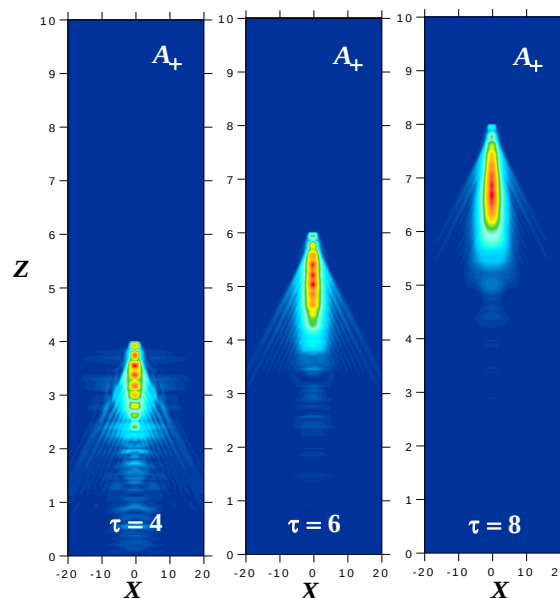
Parameters of simulations

Electron energy	1.4 MeV
Charge of electron bunch	2 nC
Bunch duration	40 ps
Corrugation depth	20 mkm
Corrugation period	0.15 mm
Corrugation length	13 cm



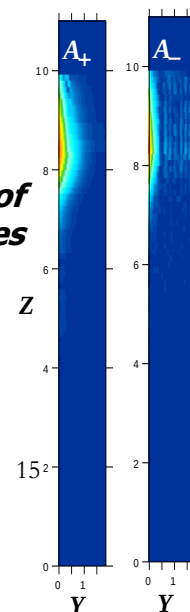
SR pulse
~3.7 MW
100 ps
0.9 THz

Formation of wake-field

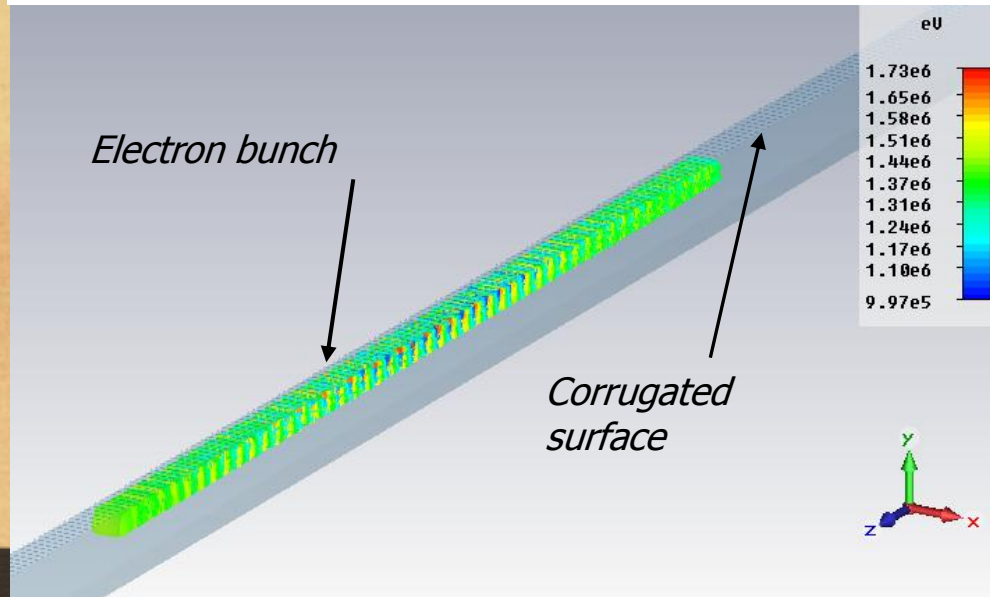


$\tau = 8$

Structure of partial waves

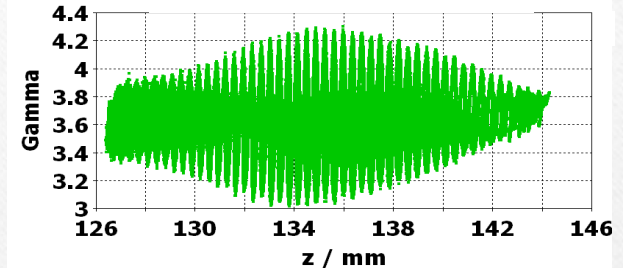


3D PIC simulations of THz superradiance (CST Studio Suite)

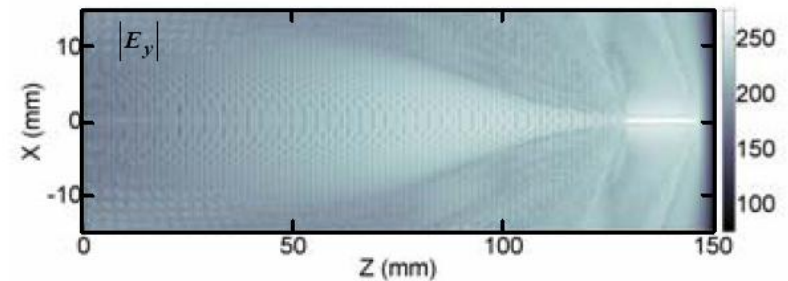
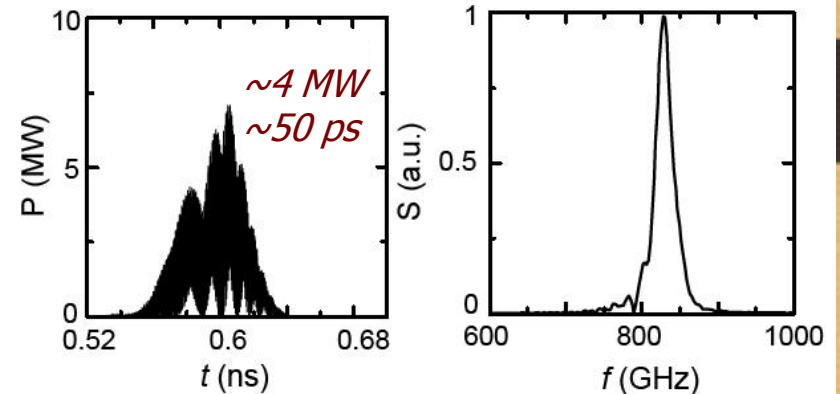


Phys. Rev. Lett. 2013

Modulation of electrons energy



SR pulse and its spectrum



Formation of wake-field

Parameters of electron bunch

Bunch length	3 mm
Transverse size	0.3 mm
Electron energy	1.4 MeV
Total charge	2 nC

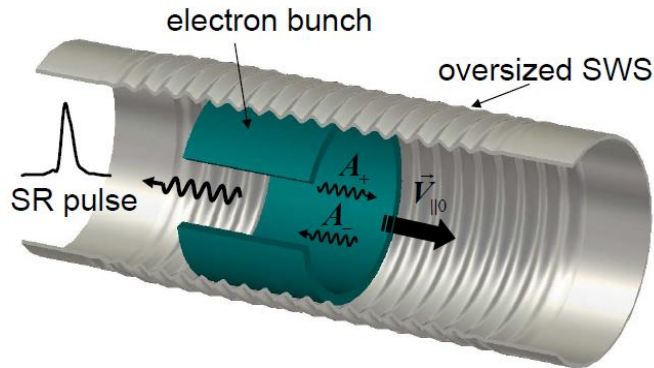
Parameters of corrugation

Corrugation length	15 cm
Corrugation period	0.15 mm
Corrugation depth	50 μm

SUPERRADIANT EXCITAION OF SURFACE WAVE IN A CYLINDRICAL WAVEGUIDE WITH 1D PERIODICAL CORRUGATION

axial-symmetric model

N.Ginzburg, et al, Phys. Rev. Lett. 2015



$$J = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-i\theta) d\theta_0$$

$$G = \frac{4\sqrt{2}eI_0}{mc^3\gamma_0^3\beta_0^3} \left(\int_0^{\rho_0} \rho \psi(\rho) d\rho \right)^{-1}$$

Surface magnetic current

$$\frac{\partial a_+}{\partial Z} + \frac{\partial a_+}{\partial \tau} + i \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho a_+)}{\partial \rho} \right) = i\alpha \delta(\rho - \rho_0) a_- - G f(Z - \beta_0 \tau) \frac{\partial}{\partial \rho} (\psi(\rho) J),$$

$$-\frac{\partial a_-}{\partial Z} + \frac{\partial a_-}{\partial \tau} + i \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho a_-)}{\partial \rho} \right) = i\alpha \delta(\rho - \rho_0) a_+,$$

HF electron current

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{1}{\beta_0} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \text{Re} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho a_+)}{\partial \rho} e^{i\theta} \right),$$

Motion equations

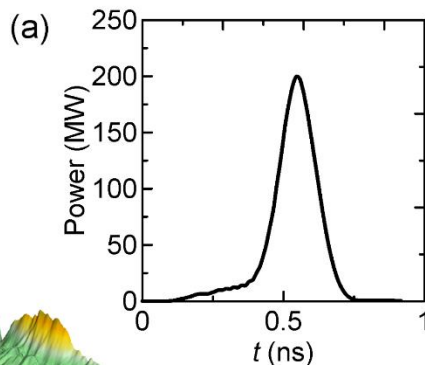
$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 + \xi \cos \theta_0, \quad \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \xi \ll 1, \quad \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{1}{\beta_0} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta \Big|_{Z=0} = \frac{1 - \beta_0}{\beta_0}.$$

SUPERRADIANT EXCITAION OF SURFACE WAVE IN A CYLINDRICAL WAVEGUIDE WITH 1D PERIODICAL CORRUGATION

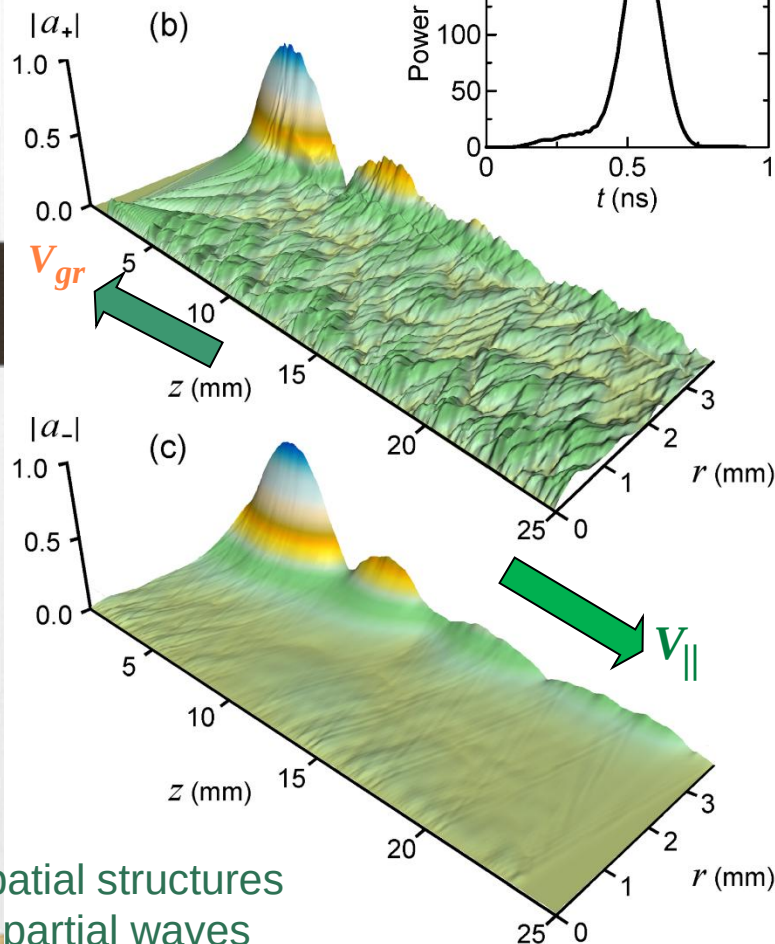
Operating frequency 140 GHz

SR pulse

$$D/\lambda \approx 3.5$$

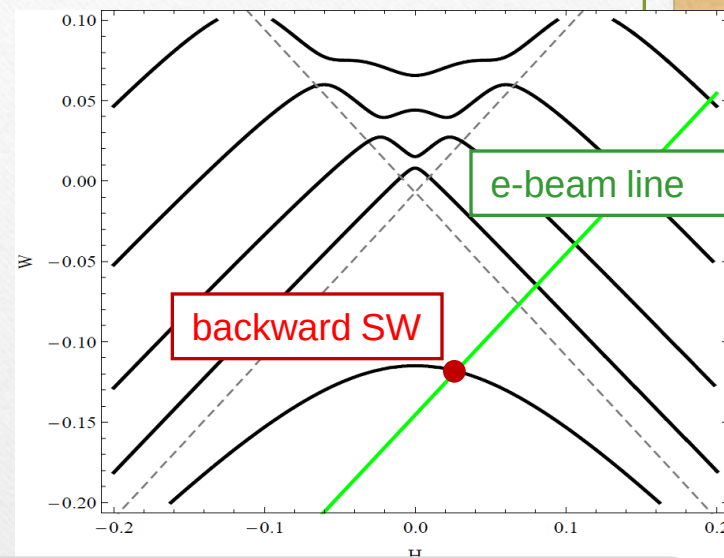


200 MW
200 ps



Spatial structures
of partial waves

Dispersion diagram



RADAN accelerator, IEP RAS

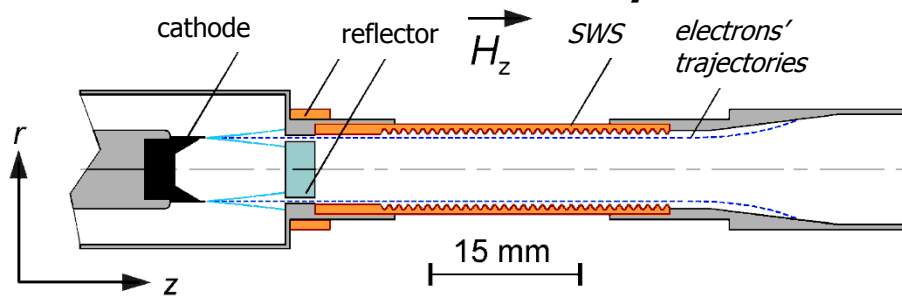
Parameters of simulations

Acceleration voltage	300 kV
Electron current	2 kA
Electron bunch duration	0.5 ns

Mean radius of SWS	3.75 mm
Corrugation period	0.825 mm
Corrugation depth	0.36 mm
Length of corrugations	25 mm

GENERATION OF G-BAND (140 GHz) 70 MW/0.2 ns SR PULSES IN 1D PERIODICAL SURFACE WAVE STRUCTURE

Phys. Rev. Lett. 2013



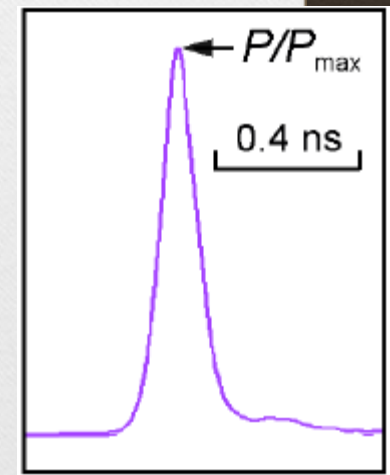
$$D/\lambda \approx 3.5$$

RADAN-303



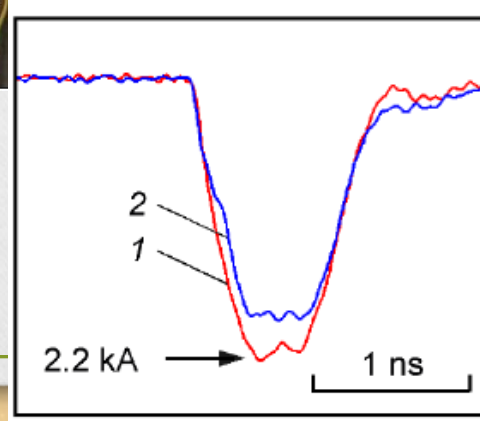
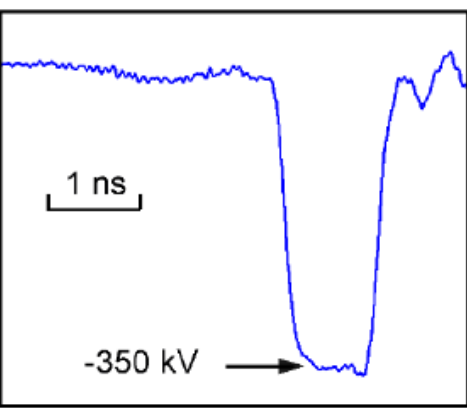
140 GHz
> 70 MW
~180 ps

SR PULSE



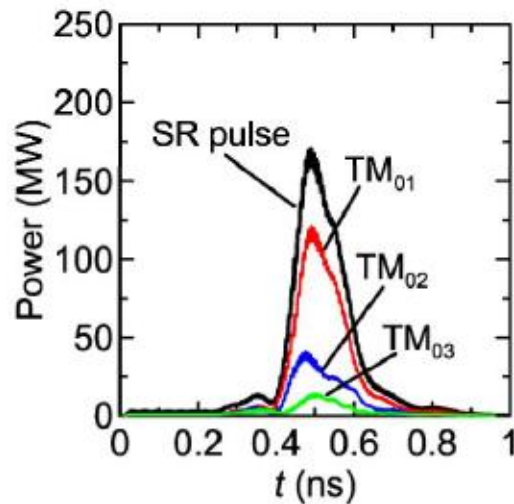
~5 MW in previous experiments

The initial stage of the air breakdown was observed after focusing in a gradually convergent receiving horn



STABILITY OF DIRECTIONAL PATTERN

RESULTS OF PIC SIMULATIONS



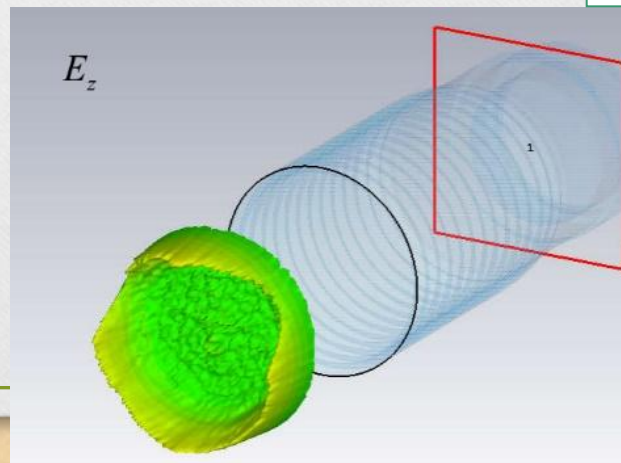
$$D/\lambda \approx 3.5$$

Transverse structure of the radiation field corresponds to an axially symmetric surface wave, which can be represented as a combination of several in-phased $TM_{0,n}$ modes of a regular waveguide

LOSS OF AZIMUTH SPATIAL COHERENCE

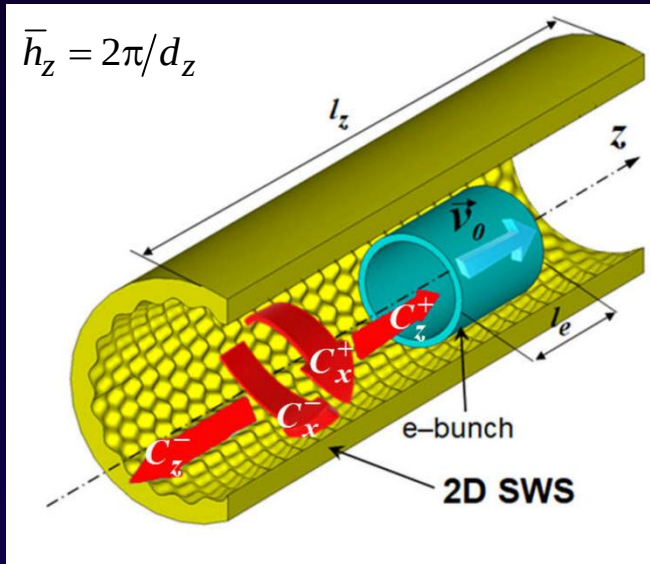
$$D/\lambda > 3.5$$

Depending on initial conditions, varying mixture of symmetric and non-symmetric waveguide modes arises in the directional pattern of the output radiation.



USING CYLINDRICAL SWS WITH 2D PERIODICAL CORRUGATION FOR RADIATION PATTERN STABILIZATION

Appl. Phys. Lett. 2012



$$r = \frac{\tilde{r}}{4} \left[\cos(\bar{M}\varphi - \bar{h}_z z) + \cos(\bar{M}\varphi + \bar{h}_z z) \right]$$

2D corrugation is superposition of two helical corrugations with opposite rotations.

$\bar{M}$ is the number of variations over the azimuth coordinate

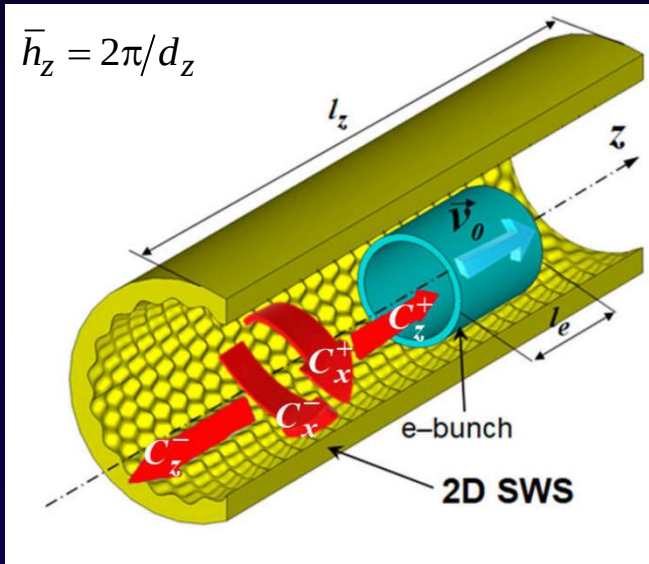
Four QO wave-beams:

$$\vec{H} = \text{Re} \left[\vec{x}_0 \left(C_z^+(x, y, z, t) e^{-i\bar{h}z} + C_z^-(x, y, z, t) e^{i\bar{h}z} \right) e^{i\bar{\omega}t} + \right. \\ \left. + \vec{z}_0 \left(C_x^+(x, y, z, t) e^{-i\bar{h}x} + C_x^-(x, y, z, t) e^{i\bar{h}x} \right) e^{i\bar{\omega}t} \right]$$

Azimuthally propagating fluxes synchronize radiation from different azimuthal segments of a large-diameter tubular electron beam.

USING CYLINDRICAL SWS WITH 2D PERIODICAL CORRUGATION FOR RADIATION PATTERN STABILIZATION

Tech. Phys. Lett. 2014



Motion equations

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_0^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \text{Re} \left[\frac{\partial \hat{C}_z^+}{\partial Y} e^{i\theta} \right]$$

$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 + \xi \cos \theta_0, \quad \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{1}{\beta_0} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta \Big|_{Z=0} = \Delta,$$

$$J(Z, X, Y, \tau) = \pi^{-1} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$$

High-frequency current

Quasi-planar model

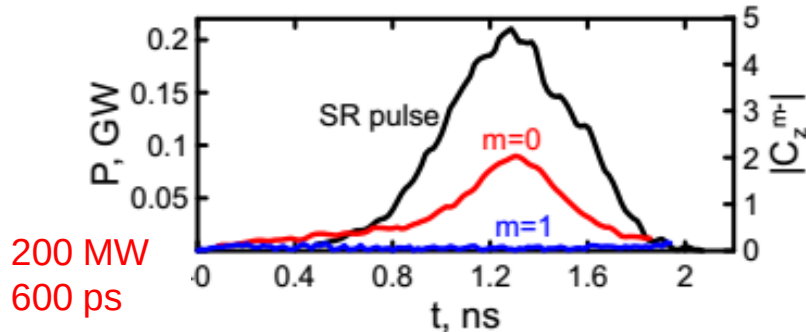
$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{C}_z^+}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{C}_z^+}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_z^+}{\partial Y^2} &= i\alpha(\hat{C}_x^+ + \hat{C}_x^-)\delta(Y) - \frac{\chi(Z - \beta_0\tau)}{B_e} \frac{\partial}{\partial Y} (JF(Y)), \\ -\frac{\partial \hat{C}_z^-}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{C}_z^-}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_z^-}{\partial Y^2} &= i\alpha(\hat{C}_x^+ + \hat{C}_x^-)\delta(Y), \\ \pm \frac{\partial \hat{C}_x^\pm}{\partial X} + \frac{\partial \hat{C}_x^\pm}{\partial \tau} + i \frac{\partial^2 \hat{C}_x^\pm}{\partial Y^2} &= i\alpha(\hat{C}_z^+ + \hat{C}_z^-)\delta(Y). \end{aligned}$$

RESULTS OF SIMULATIONS. FORMATION OF SR PULSES IN W-BAND (90 GHz).

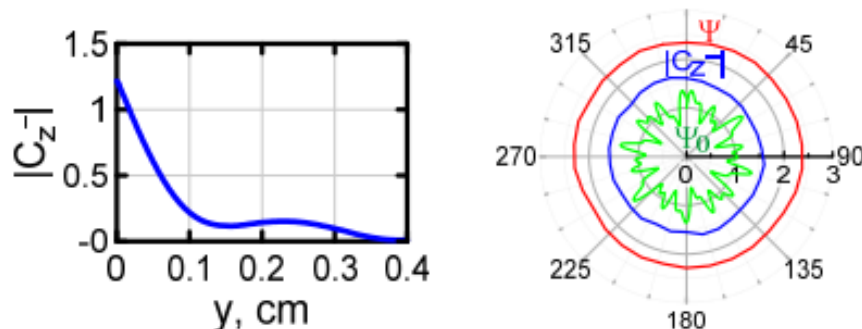
Appl. Phys. Lett. 2020

$$D/\lambda \approx 6$$

SR pulse and its expansion over azimuth modes



Structure of generated surface wave



RADAN accelerator

Parameters of electron bunch

Acceleration voltage	350 kV
Electron current	3.2 kA
Electron bunch duration	1 ns

Parameters of corrugation

Mean diameter	18 mm
Corrugation periods	2.7 mm
Corrugation amplitude	1.1 mm

Initial phase distribution is random.

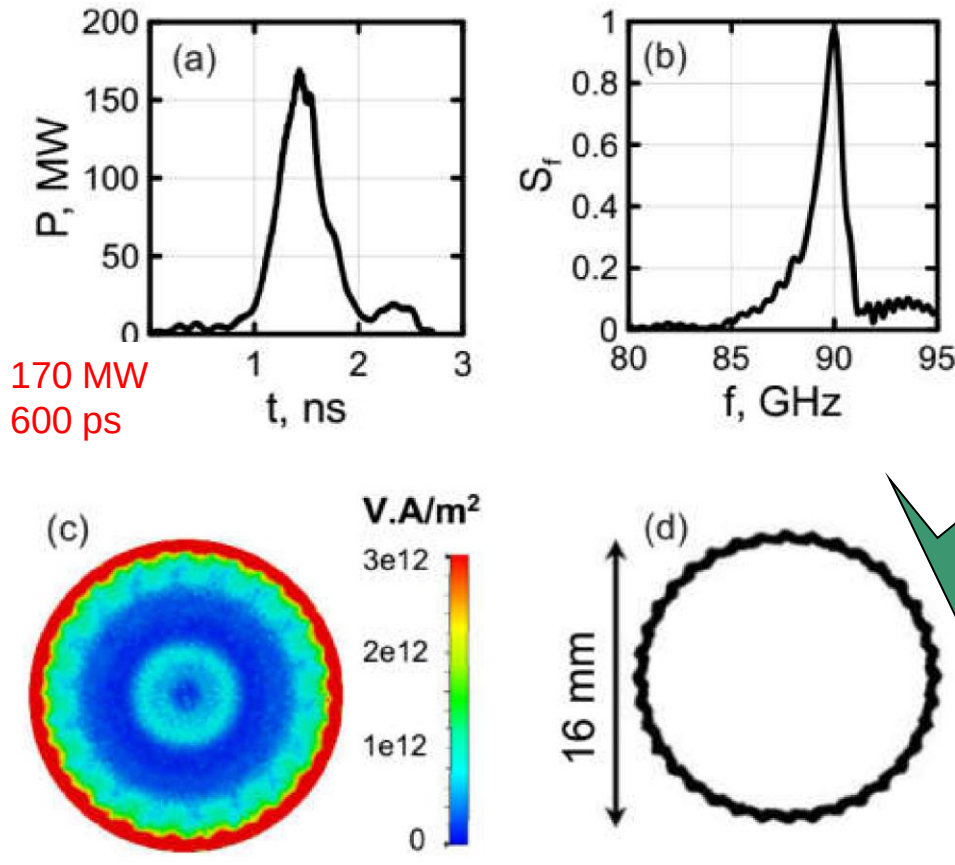
Azimuth wave fluxes synchronize radiation from large-size electron bunch. This provides the output amplitude and the phase distributions close to an azimuthally symmetric mode with m=0

RESULTS OF PIC SIMULATIONS WITH EXPERIMENTAL PARAMETERS

Appl. Phys. Lett. 2020

$$D/\lambda \approx 6$$

Corrugation folds = 18
Number of periods = 36



The guided magnetic field is of 3T

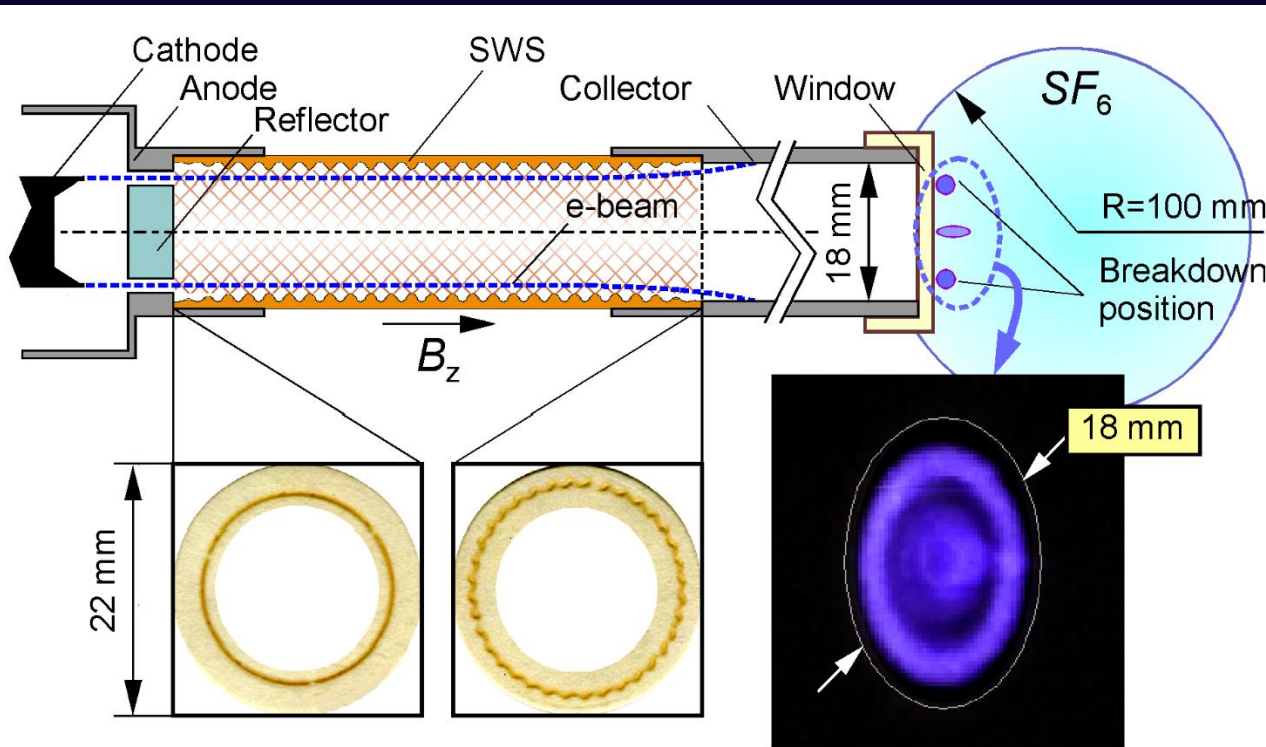
RADAN accelerator

Periodical modulation of the transverse bunch profile after passing through 2D SWS is related to formation of a standing wave by two counter-propagating azimuthal energy fluxes

GENERATION OF SPATIALLY COHERENT SR PULSES IN 2D PERIODICAL SURFACE-WAVE STRUCTURE

Appl. Phys. Lett. 2020

Experimental set-up



SWS input

SWS output

Beam reprints on polymeric films
installed at the SWS input and output

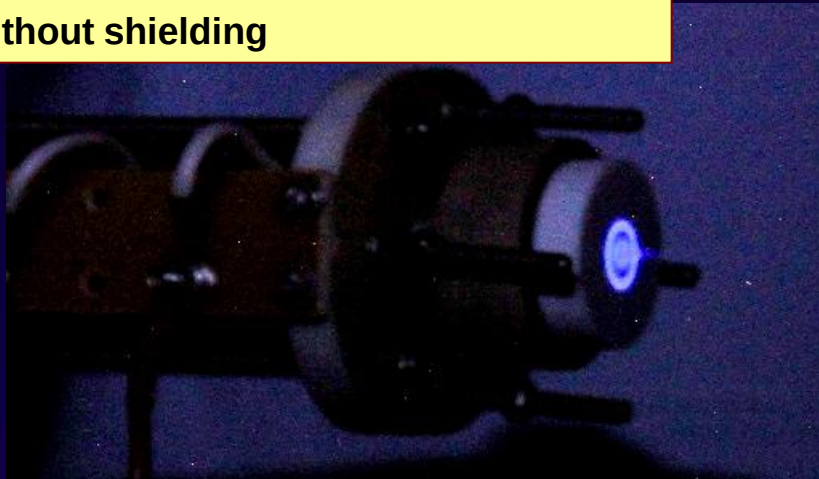
SWS with 18 variations
over the azimuth
coordinate

$$D/\lambda \approx 6$$

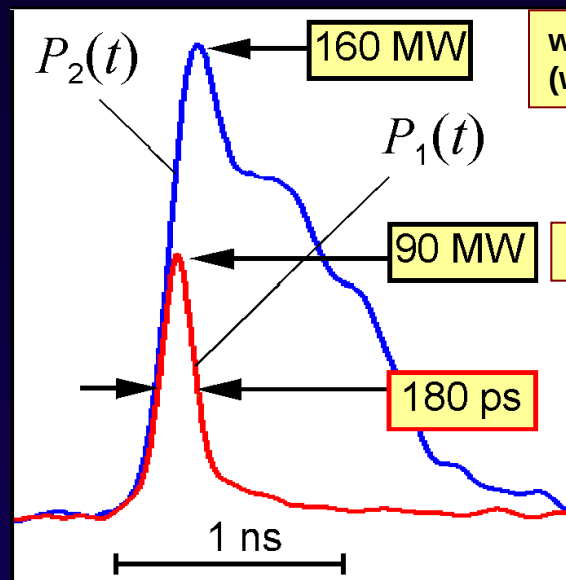
90 GHz
W-band

GENERATION OF SPATIALLY COHERENT SR PULSES IN 2D PERIODICAL SURFACE-WAVE STRUCTURE

RF breakdown of the vacuum window
without shielding



Appl. Phys. Lett. 2020

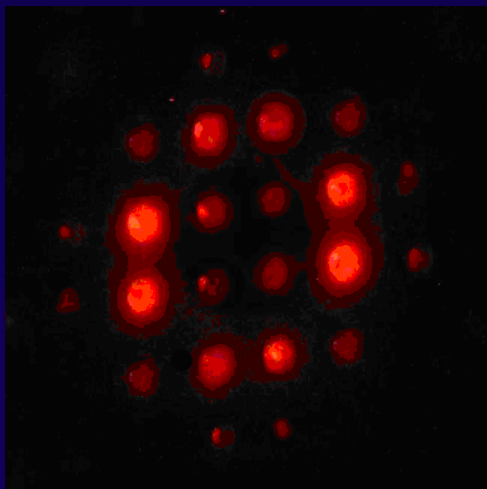


without breakdown
(window shielding, SF6)

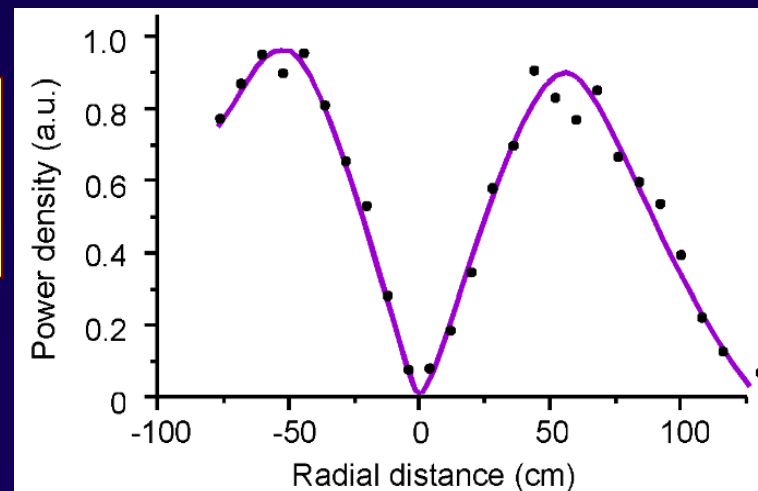
with breakdown

90 GHz
~ 160 MW
~ 600 ps

Glow of the gas-discharge matrix
panel located in the far-field zone



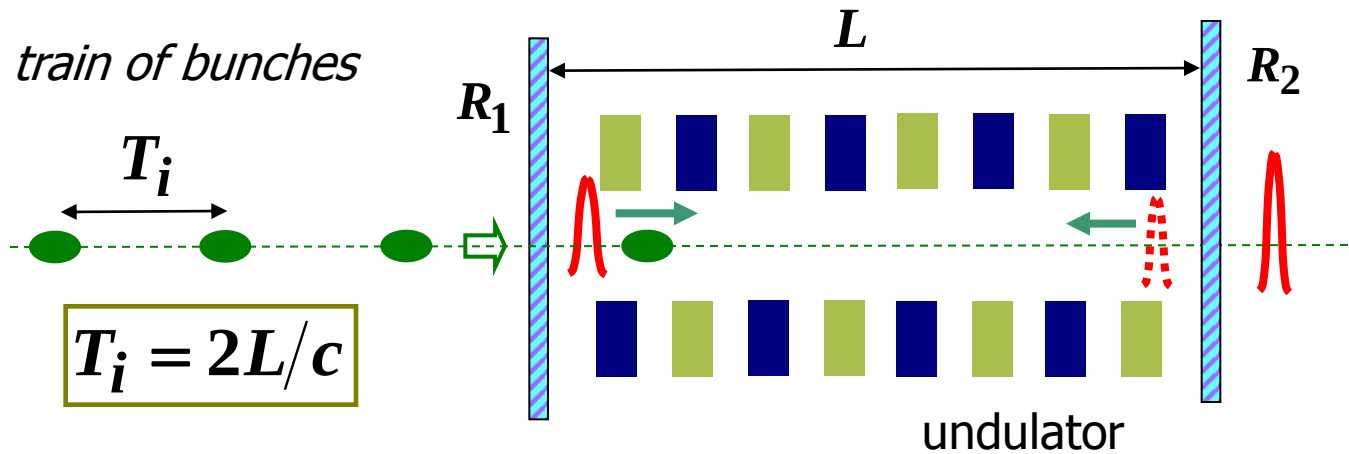
Radiation pattern
corresponds to excitation
of azimuthally symmetrical
surface wave



Продвижение источников СИ в коротковолновые диапазоны

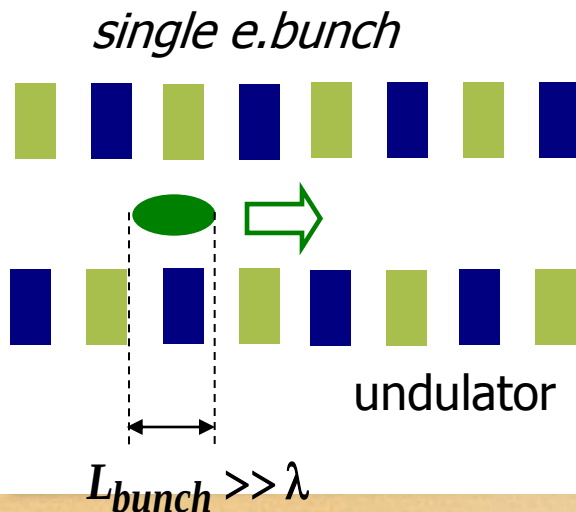
1. Генерация импульсов СИ в сверхразмерных замедляющих системах с возбуждением поверхностных волн. Квазиоптическая теория и результаты экспериментов.
2. Генерация мультимегаваттных импульсов ТГц диапазона на основе ондуляторного СИ электронных сгустков, формируемых фотоинжектором.
3. Циклотронное СИ в режиме группового синхронизма.

Pulse repetition rate regime of FEL



$$\lambda_s \approx \frac{d}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

Superradiance of extended electron bunch in undulator



Radiation of extended bunch in the absence of external resonator

Superradiance is single pulse radiation

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

SASE (random sequence of spikes)

$$L_{\text{bunch}} > L_{\text{cooperative}}$$

Pulse repetition rate regime

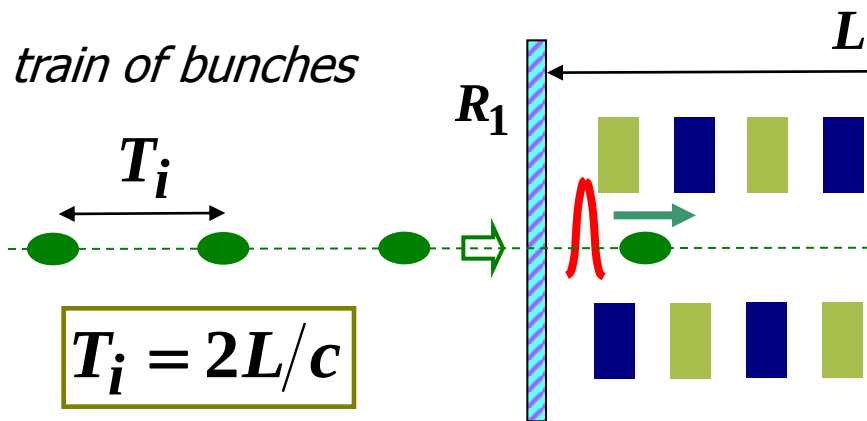
THz FEL Novosibirsk

Beam energy, MeV	12
Maximum average electron current, mA	30
RF frequency, MHz	180.4
Bunch repetition rate, MHz	22.5
Bunch length, ps	100
Normalized emittance, mm·mrad	30
Charge per bunch, nC	1.5
RF cavities Q factor	$4 \cdot 10^4$

Pulse power 1 MW

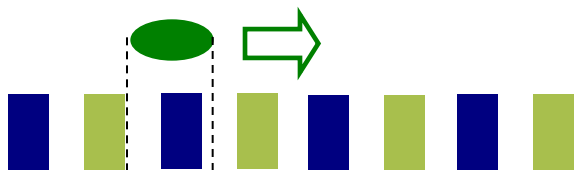
Average power 500 W

train of bunches



Superradiance of extended electron bunch in undulator

single e.bunch



undulator

$$L_{\text{bunch}} \gg \lambda$$

Radiation of extended bunch in the absence of external resonator

Superradiance is single pulse radiation

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

SASE (random sequence of spikes)

$$L_{\text{bunch}} > L_{\text{cooperative}}$$

Averaged model based on the pondermotive force

N.S.Ginzburg, A.S.Sergeev ЖЭТФ 1991

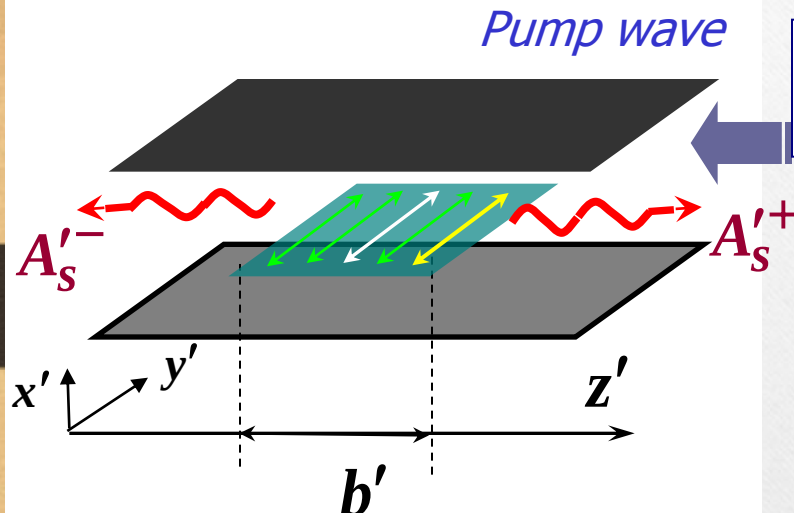
Laboratory reference frame

Undulator field

$$\vec{H} = \vec{y}_0 \operatorname{Re}[H_u \exp(ih_u z) \operatorname{ch}(h_u y)]$$

Comoving reference frame

$$\vec{A}'_u = \vec{y}_0 \operatorname{Re} \left[\frac{H_u}{ih_u} e^{i\omega'_u t' + ih'_u z'} \operatorname{ch}(h_u y) \right]$$



$$\vec{A}'_s(z', t') = \vec{y}_0 \operatorname{Re} [\tilde{A}'_s \exp(i\omega' t') \operatorname{ch}(h_u y)]$$

-TE₁ mode of planar waveguide

$$\tilde{A}'_s(z') = -\frac{4\pi\sigma}{k'} \frac{\varepsilon}{b} \frac{eH_u}{h_u mc^2} e^{i(h'z'(z'_0 - ik'|z' - z'(z'_0)))}$$

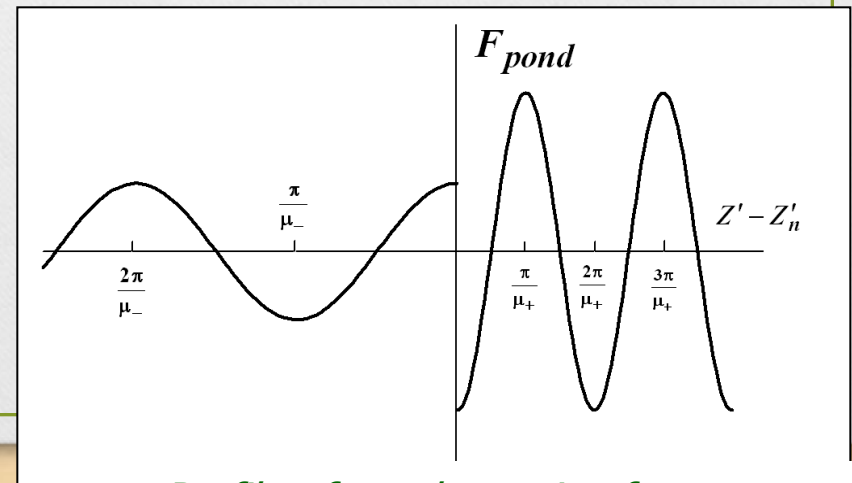
Electron bunch is presented as a gas of macroelectrons interacting via pondermotive force

$$F_{pond}(z') = \pi e \sigma \alpha_u^2 f[k'(z' - z'(z'_0))],$$

$$f_{pond}(X) = \mu_+ \cos(\mu_+ \zeta), \quad \zeta > 0$$

$$f_{pond}(X) = \mu_- \cos(\mu_- \zeta), \quad \zeta < 0$$

$$\mu_{\pm} = (h' \pm k)/k$$



Profile of pondermotive force

Averaged model based on the pondermotive force

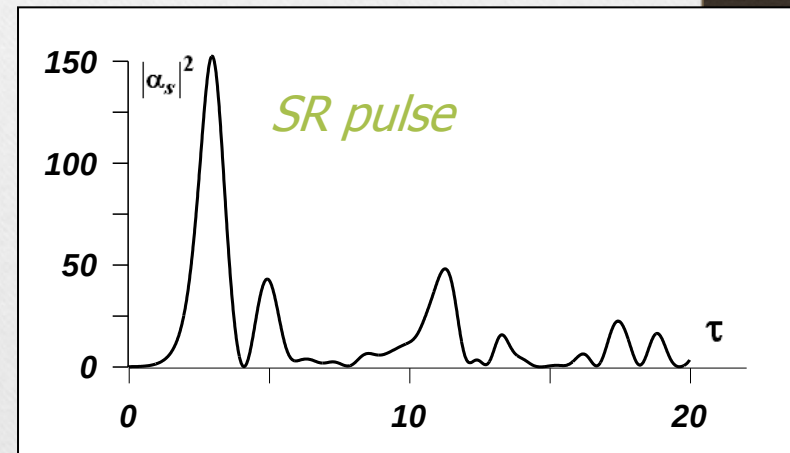
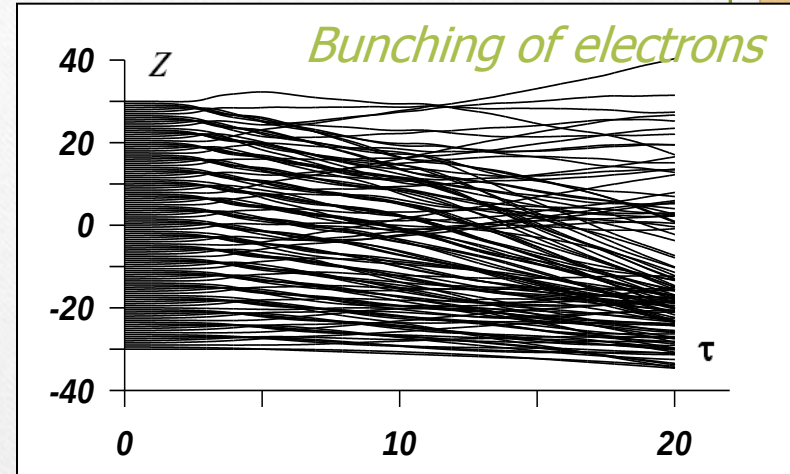
N.S.Ginzburg, A.S.Sergeev ЖЭТФ 1991

Basic equations

$$\frac{dZ(Z_0)}{d\tau} = p(Z_0)$$
$$\frac{dp(Z_0)}{d\tau} = \frac{\omega_p'^2}{\omega'^2 \chi(Z_0)} \frac{2\varepsilon}{b} \alpha_u^2 \int \chi(Z_0) f(Z(Z_0 - Z(\tilde{Z}_0))) d\tilde{Z}_0$$
$$\alpha_s^\pm = \frac{i\omega_p'^2}{\omega'^2} \frac{\varepsilon}{b} \alpha_u e^{\mp iZ^*} \int_0^{Z^*} \chi(\tilde{Z}_0) e^{\mp 2i\mu_\pm \tilde{Z}_0} d\tilde{Z}_0$$

$$p_n(\tau=0) = 0$$

$$Z_n(\tau=0) = Bn / N$$



РІС моделирование коротковолнового СИ с переходом в сопровождающую систему отсчета

Parameters of electron bunch generating by photoinjector

Energy	$\sim 4\text{-}7\text{ MeV}$
Duration	$\sim 10\text{ ps}$
Charge	$\sim 1\text{ nC}$

Н.Гинзбург, И.Зотова, А.Голованов
Письма в ЖТФ 2012
ЖЭТФ 2014

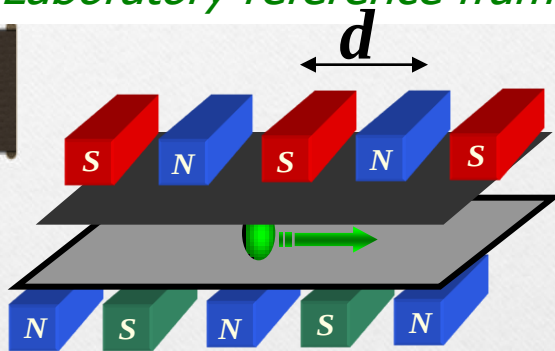
$$\gamma \approx 10$$

$$\lambda_s \approx d / 2\gamma^2$$

$$d = 4\text{ cm}$$

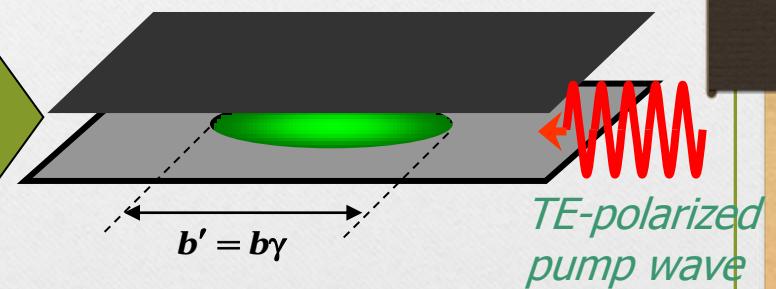
$$\lambda_s = 0.02\text{ cm}$$

Laboratory reference frame



Lorentz transformations

Comoving reference frame



Undulator length	1 m
Undulator period	4 cm
Electron bunch length	4 mm
Radiation wavelength	0.2 mm

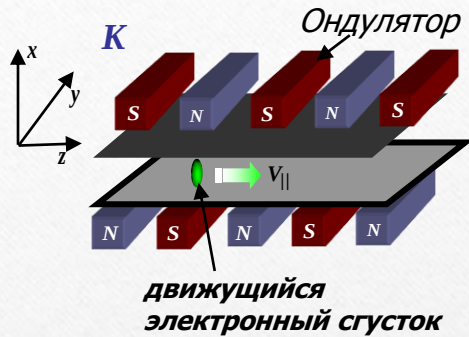
$$h'_u = \gamma h_u$$

$$b' = \gamma b$$

Pump duration	300 ps (10 cm)
Pump wavelength	4 mm
Electron bunch length	4 cm
Radiation wavelength	4 mm

РІС моделирование коротковолнового СИ с переходом в сопровождающую систему отсчета

В лабораторной системе отсчета



Н.Гинзбург, И.Зотова, А.Голованов
Письма в ЖТФ 2012
ЖЭТФ 2014

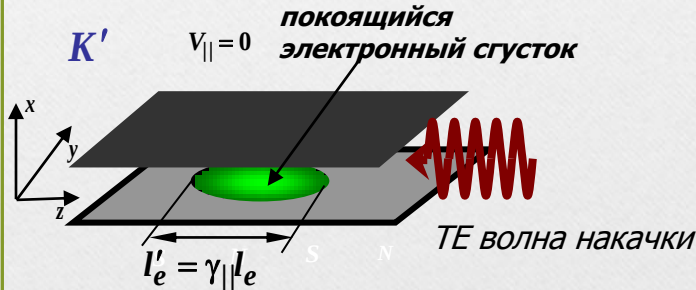
$$\alpha = \frac{H_u d}{10.7} \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

d - период ондулятора

Поле ондулятора в лабораторной системе отсчета

$$H_x = H_0 \cdot \operatorname{ch} \left[h_u \left(x - \frac{a}{2} \right) \right] \cdot \sin(h_u z) f(z) \quad H_z = H_0 \cdot \operatorname{sh} \left[h_u \left(x - \frac{a}{2} \right) \right] \cdot \cos(h_u z) f(z)$$

В сопровождающей системе отсчета



$$H'_x = \gamma_0 H_0 \cdot \operatorname{ch} \left[h_u \left(x - \frac{a}{2} \right) \right] \cdot \sin(\omega'_u t' + h'_u z') \cdot f(t' + z'/V_0)$$

$$H'_z = H_0 \cdot \operatorname{sh} \left[h_u \left(x - \frac{a}{2} \right) \right] \cdot \cos(\omega'_u t' + h'_u z') \cdot f(t' + z'/V_0)$$

$$E'_y = \beta_0 \gamma_0 H_0 \cdot \operatorname{ch} \left[h_u \left(x - \frac{a}{2} \right) \right] \cdot \sin(\omega'_u t' + h'_u z') \cdot f(t' + z'/V_0)$$

$$F'_L = -e(\vec{E}' + [\vec{V}'/c, \vec{H}'])$$

- вынуждающая сила

$$\omega'_u = \gamma_0 h_u V_0$$

$$h'_u = \gamma_0 h_u$$

РІС моделирование коротковолнового СИ с переходом в сопровождающую систему отсчета

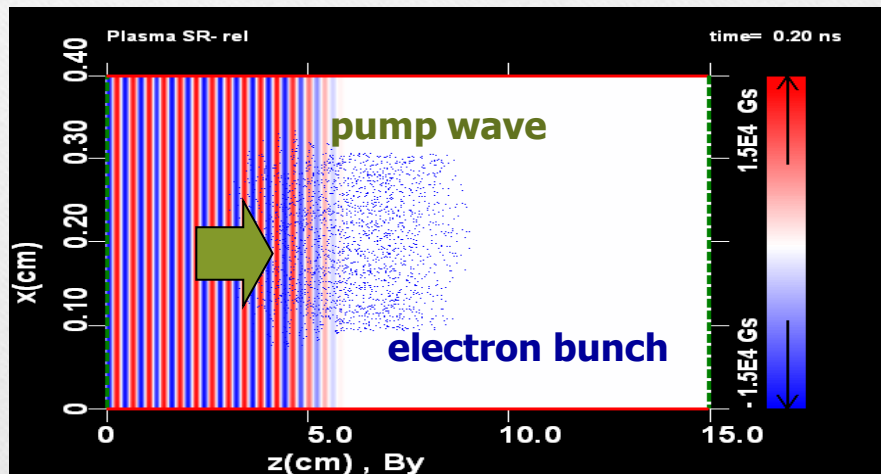
Код KARAT

Н.Гинзбург, И.Зотова, А.Голованов
Письма в ЖТФ 2012
ЖЭТФ 2014

Параметры моделирования в лабораторной системе К

Период ондулятора 4 см
Магнитное поле 2.4 кЭ
Поперечный размер
волновода 0.7 см

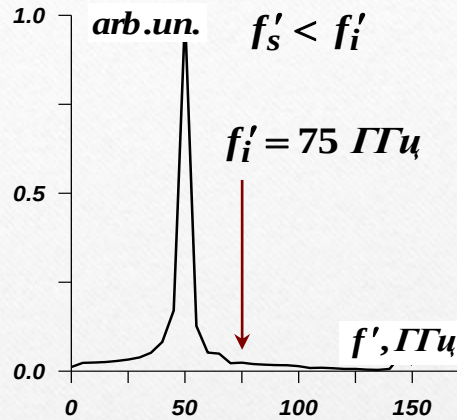
Энергия электронов 4.5 МэВ
Заряд сгустка 1.2 нКл
Длительность
сгустка 15 пс
Поперечный размер 0.2 см



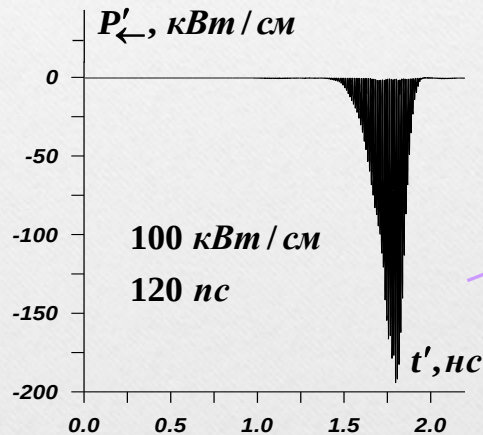
В сопровождающей
системе К' волна накачки
набегает на покоящийся
электронный сгусток

РІС моделирование коротковолнового СИ с переходом в сопровождающую систему отсчета

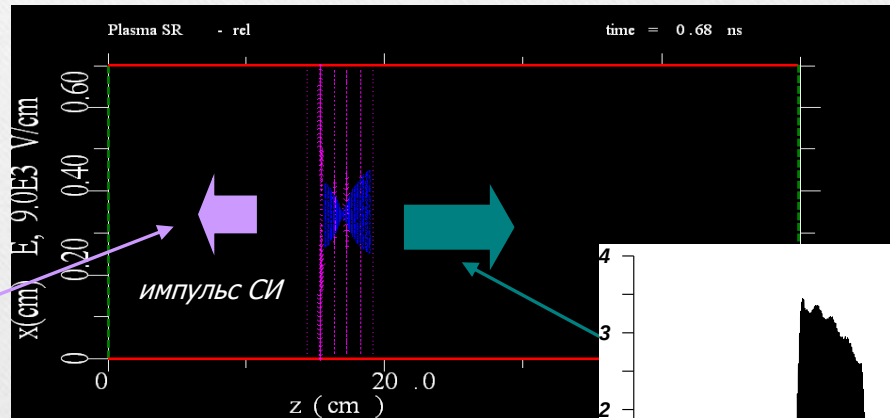
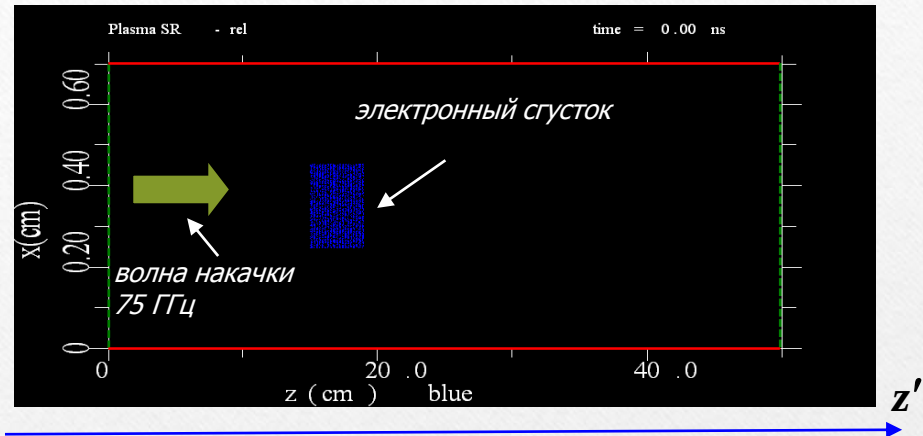
Код KARAT



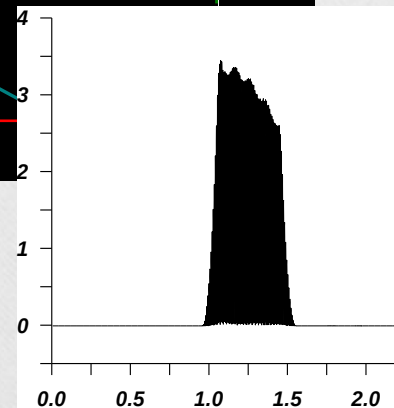
$$(h'_u + h'_s)l'_e \gg 2\pi$$



Импульс СИ и его спектр



Импульс, излученный в $+z'$ направлении. В лабораторной системе отсчета соответствует НЧ компоненте
 $(h'_u - h'_s)l'_e \ll 2\pi$



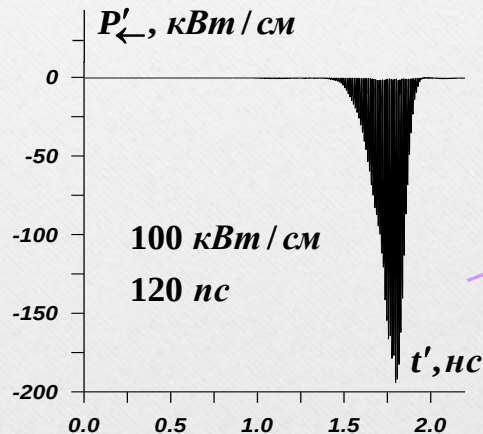
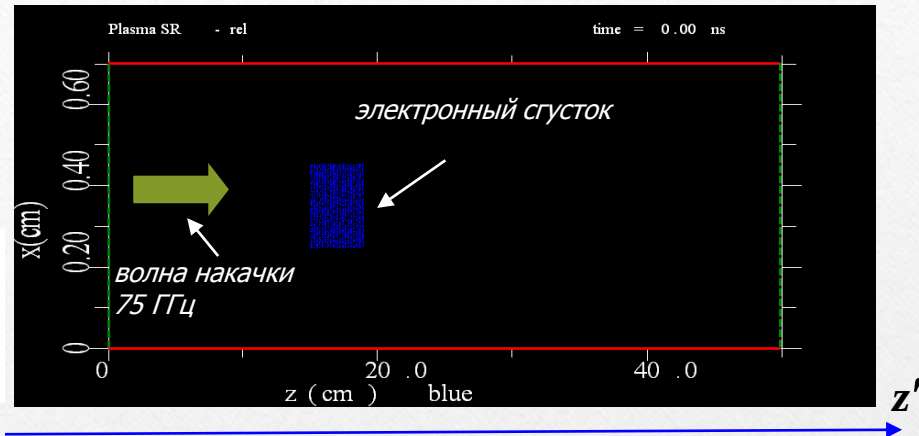
РІС моделирование коротковолнового СИ с переходом в сопровождающую систему отсчета

ЖЭТФ 2014

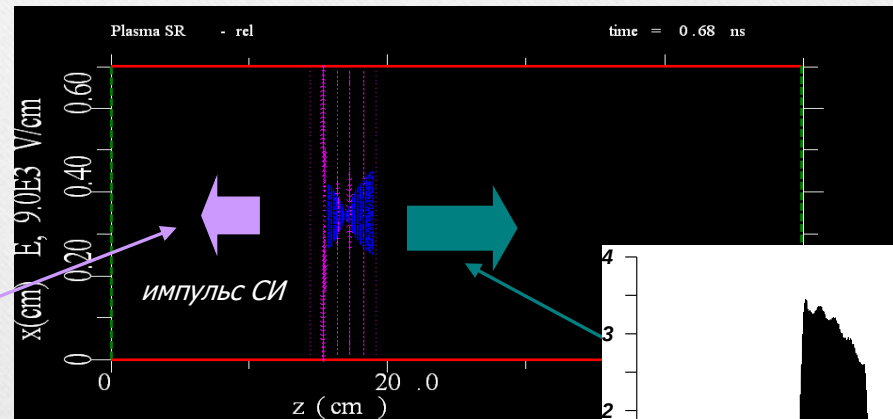
Код KARAT

Параметры импульса СИ в лабораторной системе отсчета

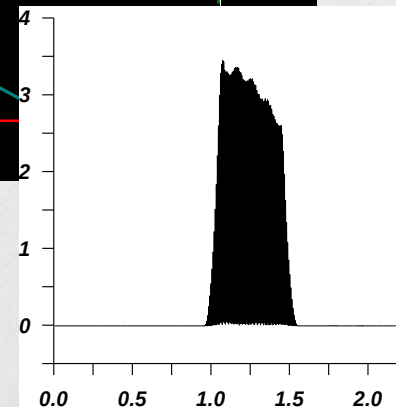
Плотность мощности ~ 30 МВт/см
Длительность ~ 15 пс
Частота ~ 1 ТГц



Импульс СИ и его спектр

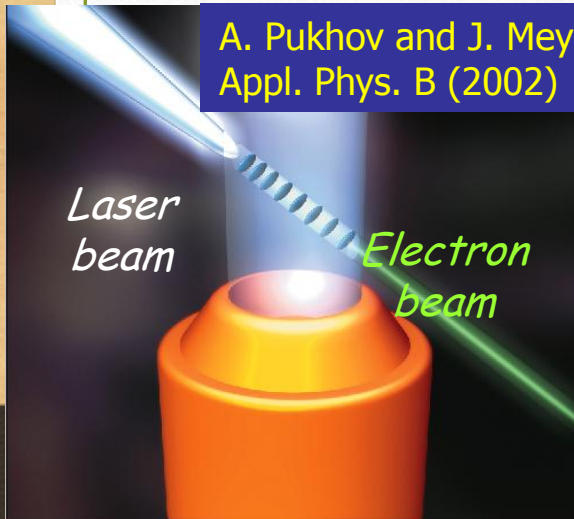


Импульс, излученный в $+z'$ направлении. В лабораторной системе отсчета соответствует НЧ компоненте $(h'_u - h'_s)l'_e \ll 2\pi$



Possibility of generation of light pulses based of SR from High-energy electron bunches

A. Pukhov and J. Meyer-ter-Vehn
Appl. Phys. B (2002)



*Laser wake-field acceleration at PEARL facility
(Institute of Applied Physics RAS)*

$eU = 100 \text{ MeV} \quad \gamma \approx 200$

Nucl. Instr. and Meth. A (2011)

103 MeV

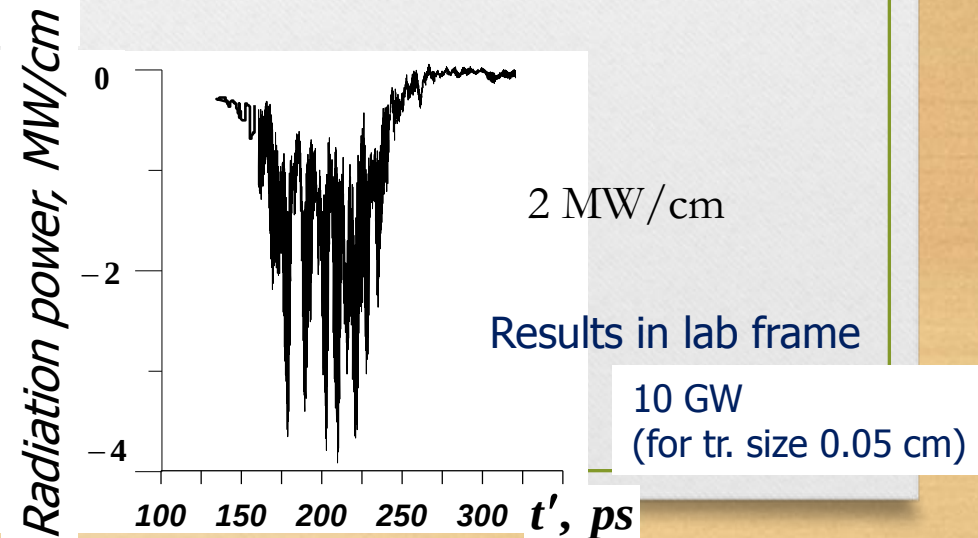
$N_e = 4.9 \times 10^{18} \text{ 1/cm}^3$

2D PIC simulations of SR in co-moving reference frame

Parameters in lab frame

Undulator length	2 m
Undulator field	2.5 kG
Bunch charge	1 nC
Bunch duration	50 fs
Gap between plates	1 mm

Results in co-moving frame



Продвижение источников СИ в коротковолновые диапазоны

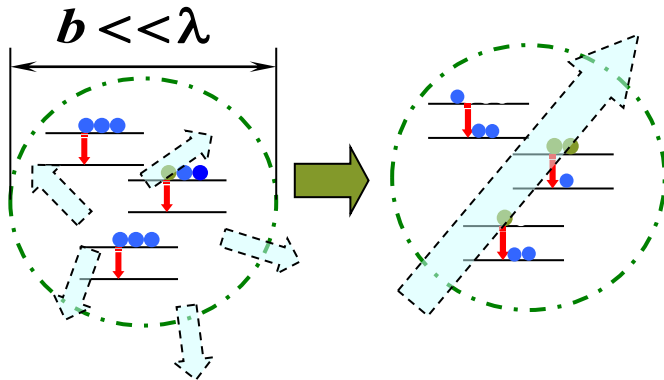
1. Генерация импульсов СИ в сверхразмерных замедляющих системах с возбуждением поверхностных волн. Квазиоптическая теория и результаты экспериментов.
2. Генерация мультимегаваттных импульсов ТГц диапазона на основе ондуляторного СИ электронных сгустков, формируемых фотоинжектором.
3. Циклотронное СИ в режиме группового синхронизма.

Сверхизлучение в квантовых системах

Модель «крупинки»

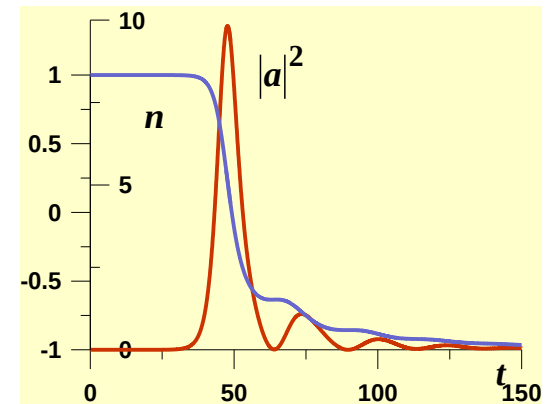
Dicke R.H., Phys.Rev. 1954

- Начальная макрополяризация на уровне шумов
- Внешние поля отсутствуют



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

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

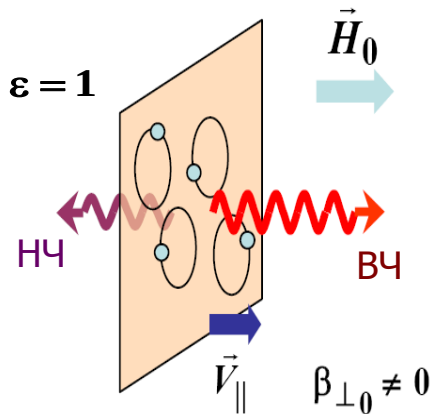


Классический аналог - циклотронное сверхизлучение

Циклотронное СИ движущегося электронного сгустка в свободном пространстве

Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев (1989)

Нормальный эффект Доплера



$$\frac{P^{\rightarrow}}{P^{\leftarrow}} = \frac{1 + V_{||0}/c}{1 - V_{||0}/c} \approx 4\gamma_{||0}^2$$

$$\omega - hV_{||} = \omega_H$$

$$\frac{\omega^{\rightarrow}}{\omega^{\leftarrow}} \approx 4\gamma_{||0}^2$$

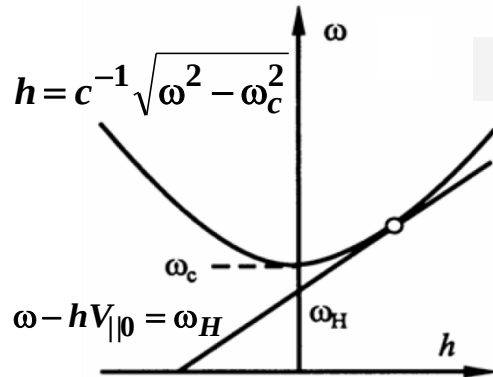
В лабораторной системе отсчета излучение сгустка разночастотное и, в общем случае, разнонаправленное

Циклотронное сверхизлучение электронного сгустка в режиме группового синхронизма с волноводной модой

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

Н.Гинзбург, И.Зотова, А.Сергеев
Письма в ЖЭТФ 1994

В лабораторной системе отсчета (режим касания)



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

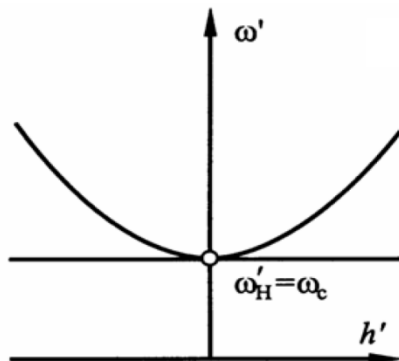
$$\gamma = (1 - \beta_{||0}^2 - \beta_{\perp 0}^2)^{-1/2}$$

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

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

*В сопровождающей системе отсчета
(излучение неподвижного электронного сгустка на квазикритической частоте)*

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



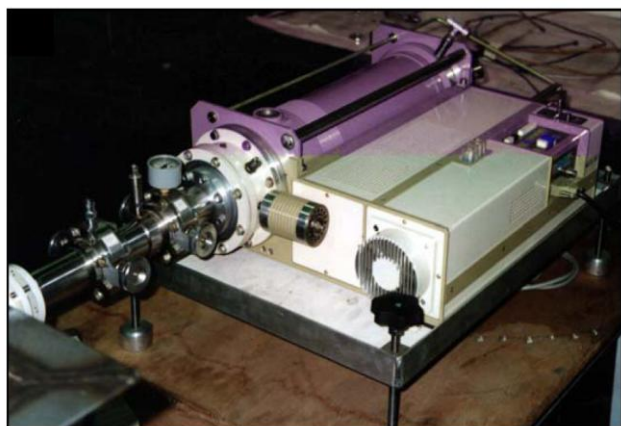
Преимущества режима группового синхронизма

- снижение чувствительности к продольной динамике электронного сгустка, вызванной кулоновским расталкиванием
- увеличение инкремента развития СИ неустойчивости вследствие малой скорости выноса энергии из электронного сгустка

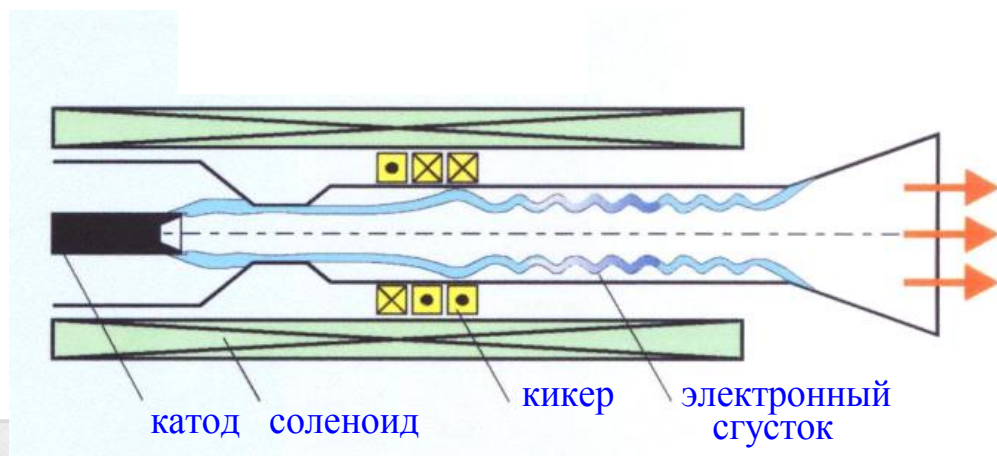
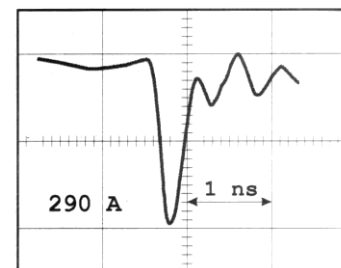
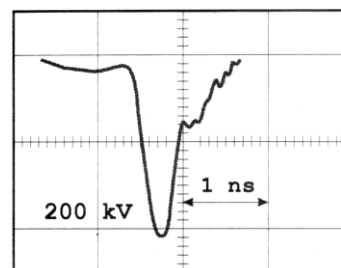
Экспериментальное наблюдение циклотронного СИ в мм диапазоне

Phys.Rev.Lett. 1997

Сильноточный ускоритель
РАДАН (ИЭФ УрО РАН)



Импульсы напряжения и тока



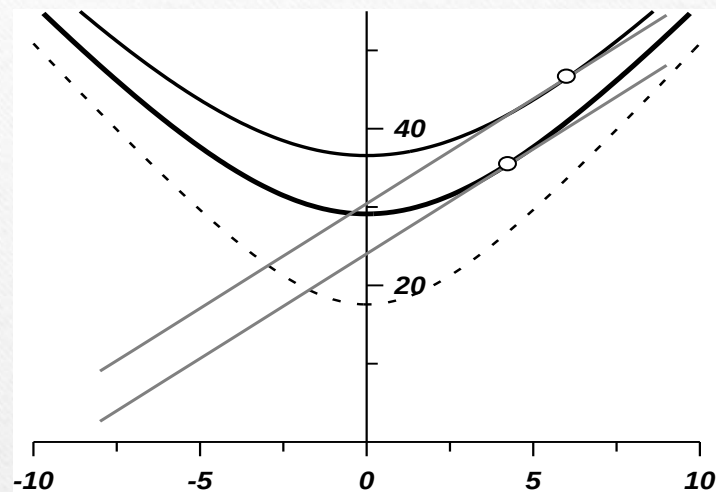
Параметры эксперимента

Напряженность ведущего магнитного поля	11-16 кЭ	Ток пучка	250 А
Рабочая мода	TE_{21} (TE_{01})	Энергия электронов	200 кэВ
Радиус волновода	0.5 см	Длительность электронного импульса	400 пс
		Питч-фактор	~ 1

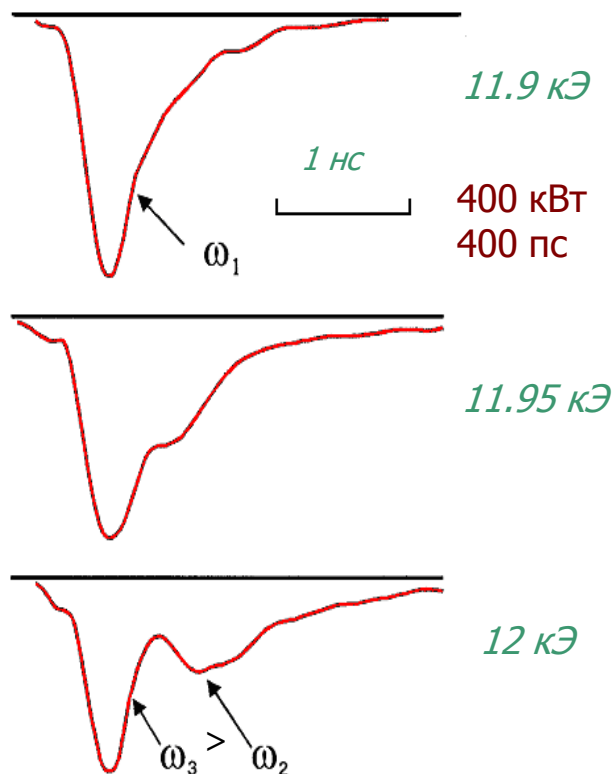
Экспериментальное наблюдение циклотронного СИ в мм диапазоне

Phys.Rev.Lett. 1997

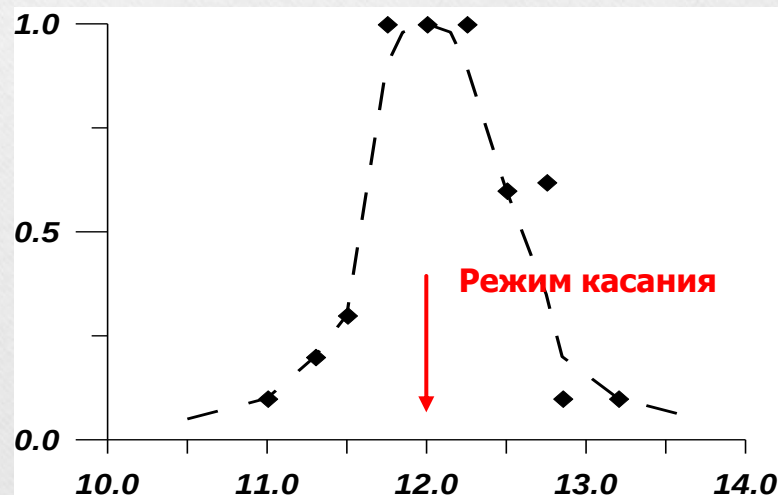
Дисперсионная диаграмма



Импульсы СИ вблизи режима касания

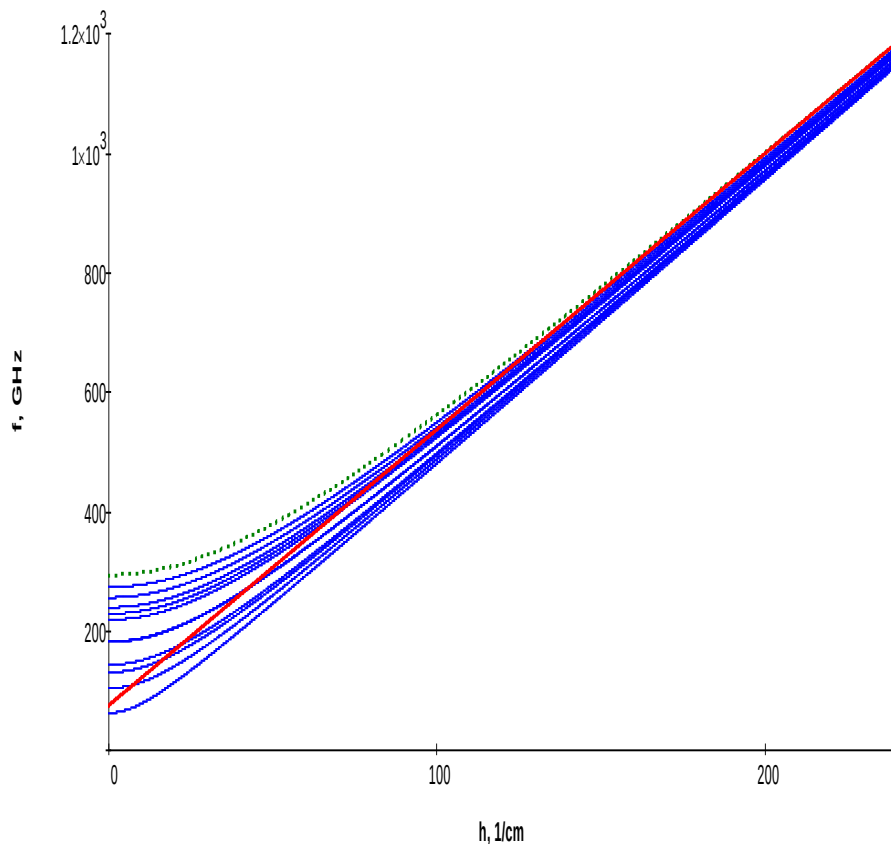


Падение пиковой мощности импульсов СИ при отстройке от режима касания



РІС моделирование циклотронного СИ в ТГц диапазоне

Дисперсионные характеристики рабочей моды TE₁₃ (пунктир), низших ТЕ мод (сплошные линии) и пучка (красная линия)

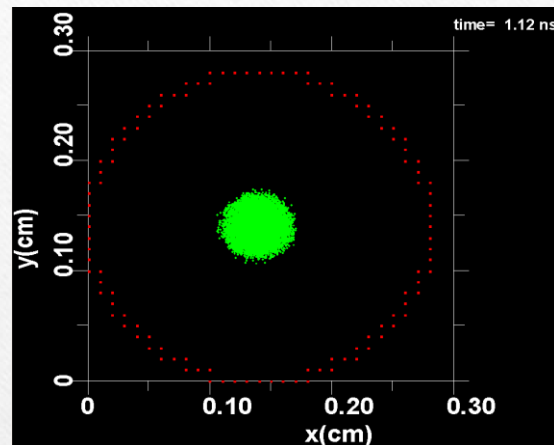
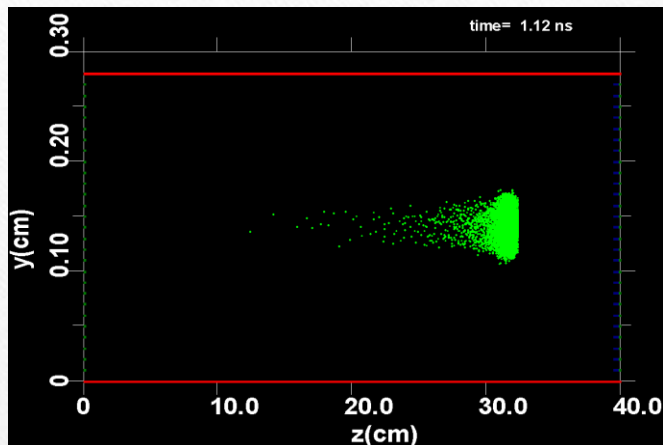


Параметры моделирования

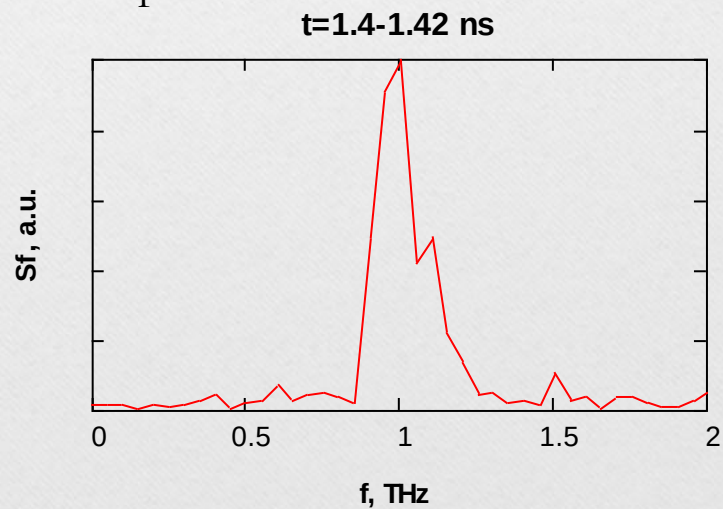
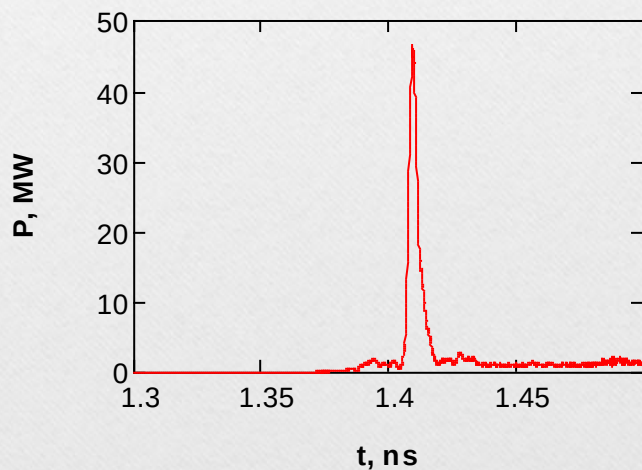
Энергия электронов	2 МэВ
Ток	200 А
Длительность	10+30+ 10 ps
Питч-фактор	0.15
Разброс по поперечным скоростям	15%
Радиус волновода	1.4 mm
Длина пространства взаимодействия	34 cm
Рабочая мода	TE ₁₃
Магнитное поле	10.7 Т

PIC моделирование циклотронного СИ в ТГц диапазоне

Геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц

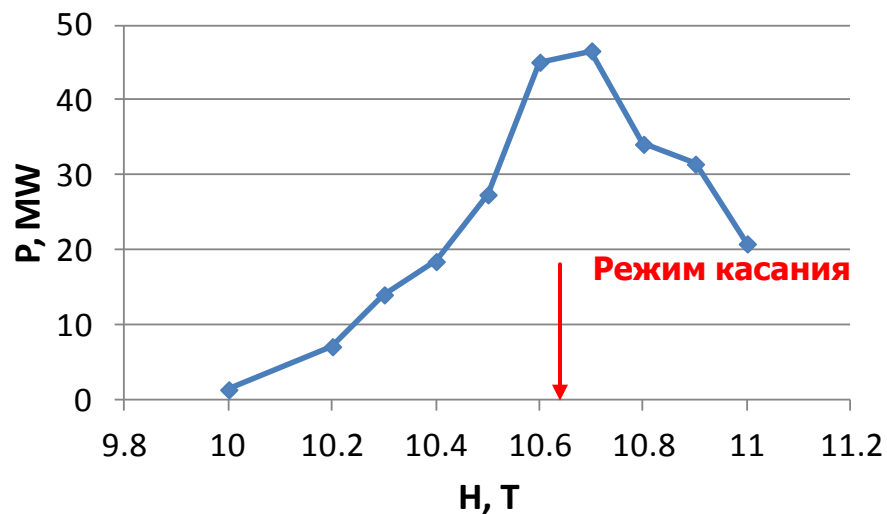
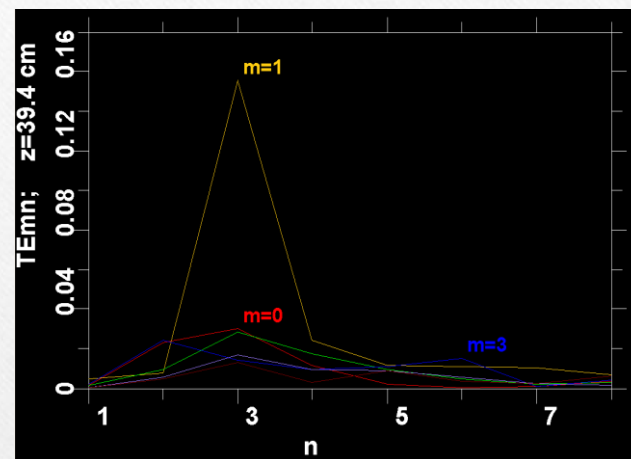
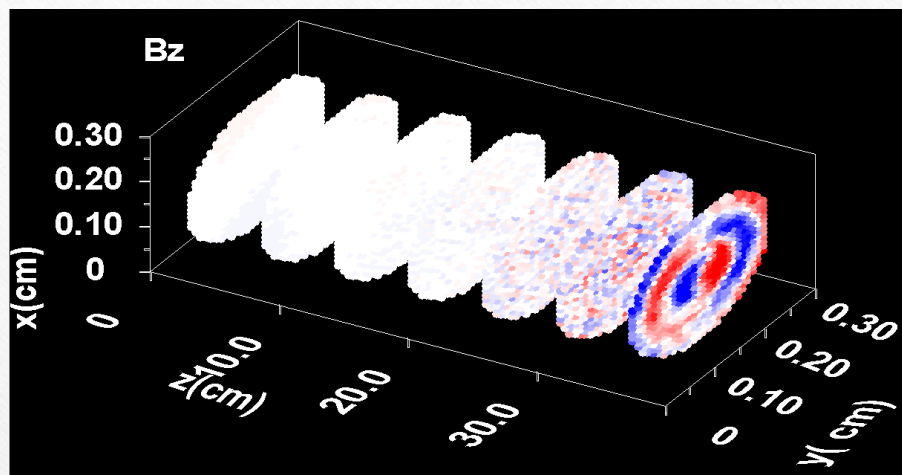


Импульс СИ и его спектр



РІС моделирование циклотронного СИ в ТГц диапазоне

Поперечная структура излучения, соответствующая селективному возбуждению рабочей моды



Зависимость пиковой мощности импульса СИ от магнитного поля

Спасибо за внимание!