

ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННАЯ ПЛАЗМА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЯХ

А.В.Ким

**Институт прикладной физики РАН
Нижний Новгород, Россия**

XVII Научная школа <<НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2016>>, 2 марта 2016

Содержание

- Введение. Мотивы исследований. Мега-проекты по лазерам экстремальной мощности
 - Релятивистски сильные поля
 - Ультрарелятивистские поля
 - Экстремально сильные поля
- Динамика электрона с учетом силы реакции излучения
- Нелинейная электродинамика плазмы в экстремально сильных полях
 - Основные уравнения. Квазистационарная модель
 - Точные выражения для сил, действующих на единицу объема
 - Нелинейная диэлектрическая проницаемость
 - Плазменно-полевые структуры в падающих плоских волнах
- Пробой вакуума в лазерных полях и электрон-позитронная лавина
 - Максимизация поля при заданной мощности и возможные структуры поля
 - Электромагнитный каскад в сходящейся волне дипольной конфигурации
 - Фабрика гамма квантов ГэВ-ных энергий
- Нелинейная электродинамика электрон-позитронной плазмы
 - e - p лавина как ионизационная нелинейность в электромагнитных полях. Аналогия с неравновесными разрядами (СВЧ и лазерными) в волновых полях
 - Самосогласованный слой e - p плазмы в падающих плоских волнах
 - Структуры поля и плазмы в сходящейся волне дипольной конфигурации
- Заключение и перспективы

Признательность

**Башинову А. В., Гоноскову А. А., Ефименко Е. С., Муравьеву А. А.
Сергееву А. М. , Mourou G.**

Доклады на семинарах школы:

Муравьев А.А. и др., Семинары 2 (29 февраля, понедельник, 17:15-18:45).

Ефименко Е.С. и др., Семинары 4 (3 марта, четверг, 17:15-18:45).

Башинов А.В. и др., Семинары 4 (3 марта, четверг, 17:15-18:45).

Мощные и сверхмощные лазерные системы

Мульти-тераваттные – сотни ТВт: $I \leq 10^{20} - 10^{21} \text{ Вт/см}^2$, $\varepsilon_{\sim} \sim 30 \text{ МэВ}$

(рабочие системы)

Петтаваттные – 1 ПВт: $I \sim 10^{22} \text{ Вт/см}^2$, $\varepsilon_{\sim} \sim 100 \text{ МэВ}$

(вступили в строй)

10 Петтаваттные – 10 ПВт: $I \sim 10^{23} \text{ Вт/см}^2$, $\varepsilon_{\sim} \sim 300 \text{ МэВ}$

(следующего поколения)

Субэкзаваттные-лазеры – 100 ПВт: $I \sim 10^{24} \text{ Вт/см}^2$, $\varepsilon_{\sim} \sim 1 \text{ ГэВ}$

(мега-проекты)

Extreme Light Infrastructure

ELI will comprise 4 branches:

- **Attosecond Laser Science**, which will capitalize on new regimes of time resolution (*ELI-ALPS*, Szeged, HU)
- **High-Energy Beam Facility**, responsible for development and use of ultra-short pulses of high-energy particles and radiation stemming from the ultra-relativistic interaction (*ELI-Beamlines*, Prague, CZ)
- **Nuclear Physics Facility** with ultra-intense laser and brilliant gamma beams (up to 19 MeV) enabling also brilliant neutron beam generation with a largely controlled variety of energies (*ELI-NP*, Magurele, RO)
- **Ultra-High-Field Science** centred on direct physics of the unprecedented laser field strength (*ELI 4*, to be decided)





Российский проект XCELS

XCELS- EXawatt Center for Extreme Light Studies

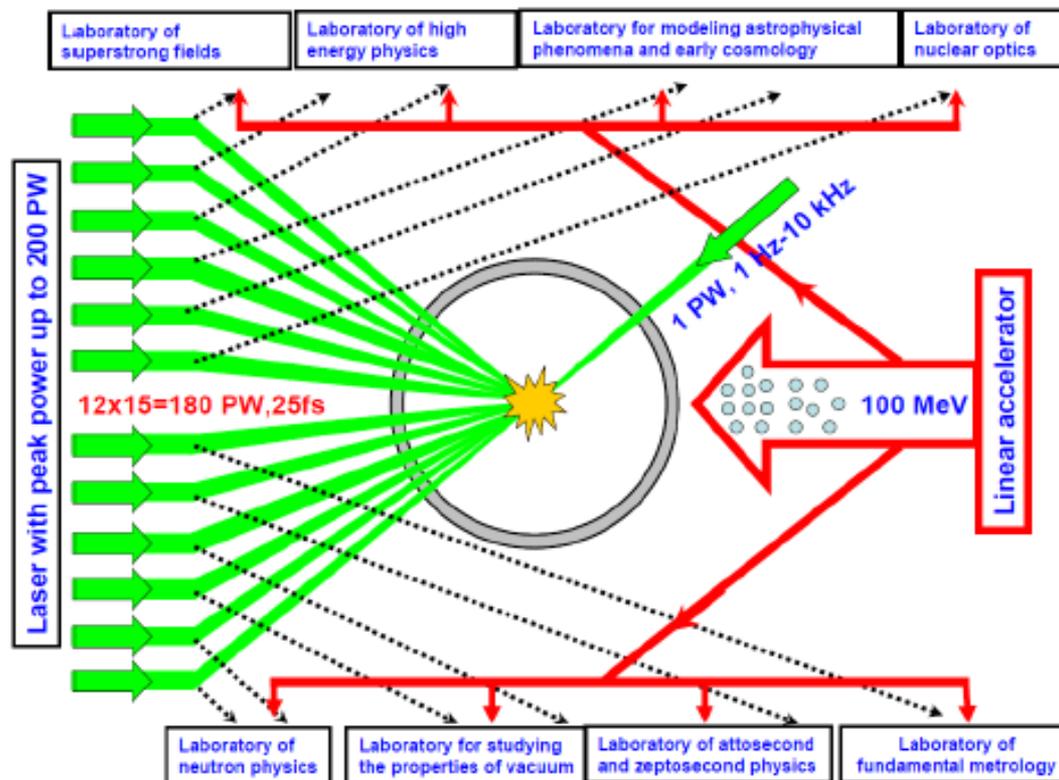
12 channels

15 PW each

400 J, 25 fs, 910 nm

Quality: 3 divergence limits

Intensity 10^{24} - 10^{25} W/cm²



Информация по XCELS:

www.xcels.iapras.ru

XCELS satisfies requirements for 4th Pillar of ELI

Сверхсильные лазерные поля

Релятивистски сильные поля: $I \geq 10^{18} \text{ Вт/см}^2$ $\varepsilon_{\sim} \geq 1 \text{ МэВ} \sim mc^2$

Экстремально сильные поля: $I \sim 5 \times 10^{23} \text{ Вт/см}^2$

$$a \sim \left(\frac{3mc^2 \lambda}{4\pi e^2} \right)^{1/3} \sim 450$$

Ультрарелятивистские поля: $I \geq 10^{23} - 10^{24} \text{ Вт/см}^2$

$$\varepsilon_{\sim} \geq 0.3 - 1 \text{ ГэВ} \sim Mc^2$$

Динамика электрона в лазерном поле

Уравнение движения:

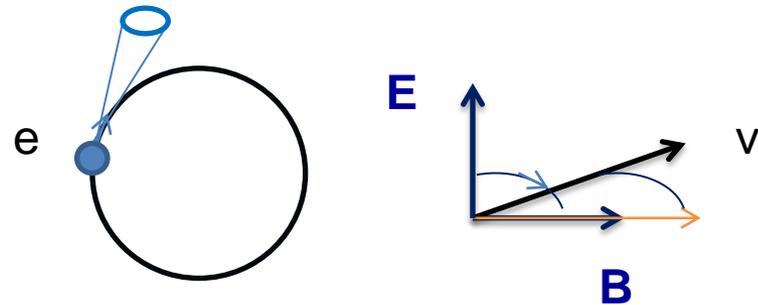
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{E} + \frac{e}{c}[\vec{v}, \vec{H}] + \vec{F}_{rad}$$

сила реакции излучения в форме:

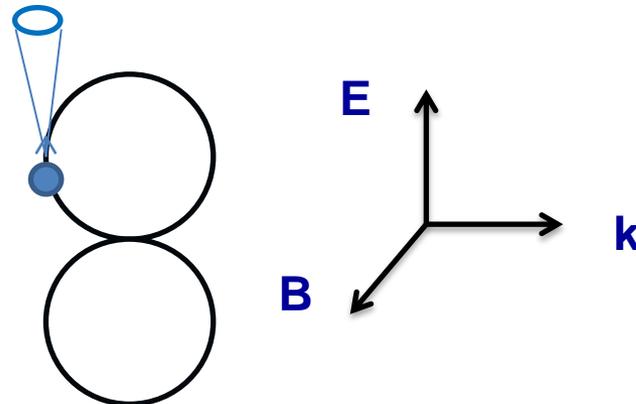
- Абрагама-Лорентца
- Ландау-Лившица
- с учетом дискретности излучения

- Циркулярно-поляризованная волна:

Зельдович Я.Б. УФН, 115 (2), 1975.

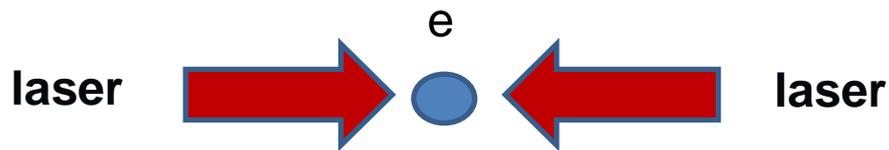


- Линейно-поляризованная волна:



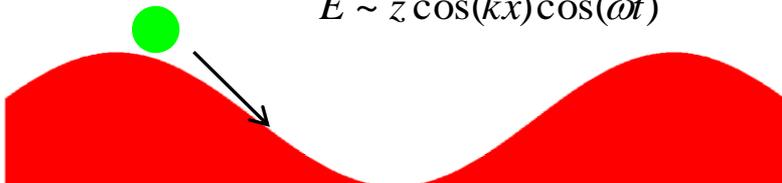
Динамика электрона в лазерном поле

- Стоячая линейно-поляризованная волна:

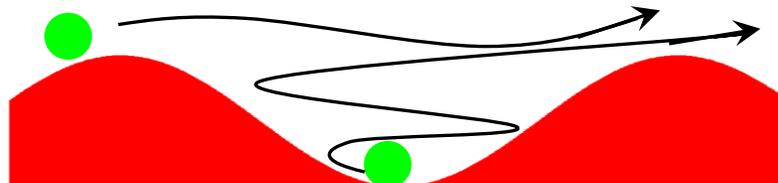


Движение электрона в стоячей волне

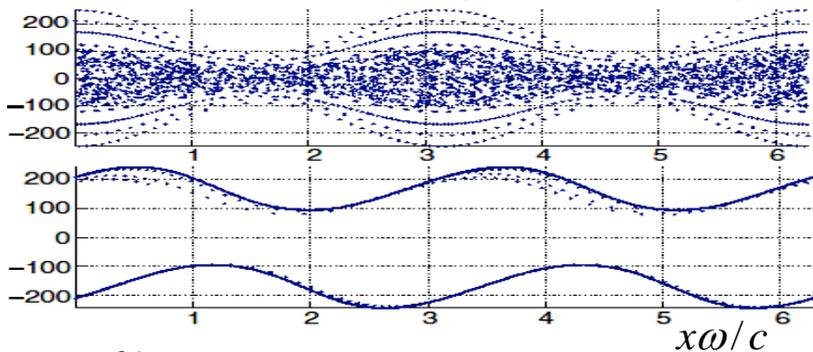
$$\vec{E} \sim \vec{z} \cos(kx) \cos(\omega t)$$



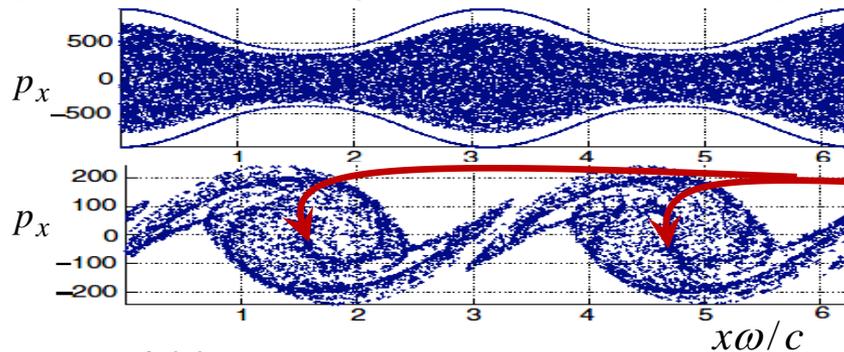
Движение релятивистского электрона
Релятивистская стохастичность



Учет силы радиационного трения [G. Lehmann et al., Phys. Rev. E, 85, 056412, 2012]



$a=60$



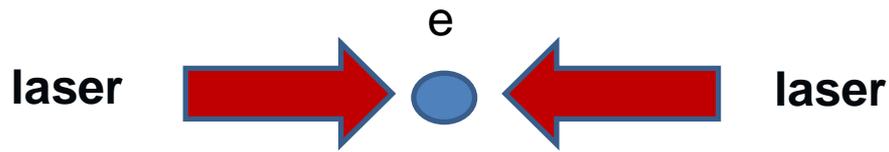
$a=200$

$$a = \frac{eE}{m\omega c}$$

NRT

Динамика электрона в лазерном поле

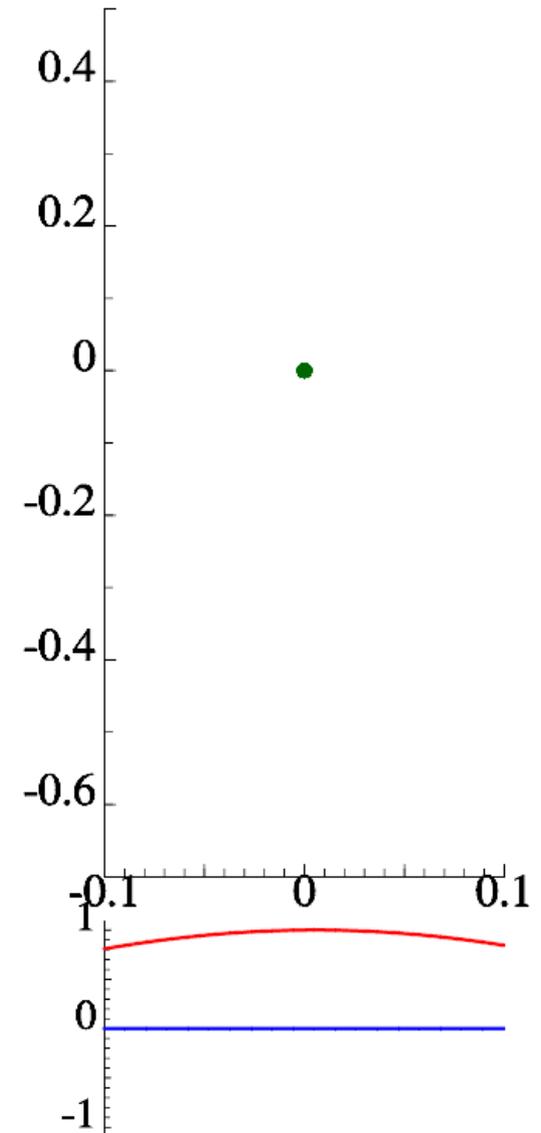
- Стоячая линейно-поляризованная волна:



$a=2000$

Динамика электрона качественно меняется при учете силы реакции излучения.

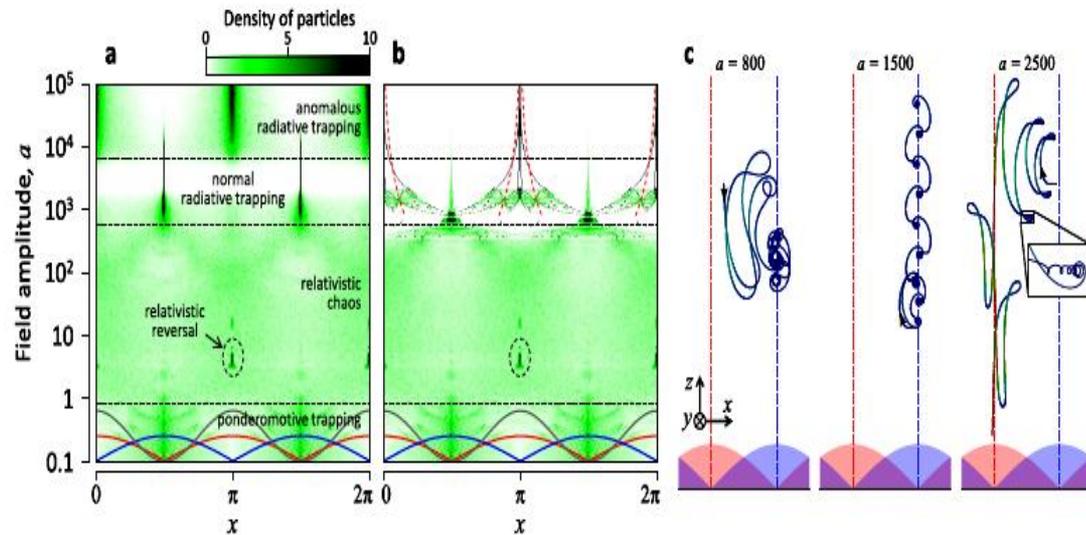
Аномальный радиационный захват (ART) в лазерных полях с экстремально высокой интенсивностью



Динамика электрона в лазерном поле

Явление радиационного захвата в стоячей волне:

Электроны локализируются в минимуме (NRT) или в максимуме (ART) электрического поля



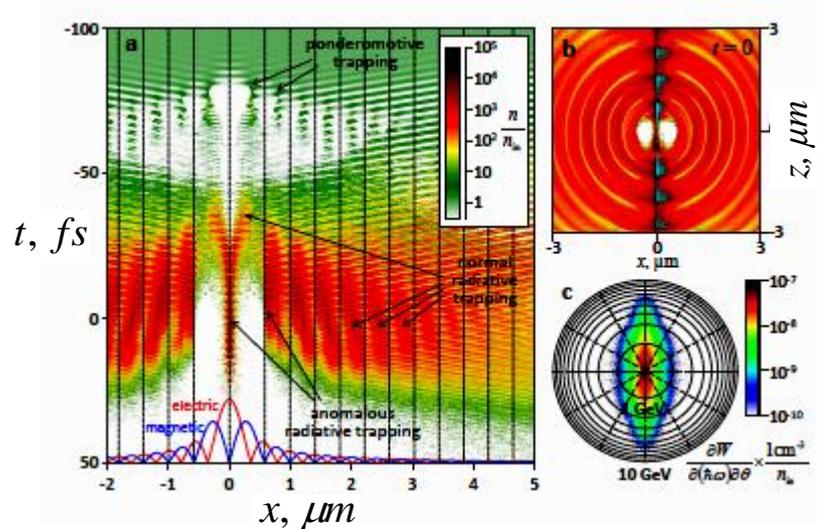
$$I_{th}^{NRT} \approx 5 \times 10^{23} \frac{W}{\text{cm}^2} \times \left(\frac{0.81 \mu\text{m}}{\lambda} \right)^{\frac{4}{3}}$$

$$I_{th}^{ART} \approx 8 \times 10^{24} \frac{W}{\text{cm}^2} \times \left(\frac{0.81 \mu\text{m}}{\lambda} \right)^{\frac{4}{3}}$$

Динамика электрона в лазерном поле

Явление радиационного захвата в сходящейся дипольной волне:

Электроны локализируются в минимуме (NRT) или в максимуме (ART) электрического поля



Нелинейная электродинамика плазмы

Исходные уравнения. Сила реакции излучения в форме LAD.

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{p}}{dt} = & \frac{e}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + e \nabla \phi - \frac{e}{c} [\vec{v} \times \text{rot} \vec{A}] + \quad (1) \\ & + \frac{2e^2 \gamma^2}{3c^3} \left[\frac{d^2 \vec{v}}{dt^2} + \frac{d\vec{v}}{dt} \frac{\gamma^2 (\vec{v} \cdot d\vec{v}/dt)}{c^2} + \frac{d\vec{v}}{dt} \frac{\gamma^2 (\vec{v} \cdot d\vec{v}/dt)}{c^2} \right. \\ & \left. + \frac{\gamma^2 \vec{v}}{c^2} \left((\vec{v} \cdot \frac{d^2 \vec{v}}{dt^2}) + \frac{3\gamma^2 (\vec{v} \cdot d\vec{v}/dt)^2}{c^2} \right) \right], \end{aligned}$$

$$\Delta \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{4\pi}{c} e N_e \vec{v}, \quad (2)$$

$$\Delta \phi = 4\pi (N_e - N_i) \quad (3)$$

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (4)$$

Нелинейная электродинамика плазмы

- Квазистационарная модель:

$$\vec{A} = \text{Re}\{A(z)(\mathbf{x} + iy)e^{i\omega t}\}$$

$$\vec{v} = \text{Re}\{v(z)(\mathbf{x} + iy)e^{i\omega t}\}$$

$$\delta = \frac{2e^2\omega}{3mc^3}, \text{ for } \lambda = 1\mu\text{m } \delta \approx 10^{-8}$$

Self-consistent set of equations:

$$(i) \quad a'' + \left[1 - \frac{n_0 n}{\gamma(1 - i\delta\gamma^3)}\right] a = 0,$$

$$(ii) \quad \phi'' = n_0(n - 1),$$

$$(iii) \quad \phi' = \frac{1}{2\gamma a} \left[\frac{(|a|^2)'}{1 + \delta^2\gamma^6} + i\delta\gamma^3 a \frac{aa^* - a^*a'}{1 + \delta^2\gamma^6} \right]$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial p_{\parallel,\perp}}{\partial t} = 0$$

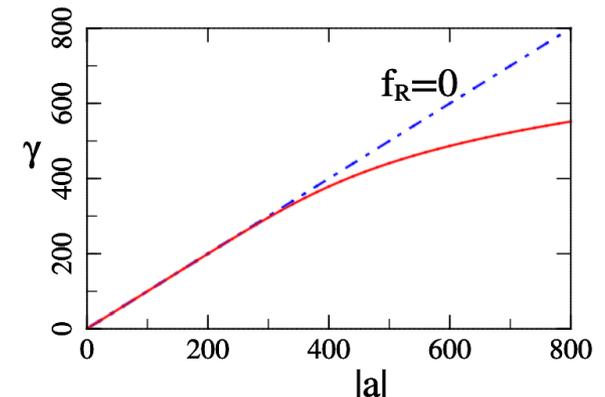
$$\frac{\partial v_{\parallel,\perp}}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial A_{\perp}}{\partial t} = 0$$

Ions are immobile

where γ^2 is a positive solution of the 4th order algebraic equation

$$\delta^2\gamma^8 - \delta^2\gamma^6 + \gamma^2 - (1 + |a|^2) = 0$$



Нелинейная электродинамика плазмы

Нелинейная диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon = 1 - \frac{n_0}{\gamma(1 + \delta^2 \gamma^6)} (1 + i\delta\gamma^3)$$

$$\gamma^2(|a|) = \frac{1}{4} - \frac{1}{2} B^{1/2} + \frac{1}{4} (3 - 4B + \frac{8 - \gamma^2}{\delta^{1/2} B^{1/2}})^{1/2},$$

$$B = \frac{1}{4} - \frac{q}{\delta^2} [s^2 + (s^2 + 54q^3)^{1/2}]^{-1/3} + \frac{[s^2 + (s^2 + 54q^3)^{1/2}]^{1/3}}{2^{1/3} 3\delta^2},$$

$$q = 2^{1/3} \delta^2 (3 + 4|a|^2), \quad s = 27\delta^2 [1 - \delta^2 (1 + |a|^2)].$$

Without radiation reaction force ($\delta = 0$): $\varepsilon = 1 - \frac{n_0}{1 + |a|^2}$

Akhiezer, Sov.Phys. JETP (1956)

Relativistic Thomson scattering cross section: $\sigma_R = \sigma_T \frac{\gamma^2}{1 + \delta^2 \gamma^6}$

Bulanov et al., PRL (2010)

(by definition as $\sigma |\vec{E}|^2 = \frac{c}{4\pi} |\vec{E}|^2 \sigma_R N$,

$\sigma_T = \frac{8\pi e^4}{3m^2 c^4}$ - Thomson scattering cross section)

At $|a| \ll \delta^{-1/3}$ $\sigma_R \approx \sigma_T (1 + |a|^2)$,

At $|a| \gg \delta^{-1/3}$ $\sigma_R \approx \sigma_T \frac{1}{\delta |a|^2}$

Нелинейная электродинамика плазмы

$$\varepsilon = 1 - \frac{n_0}{\gamma(1 + \delta^2 \gamma^6)} (1 + i\delta\gamma^3)$$

Силы действующие на единицу объема:

$$F_{pondRe} = -\frac{1 - \varepsilon_{Re}}{8\pi} \cdot \nabla |E|^2$$

$$F_{pondIm} = \frac{-\varepsilon_{Im} \cdot \text{Im}(E \cdot \nabla E^*)}{4\pi}$$

V.A.Kozlov, A.G.Litvak, V.E.Suvorov, Sov.Phys. JETP, 1979, relativistic ponderomotive force accounted exactly but without radiation reaction effect.

$$\phi' = \frac{1}{2\gamma a} \left[\frac{(|a|^2)'}{1 + \delta^2 \gamma^6} + i \delta\gamma^3 a \frac{aa^* - a^*a'}{1 + \delta^2 \gamma^6} \right]$$

In the plasma force due to charge separation is compensated by a sum of two forces: the ponderomotive force and dissipative force due to radiation reaction effects.

Gamma Source with Colliding Pulses

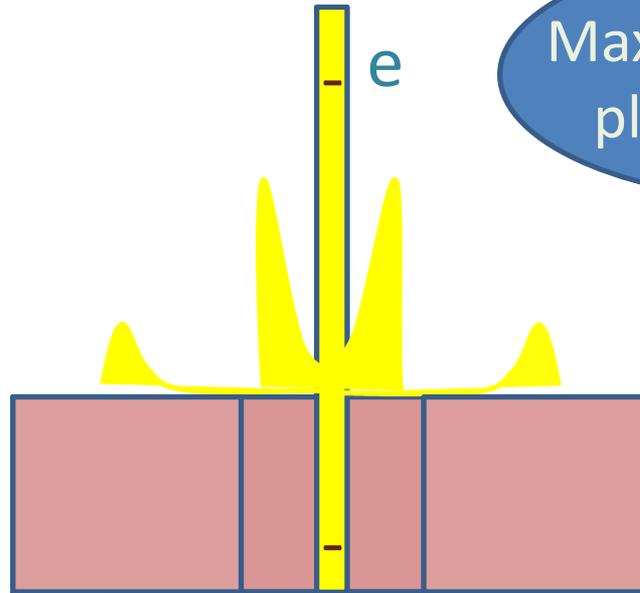
- Laser Foil Interaction

?

Thickness of
electron layer

?

Maximum value of
plasma density

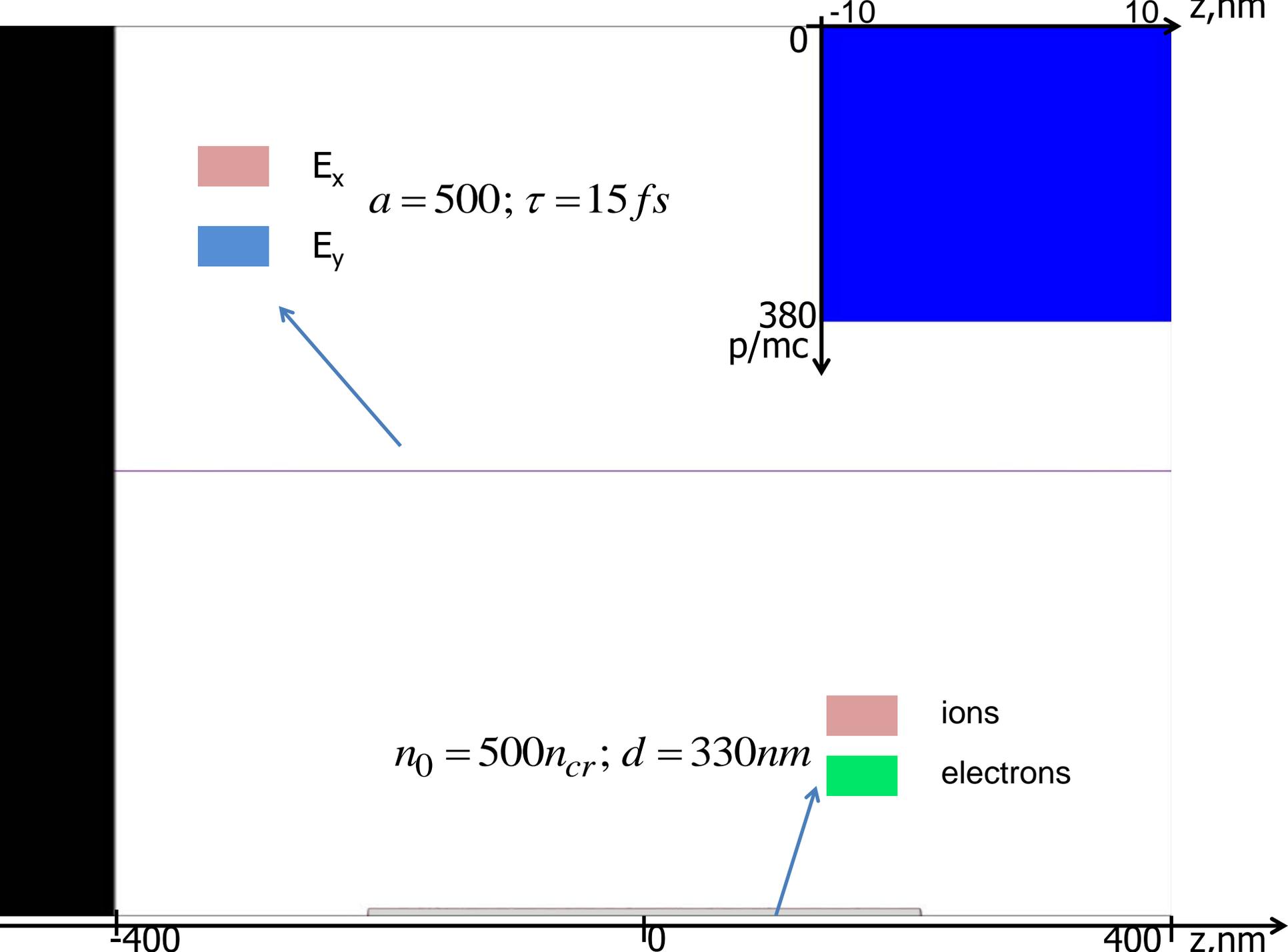


?

Fields in
overdense plasma

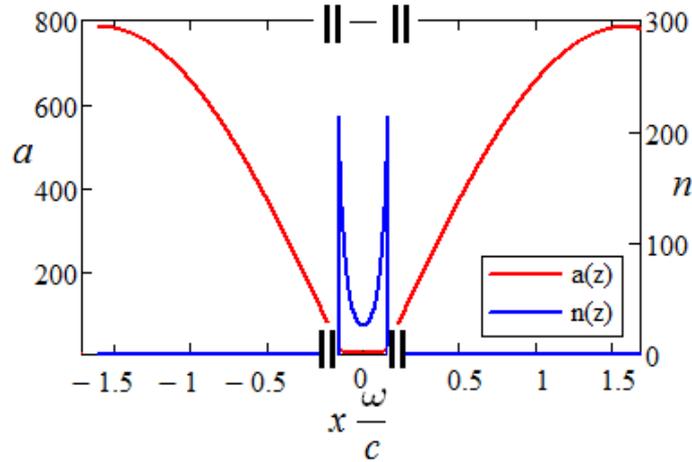
?

Electron energy
taking into account
radiation

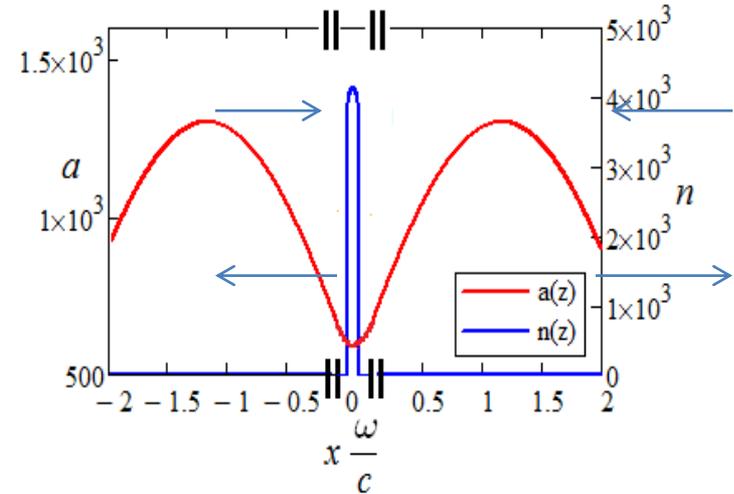


Laser-Foil Interaction

- Plasma Field Structures:



$d=0.5\lambda$, $n_0=500$, $I_i=5\cdot 10^{23}\text{W/cm}^2$
 $a_c\approx 5$, $N_{e\max}=1\cdot 10^{26}\text{cm}^{-3}$
 $\eta=0\%$
 There is no x-ray or gamma radiation



$d=0.5\lambda$, $n_0=500$, $I_i=3\cdot 10^{24}\text{W/cm}^2$
 $a_c=600$, $N_{e\max}=2\cdot 10^{27}\text{cm}^{-3}$
 $\gamma=370$
 $\eta=45\%$, $\hbar\omega_\gamma\approx 50\text{Mev}$,
 $\Delta\omega\approx 3\omega_\gamma$

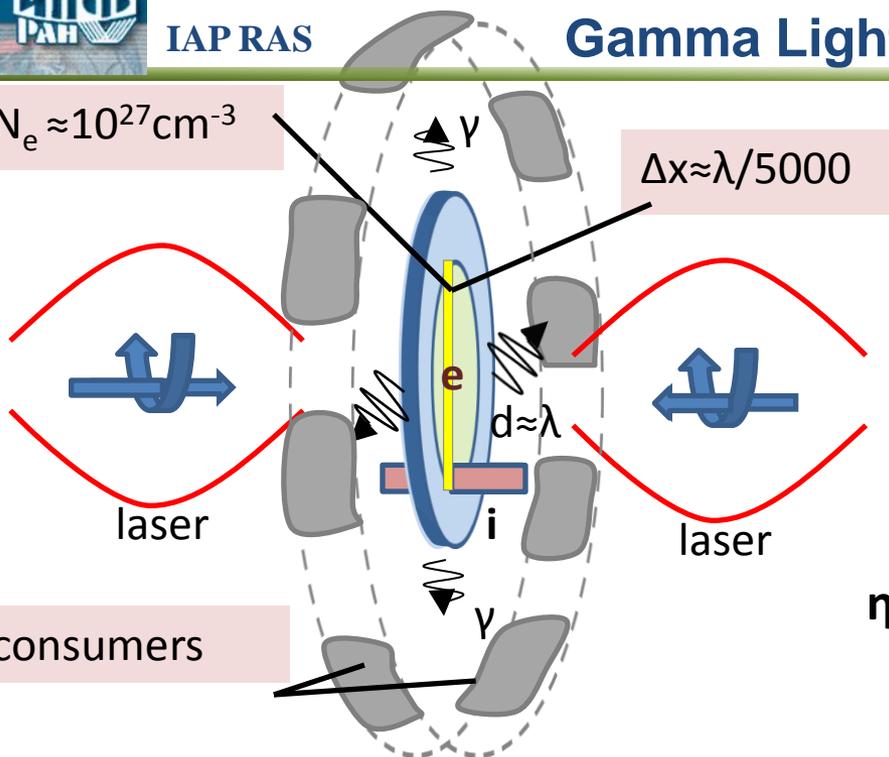
$$\Delta x\approx\lambda/150$$

$$\Delta x\approx\lambda/5000$$

width of plasma layer

Gamma Light House Source with Colliding Pulses

$N_e \approx 10^{27} \text{cm}^{-3}$



$\Delta x \approx \lambda/5000$

$d = 0.5\lambda$
 $a_c = 600$
 $\eta = 45\%$

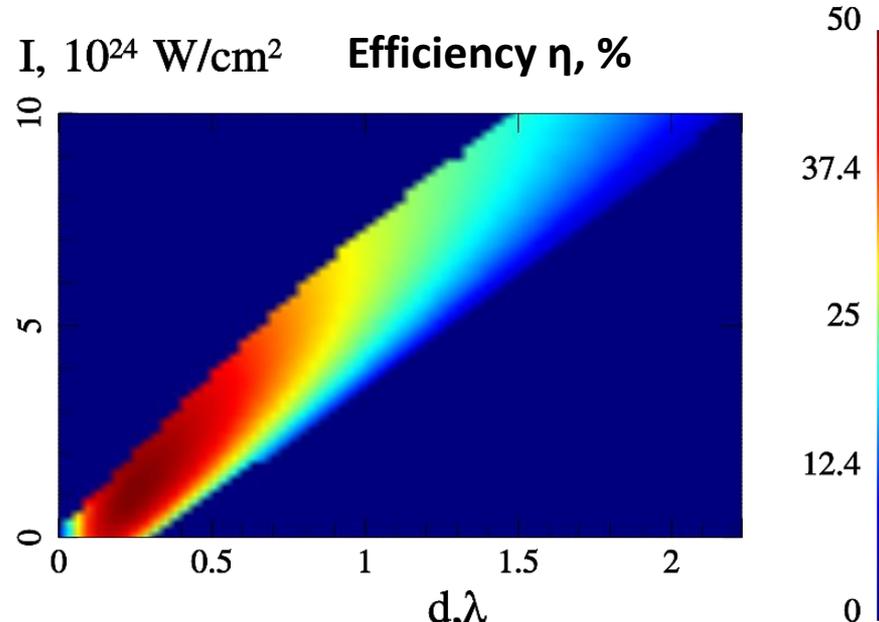
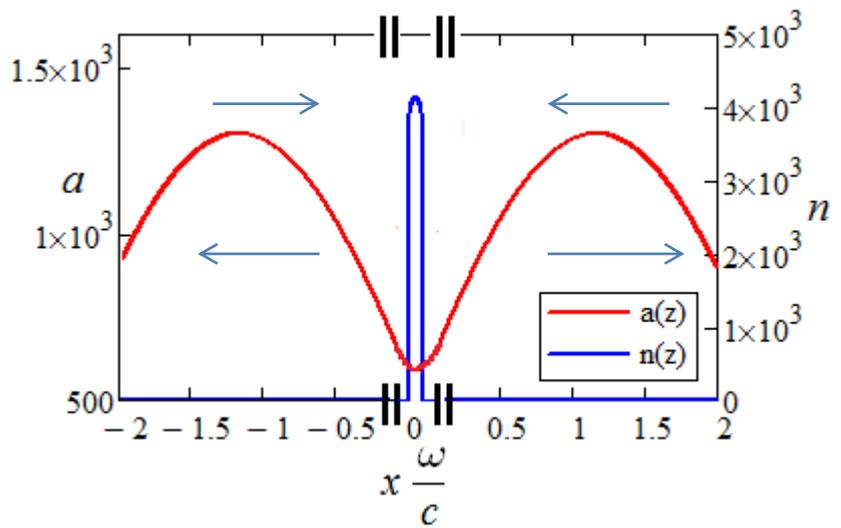
$n_0 = 500$
 $N_e = 2 \cdot 10^{27} \text{cm}^{-3}$
 $\hbar\omega_\gamma \approx 5 \text{Mev}$

$\Delta\omega \approx 3\omega_\gamma$
 $I_i = 3 \cdot 10^{24} \text{W/cm}^2$

consumers

$$\eta = \int \sigma E^2 dx / I_i$$

$$\sigma = \frac{(e\omega_p \gamma_L)^2}{6\pi m_e c^3 \left(1 + \left(\frac{2e^2 \omega}{3m_e c^3}\right)^2 \gamma_L^6\right)}$$



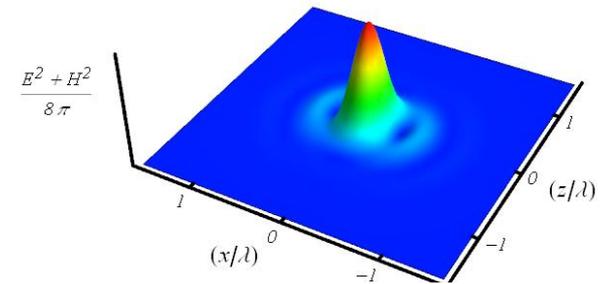
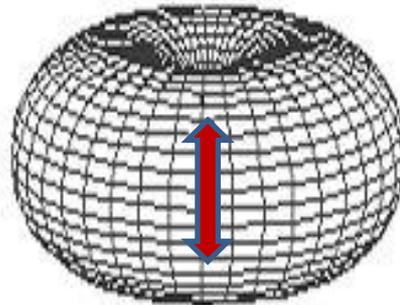
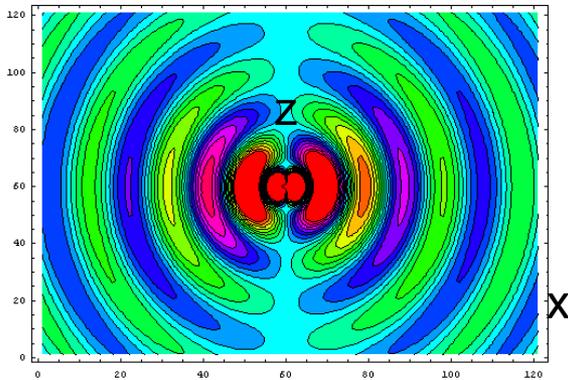
Максимизация поля при заданной мощности

Rule of thumb for coherent combining of several beams:

S. S. Bulanov, V. D. Mur, N. B. Narozhny, J. Nees, V. S. Popov, Multiple Colliding Electromagnetic Pulses: A Way to Lower the Threshold of e - p Pair Production from Vacuum, PRL **104**, 220404 (2010).

E.G. Gelfer, A.A. Mironov, A.M. Fedotov, V.F. Bashmakov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, N.B. Narozhny, Optimized multibeam configuration for observation of QED cascades, Phys. Rev. A **92**, 022113 (2015).

To maximize the electric field at focusing point, radiation of several combining beams should reproduce configuration of **phase conjugated dipole radiation field**



Minimum focusing volume: $V_{dp} \approx 0.032\lambda^3$

Converging dipole wave as an exact solution of Maxwell equations:

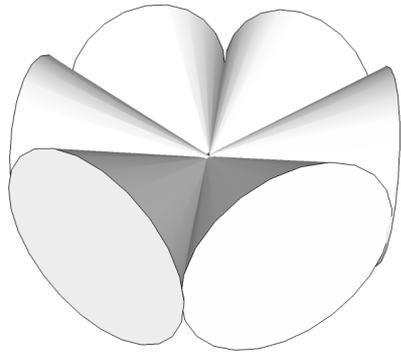
$$\mathbf{E} = -\nabla \times \nabla \times \mathbf{Z}, \quad \mathbf{H} = -\frac{1}{c} \nabla \times \dot{\mathbf{Z}} \quad \mathbf{Z} = \hat{z} \frac{d}{R} [g(t + R/c) - g(t - R/c)]$$

$$\mathbf{E}(0, t) = \hat{z} \frac{4d}{3c^2} \ddot{g}(t) \quad \mathbf{H} = 0 \quad g(\tau) = e^{-(\tau^2/D^2) \ln 4} \sin(\omega\tau)$$

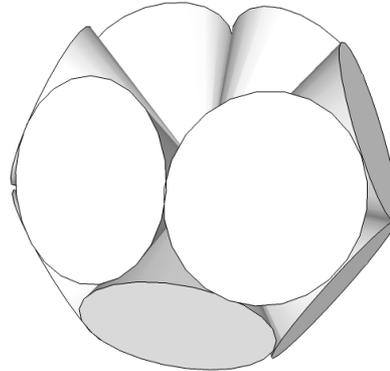
I. Gonoskov, A. Aiello, S. Heugel, and G. Leuchs, Phys. Rev. A **86**, 053836 (2012).

Максимизация поля при заданной мощности

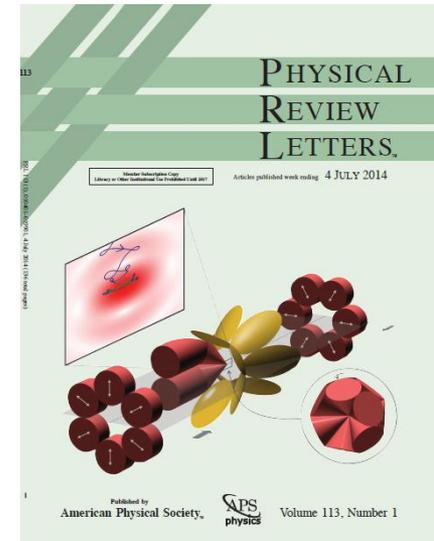
Coherent combining to mimic a converging dipole wave



Belt-6



Double-Belt-12

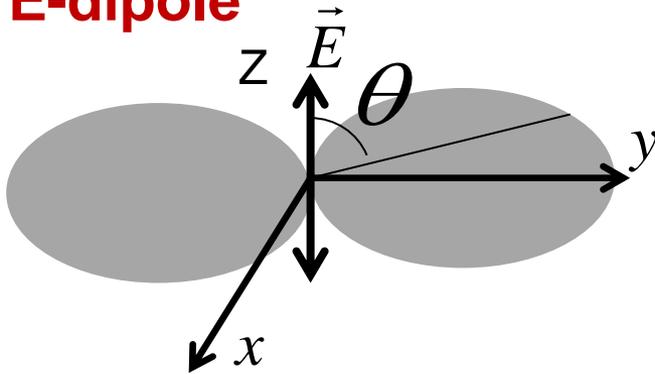


| Geometry | Power per channel | Intensity, $\times 10^{25} \text{W/cm}^2$ | $I/I(f=1.2)$ | Equivalent power (f=1.2) |
|--------------------------------|----------------------|---|--------------|--------------------------|
| Single beam (f=1.2) | $P_0=200 \text{ PW}$ | 1.2 | 1 | 200 PW |
| Double-Belt-12 12× (f=0.96) | $P_0/12$ | 13.4 | 11.2 | 2.2 EW |
| Dipole-Wave | - | 16.7 | 13.9 | 2.8 EW |

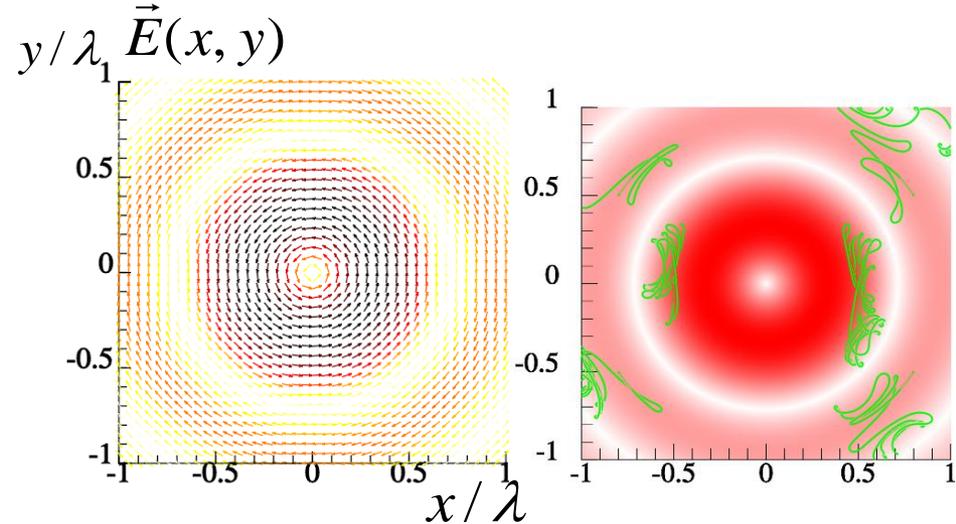
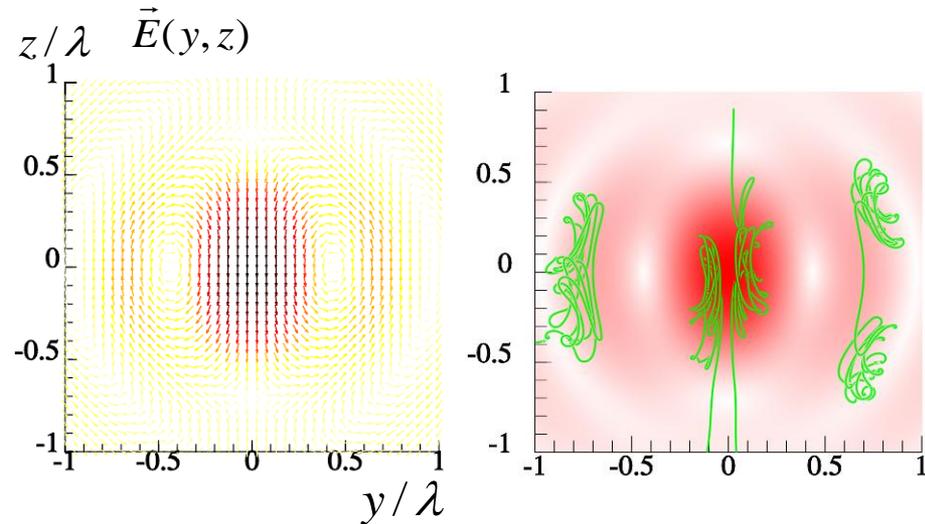
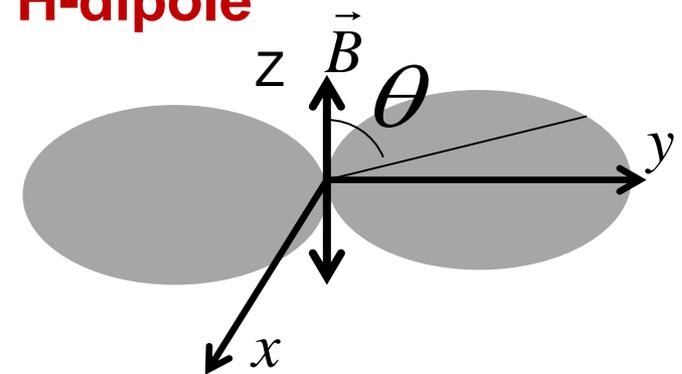
Структуры поля в дипольной волне

Pair Plasma Generation in a Converging Dipole Wave

E-dipole



H-dipole

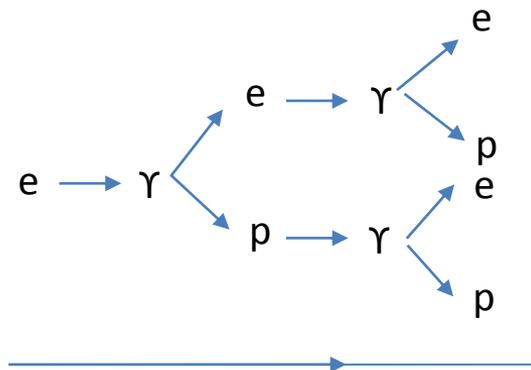


Пробой вакуума и электрон-позитронная лавина

Электромагнитный каскад:

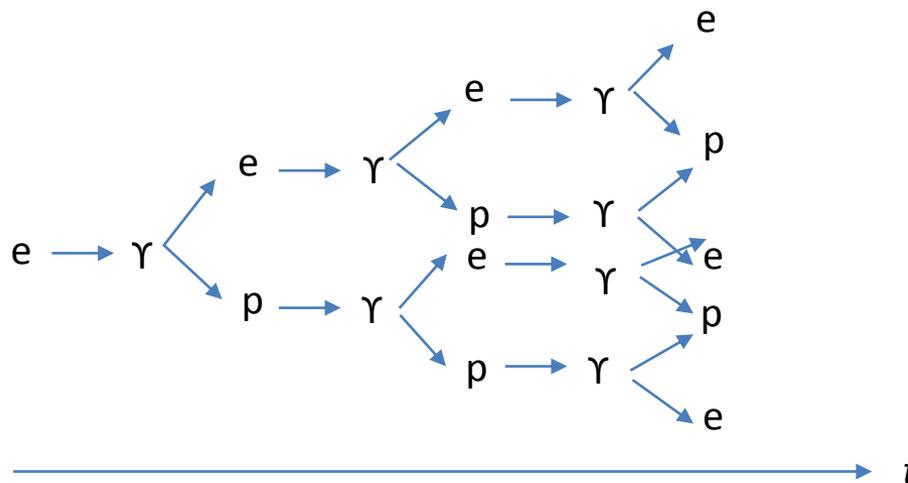
А) Множественное рождение e - p пар высокоэнергичной частицей
(Ионизация электронным ударом)

$$N_{e-p} \sim \frac{\varepsilon}{2mc^2}$$



Б) В лазерном поле - e - p лавина
(Электронная лавина)

$$N_{e-p} \sim e^{\Gamma t}$$

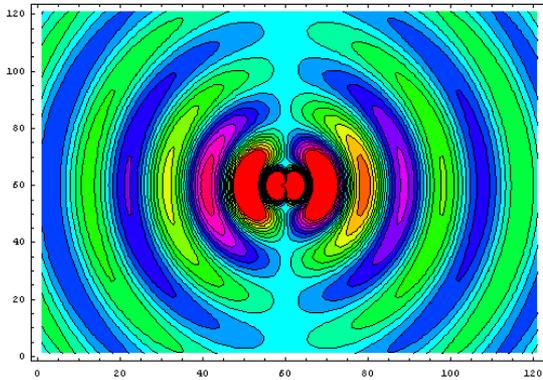


Электромагнитный каскад в лазерном поле

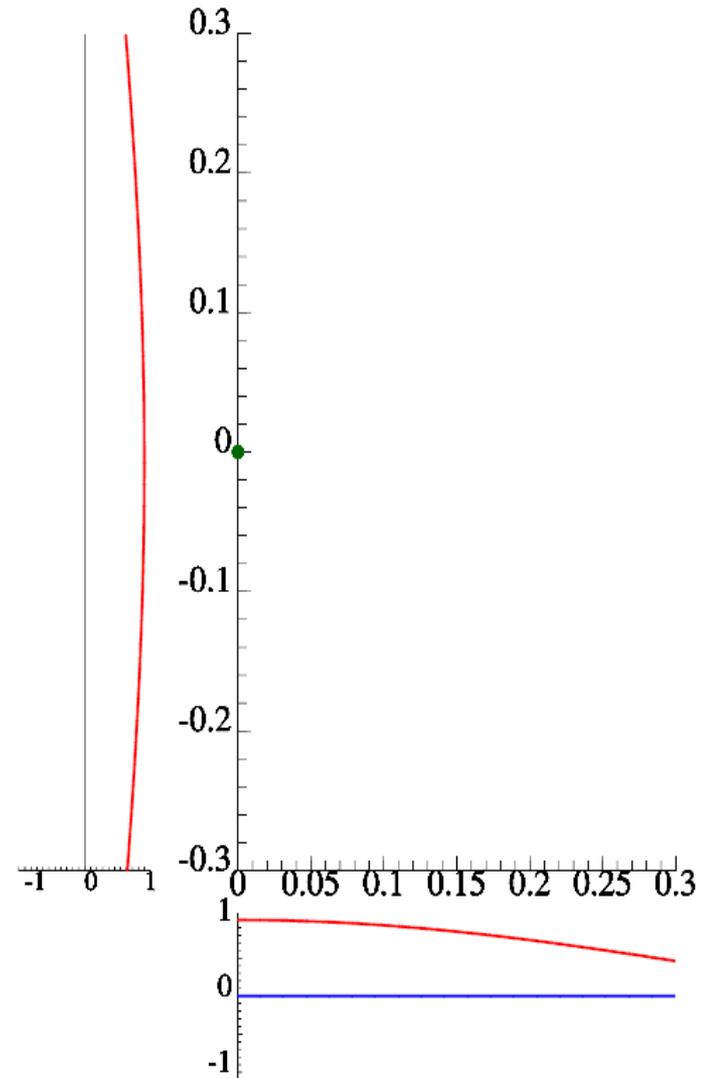
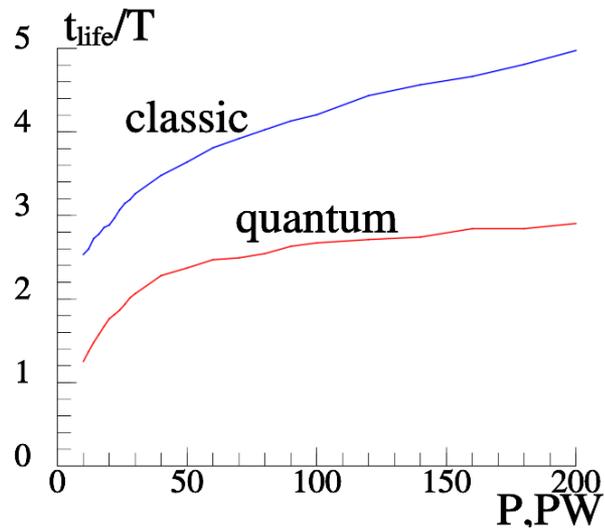
1. A.R.Bell, J.G.Kirk, Possibility of Prolific Pair Production with High-Power Lasers, PRL **101**, 200403 (2008).
2. A. M. Fedotov, N. B. Narozhny, G. Mourou, and G. Korn, Limitations on the Attainable Intensity of High Power Lasers, PRL **105**, 080402 (2010).
3. I.V. Sokolov, N.M. Naumova, J.A. Nees, G. Mourou, Pair Creation in QED-Strong Pulsed Laser Fields Interacting with Electron Beams, PRL **105**, 195005 (2010).
4. S.S. Bulanov, T.Zh. Esirkepov, A.G.R. Thomas, J.K. Koga, S.V. Bulanov, Schwinger Limit Attainability with Extreme Power Lasers, PRL **105**, 220407 (2010).
5. N.V. Elkina, A.M. Fedotov, I.Yu. Kostyukov, M.V. Legkov, N.B. Narozhny, E.N. Nerush, H. Ruhl, QED cascades induced by circularly polarized laser fields, PRSTAB **14**, 054401 (2011).
6. E.N. Nerush, I.Y. Kostyukov, A.M. Fedotov, N.B. Narozhny, N.V. Elkina, and H. Ruhl, PRL **106**, 035001 (2011).

Динамика электрона в лазерном поле

- Стоячая дипольная волна:



$a=2000$



Пробой вакуума в сходящейся дипольной волне

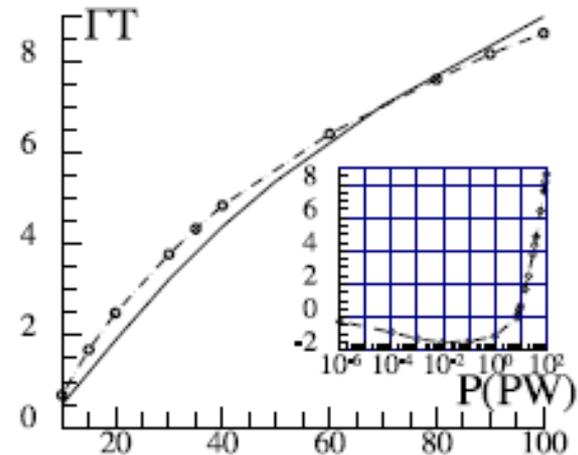
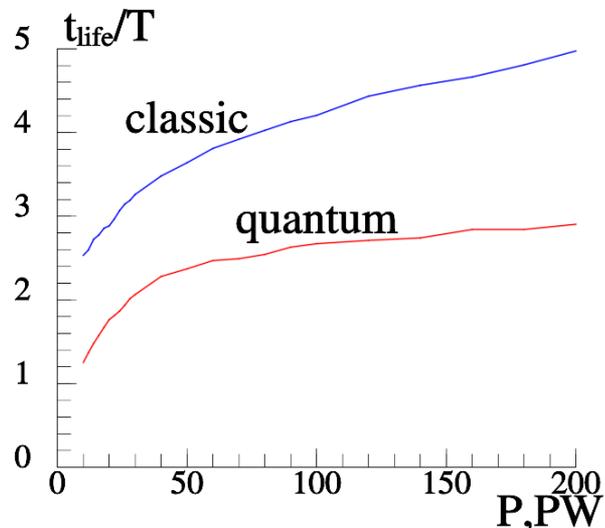
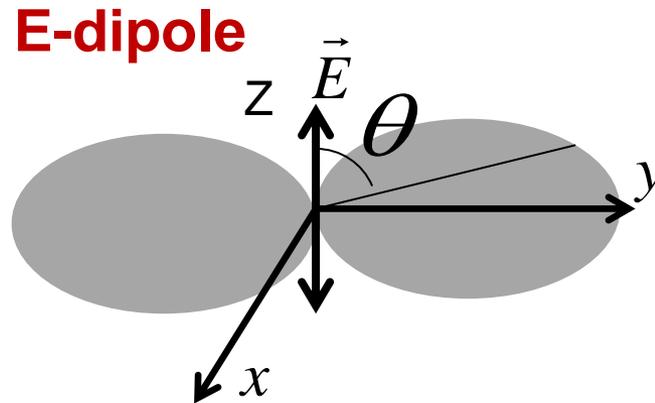
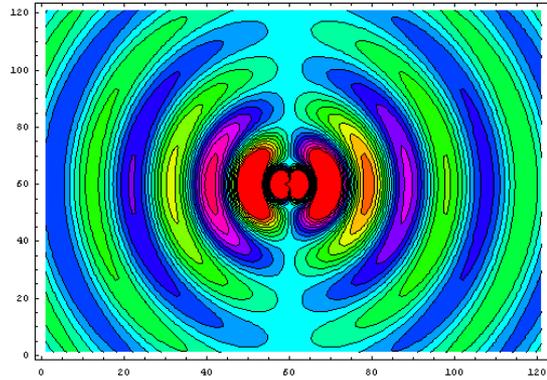
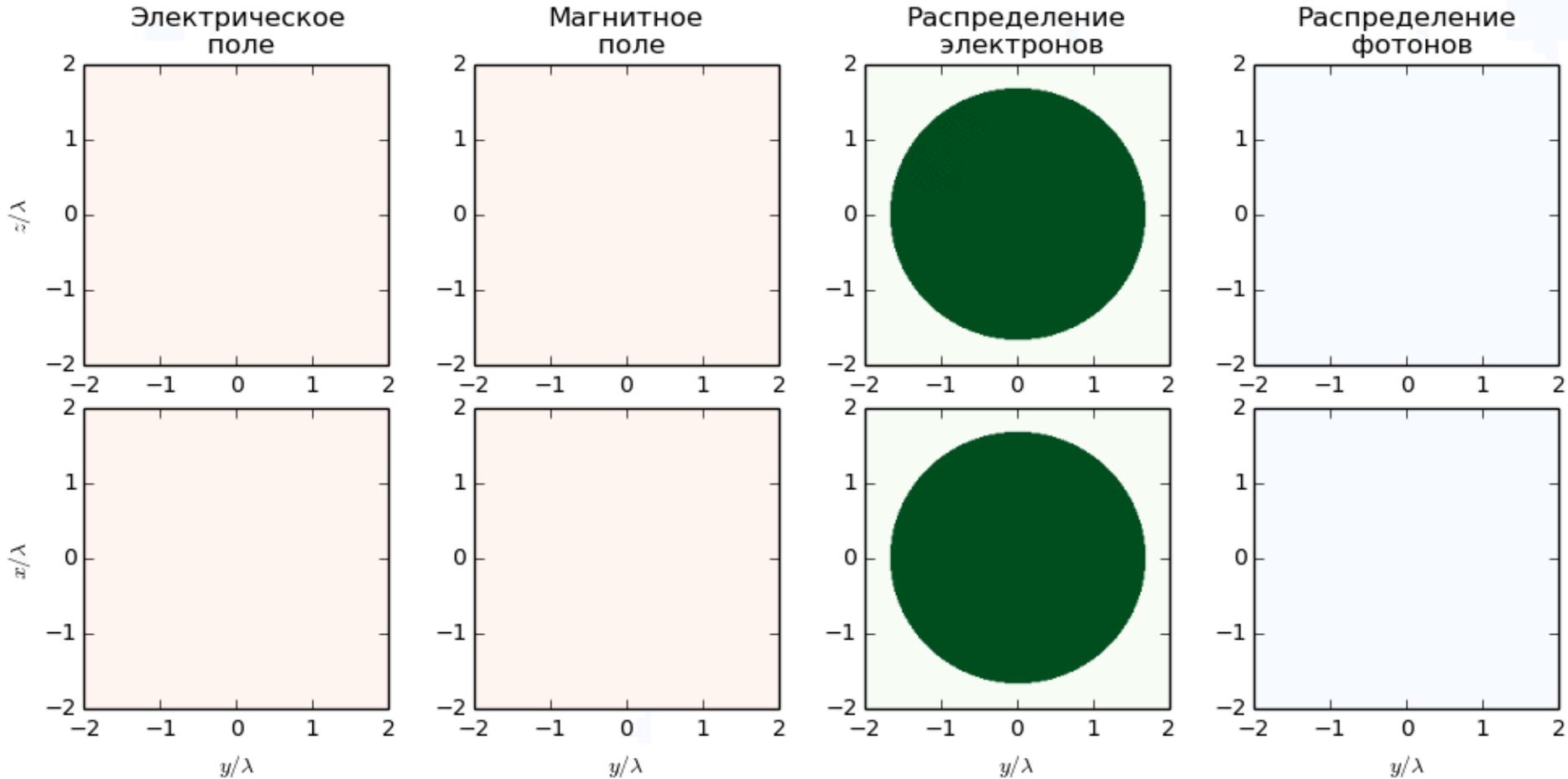


FIG. 2. The measured averaged rate of the exponential growth for the number of particles produced and trapped in the center of an e -dipole wave as a function of the total power P . The dashed line with circles indicate numerical experiments and the solid line obtained from analytical estimations (1).

Порог пробоя: $P_b = 7 \text{ ПВт}$

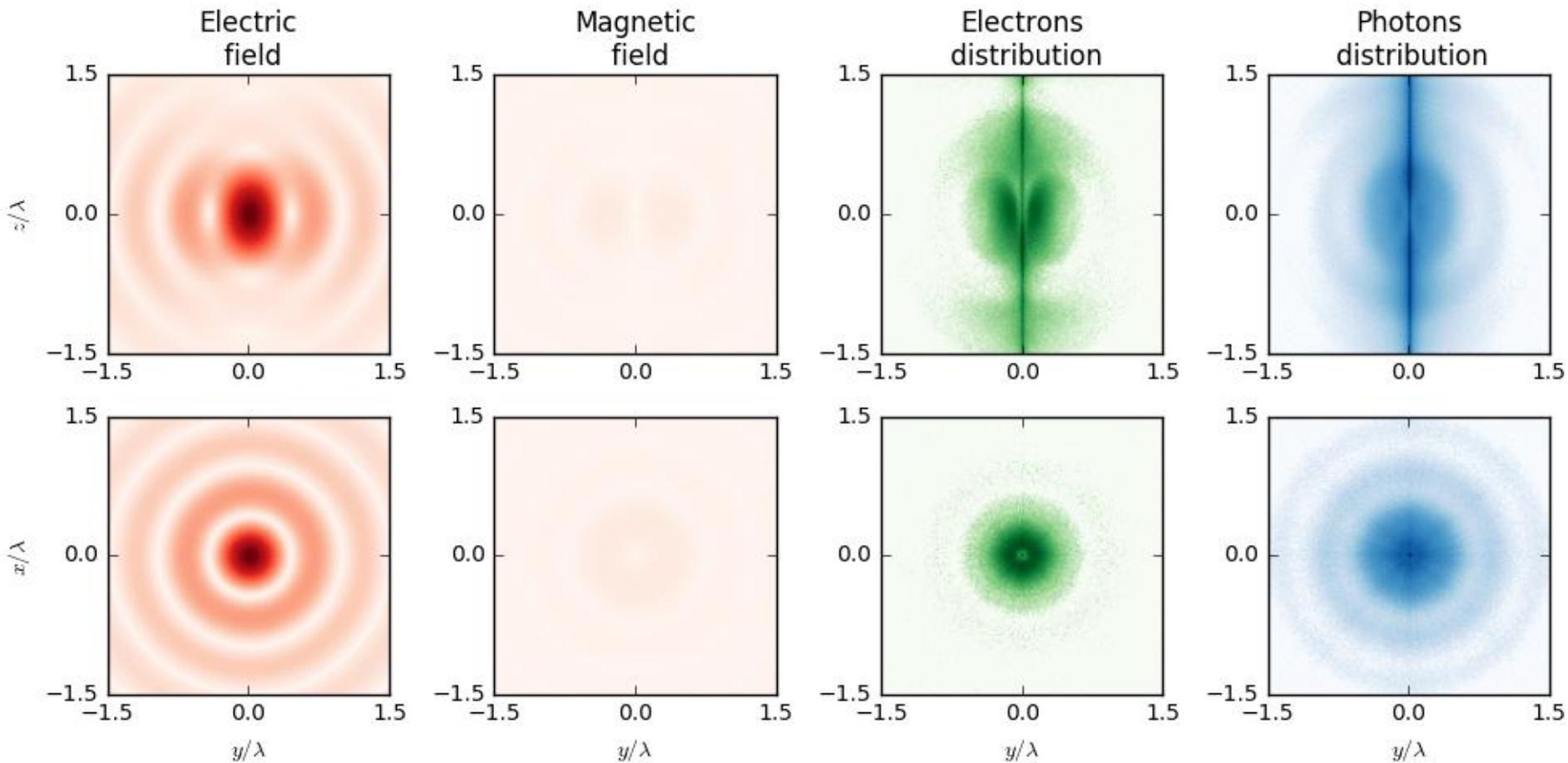
Пробой вакуума в сходящейся дипольной волне

$P=10$ ПВт, e - p лавина:



Пробой вакуума в сходящейся дипольной волне

$P=10$ ПВт, e^- лавина (один период):



Фабрика гамма квантов ГэВ-ных энергий

$P = 40 \text{ PW}$, 15 fs , плотность мишени 10^{16} cm^{-3}

Сверхяркий источник гамма излучения:

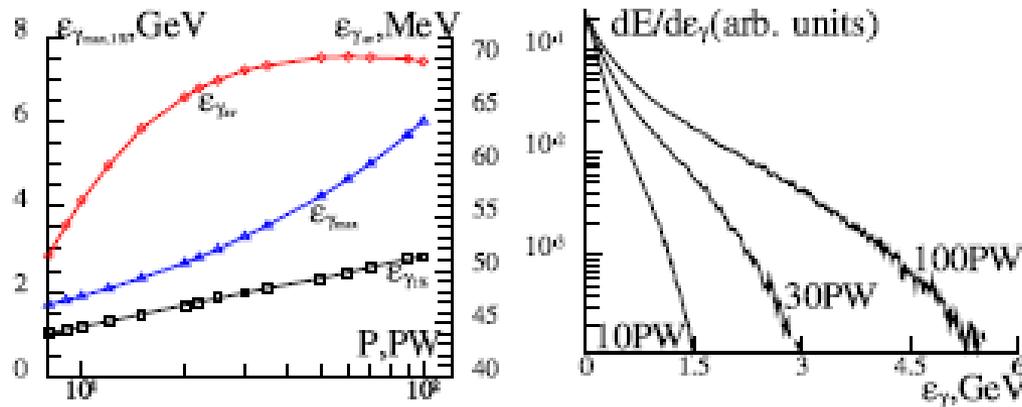


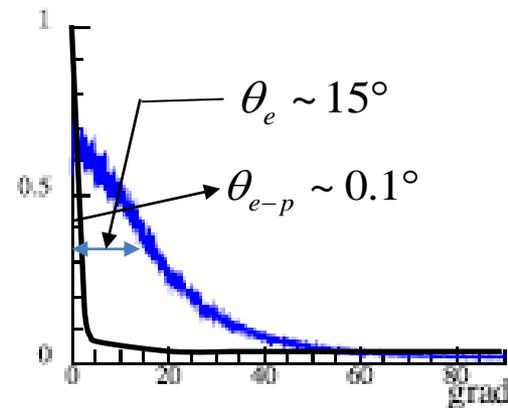
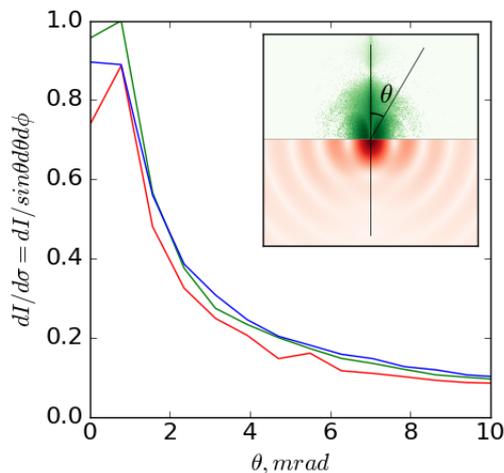
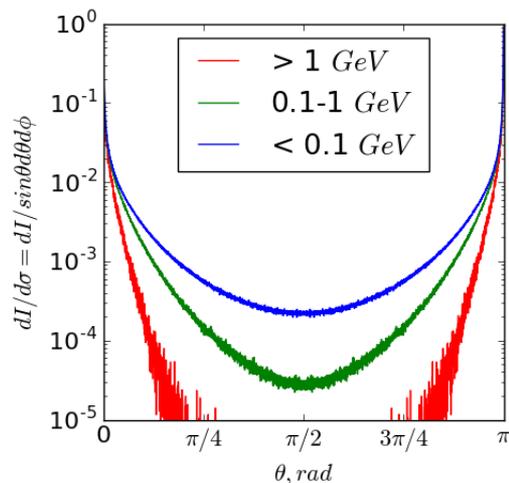
FIG. 5. Left. Dependence of average $\epsilon_{\gamma_{av}}$ (red line with circles), maximal $\epsilon_{\gamma_{max}}$ (blue line with triangles) photon energy and energy at the level 1% $\epsilon_{\gamma_{1\%}}$ (black line with squares) on incoming power P . Right. Examples of normalized spectra of electron-positron plasma radiation for 10, 30 and 100PW.

$$\epsilon_{\max} (\text{ГэВ}) \approx \gamma_{\max} mc^2 = 0.6\sqrt{P(\text{ПВт})}$$

Фабрика гамма квантов ГэВ-ных энергий

$P = 40 \text{ PW}$, 15 fs , плотность мишени 10^{16} cm^{-3}

Сверхяркий источник гамма излучения:



Угловое распределение гамма квантов:
голубая линия-одиночного электрона,
черная линия-плазмы

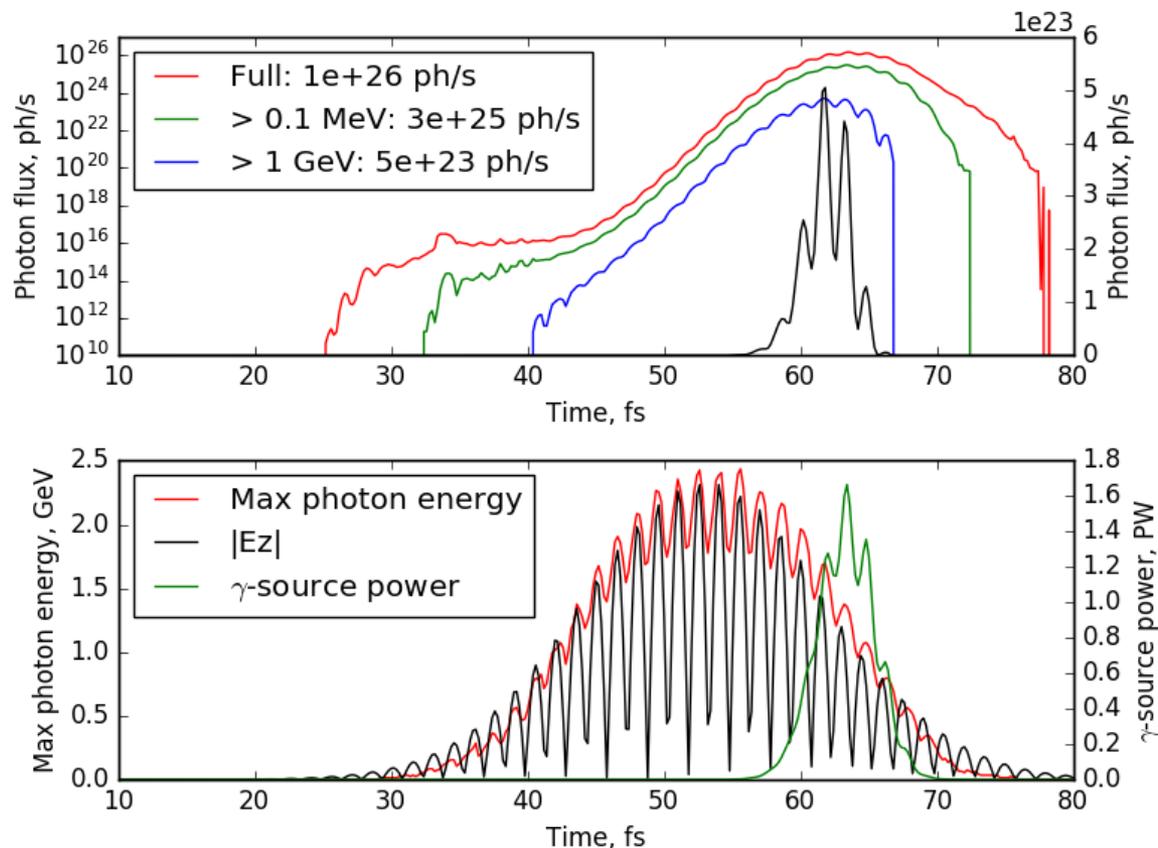
$$\theta_{e-p} \sim \frac{1}{\gamma_e}$$

Оценки: $P=40 \text{ ПВт}$, длительность импульса 15 фс
 4.5 фс гамма импульс, с энергией $> 1 \text{ ГэВ}$ - $2.5 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$

Фабрика гамма квантов ГэВ-ных энергий

$P = 40 \text{ PW}$, 15 fs , плотность мишени 10^{16} cm^{-3}

Сверхяркий источник гамма излучения:



Оценки: $P=40 \text{ ПВт}$, длительность импульса 15 фс ,
 4.5 фс гамма импульс, с энергией $> 1 \text{ ГэВ} - 5 \times 10^{25} \text{ ph} \cdot \text{s}^{-1}$
макс. светимость $\sim 2 \cdot 10^{27} \text{ s}^{-1} \text{ mrad}^{-2} \text{ mm}^{-2}$

Нелинейная электродинамика плазмы

- **Maxwell's Equations:** $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r})e^{i\omega t}$
(quasistationary model)

$$\Delta \vec{E} + \left(\vec{E} \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \vec{E} - i \frac{\partial(\omega^2 \varepsilon)}{c^2 \partial \omega} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$$

ε is the dielectric permittivity,

e.g., in plasma $\varepsilon = 1 - \frac{n}{n_c} \left(1 + i \frac{\nu}{\omega} \right), \quad n_c = \frac{m(\omega^2 + \nu^2)}{4\pi e^2}$

- **Pair Plasma Generation as an Ionization Nonlinearity:**

$$\varepsilon = 1 - \frac{N}{N_c \gamma (1 + \delta^2 \gamma^6)} (1 + i \delta \gamma^3), \quad N_c = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}$$

$$\delta = \frac{2e^2 \omega}{3mc^3}, \text{ for } \lambda = 1\mu\text{m } \delta \approx 10^{-8}$$



Due to radiation reaction effect

Нелинейная электродинамика e - p плазмы

e - p лавина как ионизационная нелинейность в электромагнитных полях. Аналогия с неравновесными разрядами (СВЧ и лазерными) в волновых полях

Уравнение баланса:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \Gamma \left[\left(\frac{P}{P_b} \right)^\beta - 1 \right] n, \quad \beta = 0.53, \quad P_b = 7 \text{ ПВт}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{N}{N_c \gamma (1 + \delta^2 \gamma^6)} (1 + i \delta \gamma^3)$$

$$\delta = \frac{2e^2 \omega}{3mc^3}, \quad \text{for } \lambda = 1 \mu\text{m} \quad \delta \approx 10^{-8}$$

Неравновесный разряд:

$$\varepsilon = 1 - \frac{n}{n_c} \left(1 + i \frac{v}{\omega} \right), \quad n_c = \frac{m(\omega^2 + v^2)}{4\pi e^2}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nu_a \left[\left(\frac{|E|}{E_b} \right)^\beta - 1 \right] n, \quad \beta = 5.34, \quad E_b = 30 \text{ кВ/см}$$

$$\nu_a = 5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$$

Стационарный разряд: $n = \frac{n(r), |E| = E_b}{0, |E| < E_b}$

Одномерный разряд в плоских волнах:

$$n(x) = \frac{n_c}{ch^2 \left(\frac{v}{\omega} kx \right)}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Разряд в сходящейся цилиндрической волне:

$$n(r) = n_c \left(1 - \frac{I_1(vkr/\omega)}{I_0(vkr/\omega)} \right)$$

Нелинейная электродинамика e - p плазмы

e - p лавина как ионизационная нелинейность в электромагнитных полях. Аналогия с неравновесными разрядами (СВЧ и лазерными) в волновых полях

Уравнение баланса:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \Gamma \left[\left(\frac{P}{P_b} \right)^\beta - 1 \right] n, \quad \beta = 0.53, \quad P_b = 7 \text{ ПВт}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{N}{N_c \gamma (1 + \delta^2 \gamma^6)} (1 + i \delta \gamma^3)$$

$$\delta = \frac{2e^2 \omega}{3mc^3}, \quad \text{for } \lambda = 1 \mu\text{m} \quad \delta \approx 10^{-8}$$

Оценки:

Плотности плазмы на нелинейной стадии

$$N \sim N_c \gamma (1 + \delta^2 \gamma^6), \quad \text{where } N_c = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}$$

Неравновесный разряд:

$$\varepsilon = 1 - \frac{n}{n_c} \left(1 + i \frac{v}{\omega} \right), \quad n_c = \frac{m(\omega^2 + v^2)}{4\pi e^2}$$

Одномерный разряд в плоских волнах:

$$n(x) = \frac{n_c}{ch^2 \left(\frac{v}{\omega} kx \right)}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Разряд в сходящейся цилиндрической волне:

$$n(r) = n_c \left(1 - \frac{I_1(vkr/\omega)}{I_0(vkr/\omega)} \right)$$

Характерный размер разрядной области:

$$l = \left(\frac{v}{\omega} k \right)^{-1} = \frac{\lambda}{2\pi \left(\frac{v}{\omega} \right)}$$

Нелинейная электродинамика e - p плазмы

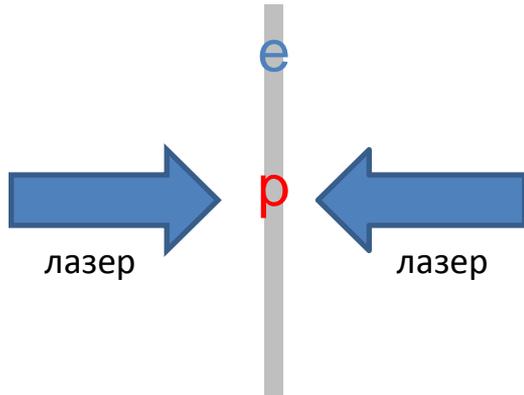
e - p лавина как ионизационная нелинейность в электромагнитных полях. Аналогия с неравновесными разрядами (СВЧ и лазерными) в волновых полях

Отличия:

1. Постоянная лавины зависит от структуры поля, электрического и магнитного полей.
2. Существенный рост может произойти за время меньше периода поля.

Самосогласованный слой в падающих волнах

е-р слой в циркулярно-поляризованных волнах:



$$a'' + \left[1 - \frac{N}{N_c \gamma (1 - i \delta \gamma^3)}\right] a = 0$$

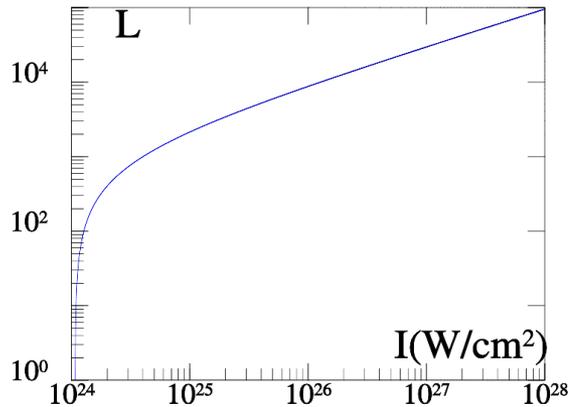
$$\gamma^2(|a|) = \frac{1}{4} - \frac{1}{2} B^{1/2} + \frac{1}{4} \left(3 - 4B + \frac{8 - \gamma^2}{\delta^{1/2} B^{1/2}}\right)^{1/2},$$

$$B = \frac{1}{4} - \frac{q}{\delta^2} [s^2 + (s^2 + 54q^3)^{1/2}]^{-1/3} + \frac{[s^2 + (s^2 + 54q^3)^{1/2}]^{1/3}}{2^{1/3} 3 \delta^2},$$

$$q = 2^{1/3} \delta^2 (3 + 4|a|^2), \quad s = 27 \delta^2 [1 - \delta^2 (1 + |a|^2)].$$

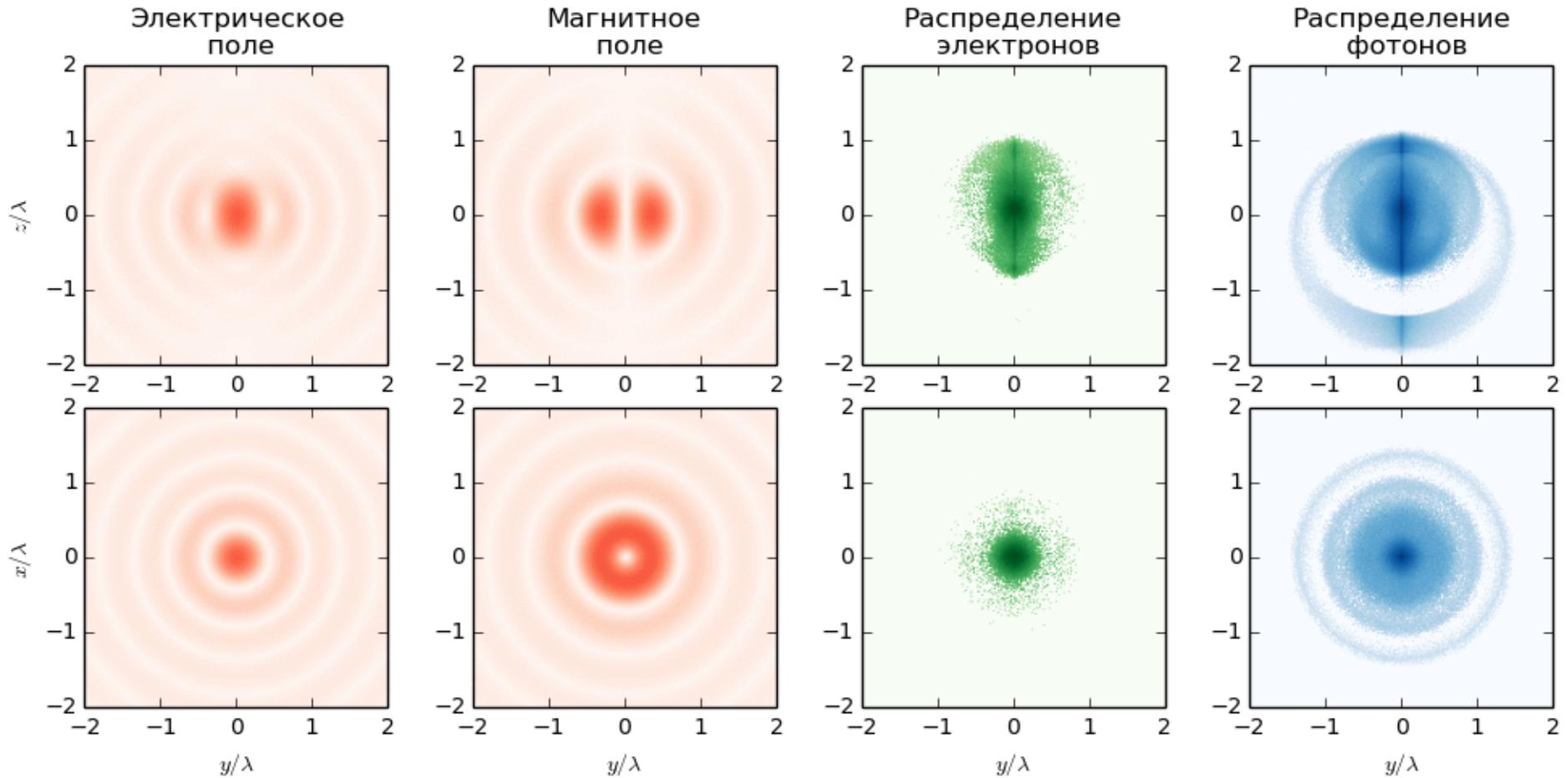
$$\delta = \frac{2e^2 \omega}{3mc^3}, \quad \text{for } \lambda = 1 \mu\text{m} \quad \delta \approx 10^{-8}$$

$$L = \int N dz \quad - \text{число пар на единицу площади}$$



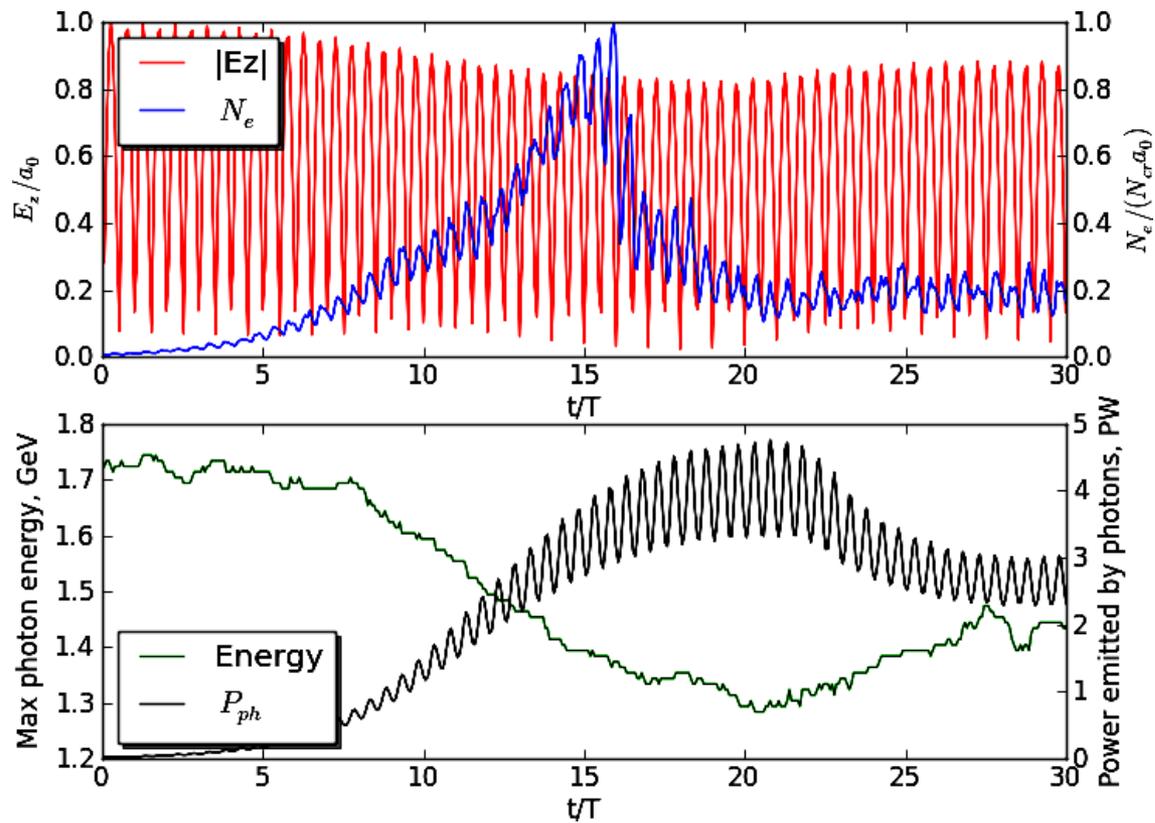
e - p плазма в сходящейся дипольной волне

$P=35$ ПВт, 15 фс:



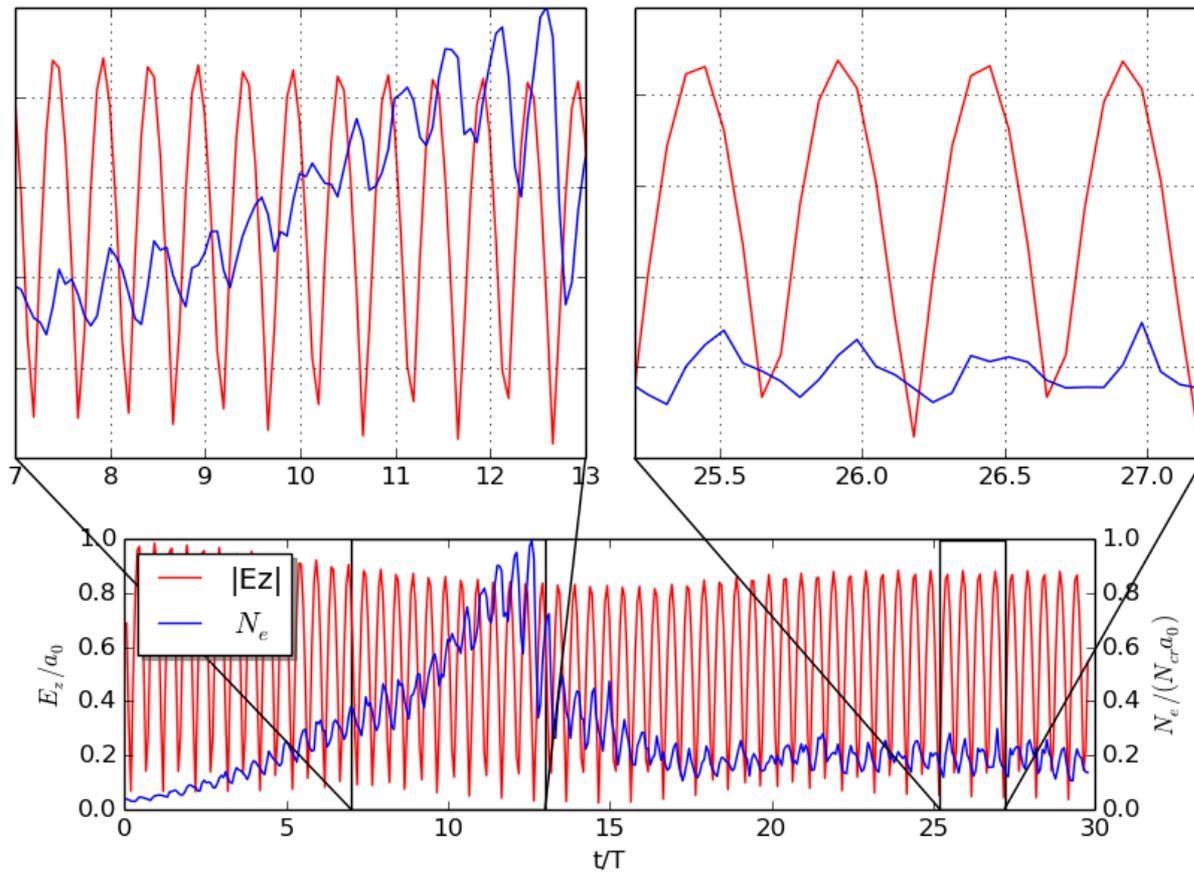
e - p плазма в сходящейся дипольной волне

9 PW, временная динамика:



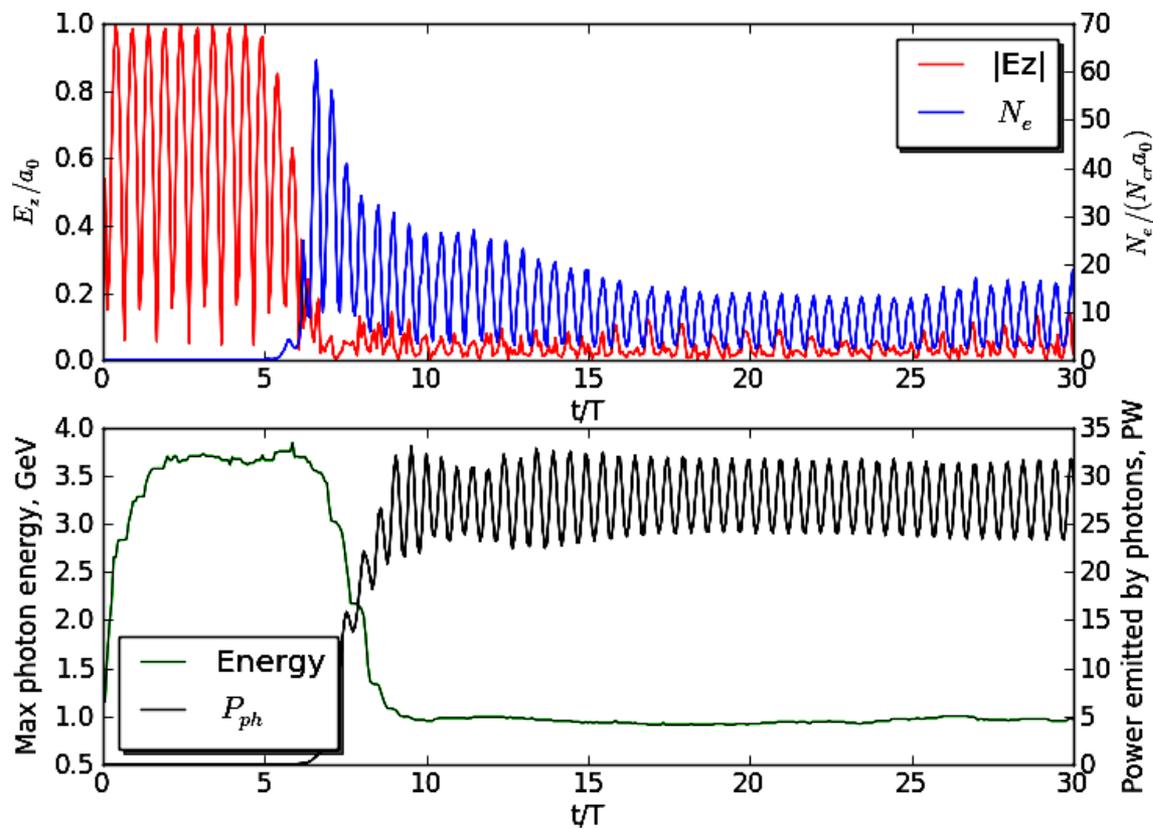
e - p плазма в сходящейся дипольной волне

9 PW, временная динамика:



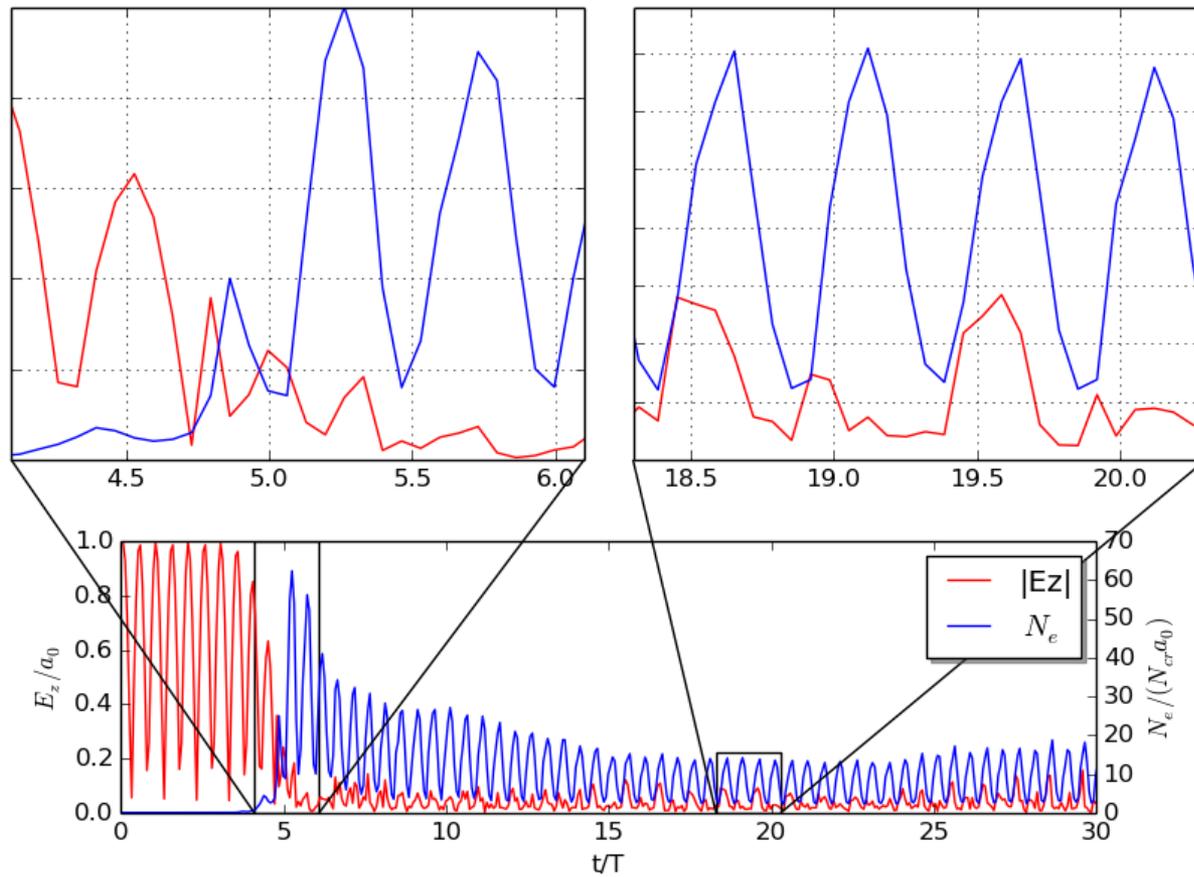
e - p плазма в сходящейся дипольной волне

35 PW, временная динамика:



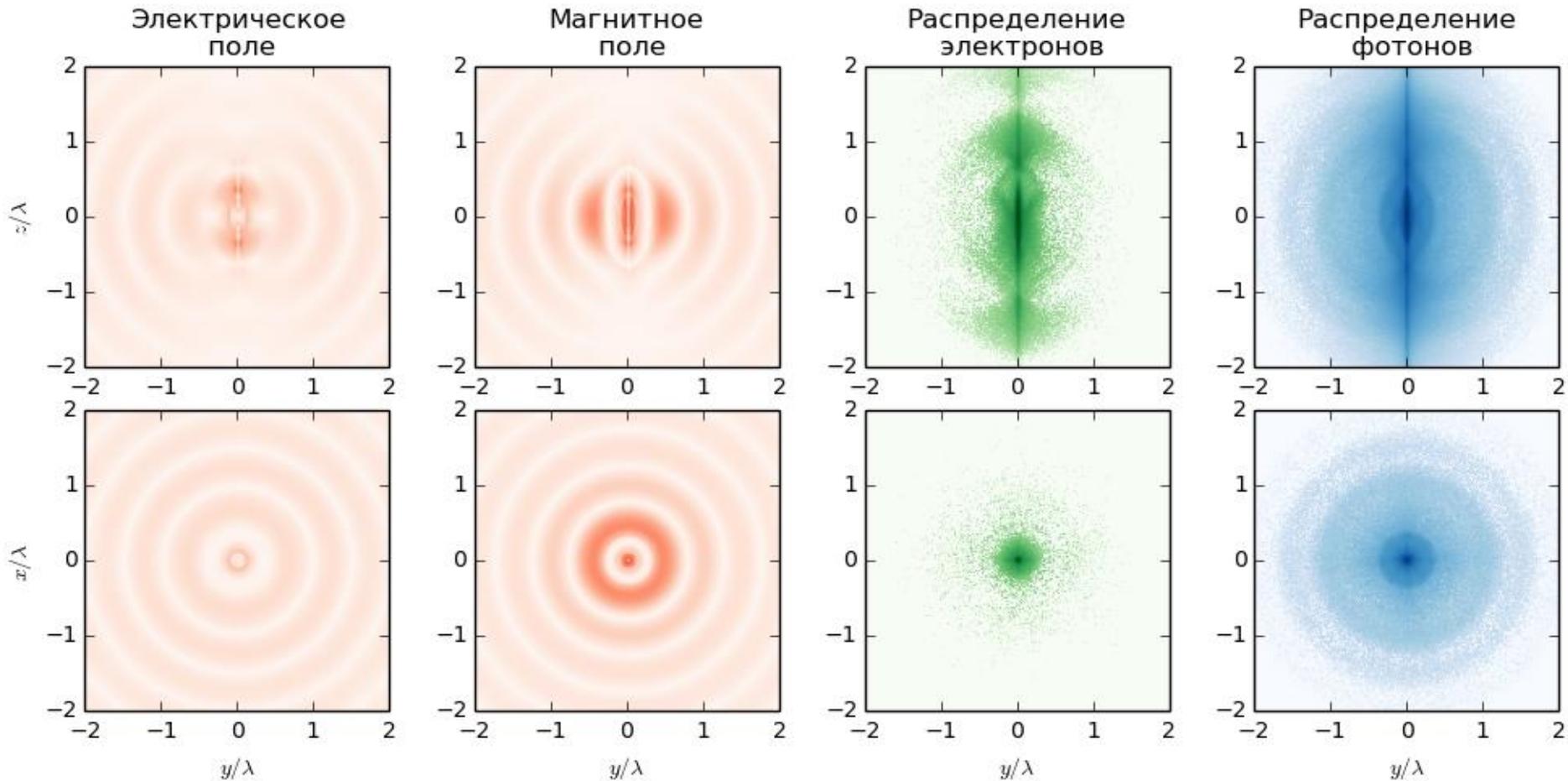
e - p плазма в сходящейся дипольной волне

35 PW, временная динамика:



e - p плазма в сходящейся дипольной волне

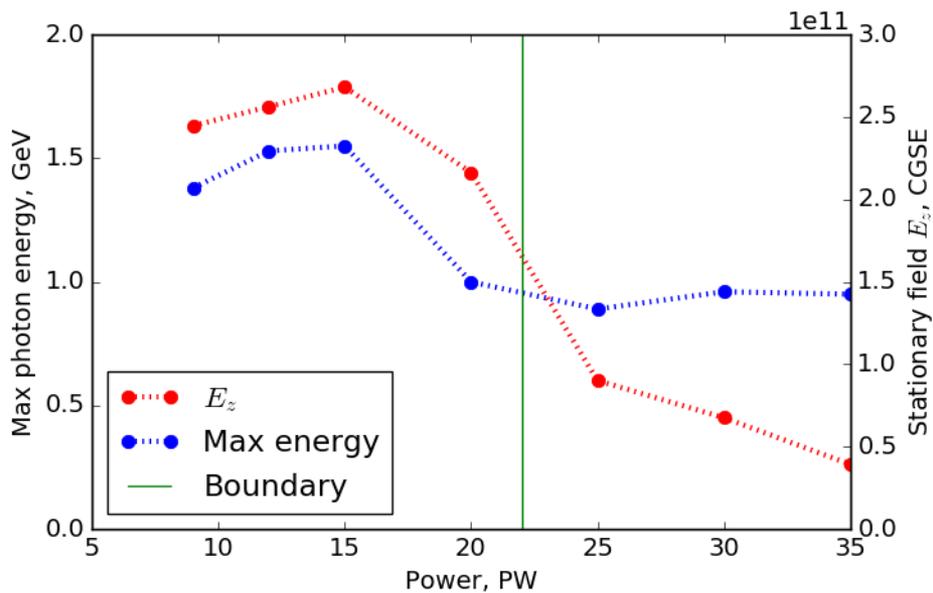
35 PW, квазистационарная стадия:



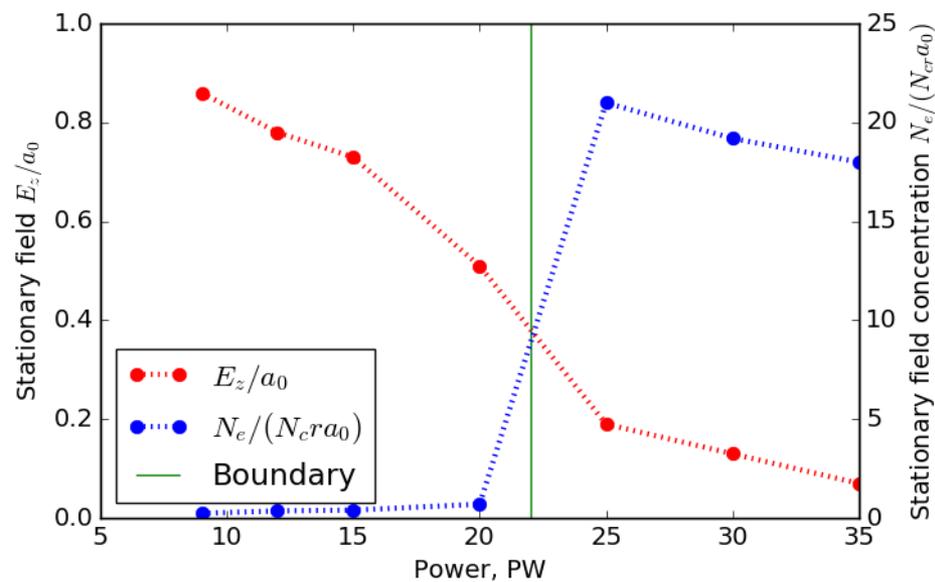
e - p плазма в сходящейся дипольной волне

Два квазистационарных режима:

1st regime 2nd regime



1st regime 2nd regime



Заключение

- Нелинейная электродинамика плазмы с учетом силы реакции излучения
 - Нелинейная диэлектрическая проницаемость
 - Точные выражения для сил, действующих на единицу объема
 - Плазменно-полевые структуры в падающих плоских волнах
- Пробой вакуума в волновых полях —
как объект нелинейной электродинамики
 - e - p лавина как ионизационная нелинейность в электромагнитных полях. Аналогия с неравновесными разрядами (СВЧ и лазерными) в волновых полях
 - Самосогласованный слой e - p плазмы в падающих плоских волнах
 - Структуры поля и плазмы в сходящейся волне дипольной конфигурации

Спасибо за внимание!