

# ИНСТРУМЕНТАРИЙ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ПЛАЗМЕННОГО КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ

Спицын Роман Игоревич,  
м.н.с. ИЯФ СО РАН, сектор 5-12,  
*«группа новых методов ускорения»,*  
*разработчики кода LCODE*  
*(рук. Лотов Константин Владимирович)*  
<https://lcode.info>

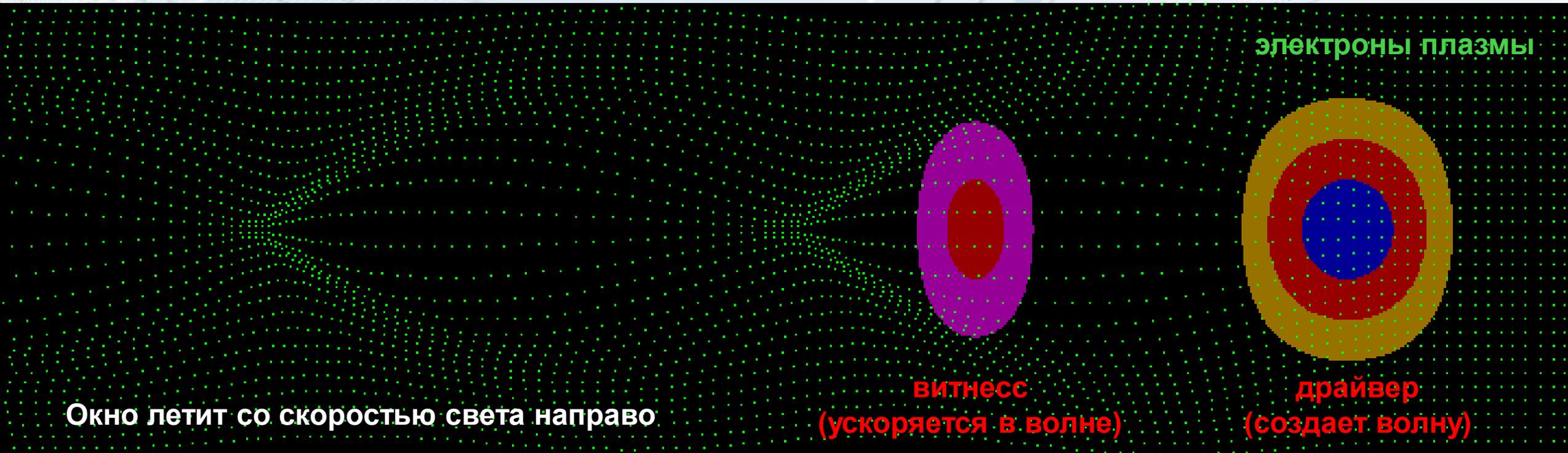
# ИНСТРУМЕНТАРИЙ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ПЛАЗМЕННОГО КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ

**ТЯЖЕЛА И НЕКАЗИСТА  
ЖИЗНЬ В ВЫЧ.МЕТОДАХ  
ПЛАЗМИСТА (ОСОБЕННО,  
ЕСЛИ ОН НЕ СОВСЕМ  
ПЛАЗМИСТ)**

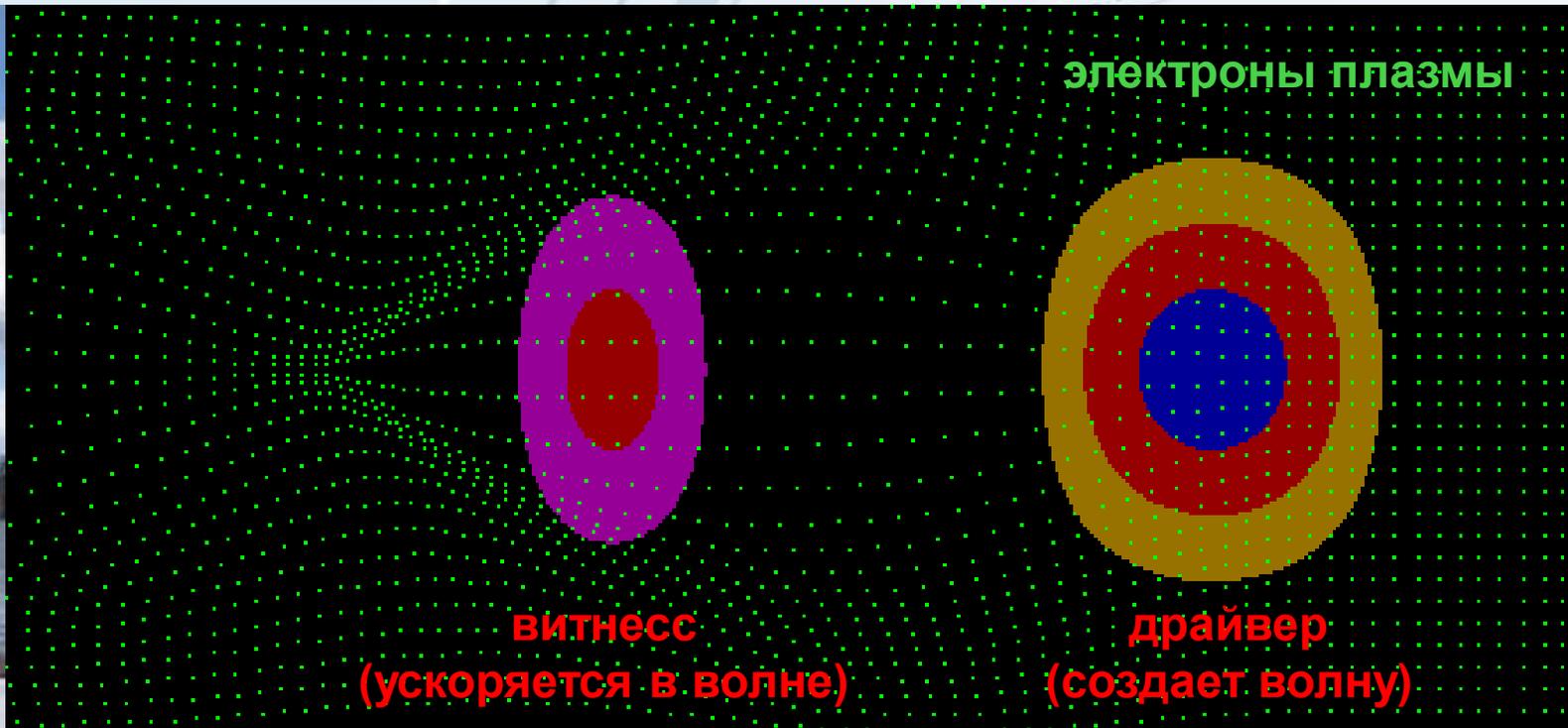
Спицын Роман Игоревич,  
м.н.с. ИЯФ СО РАН, сектор 5-12,  
*«группа новых методов ускорения»,*  
*разработчики кода LCODE*  
(рук. Лотов Константин Владимирович)

<https://lcode.info>

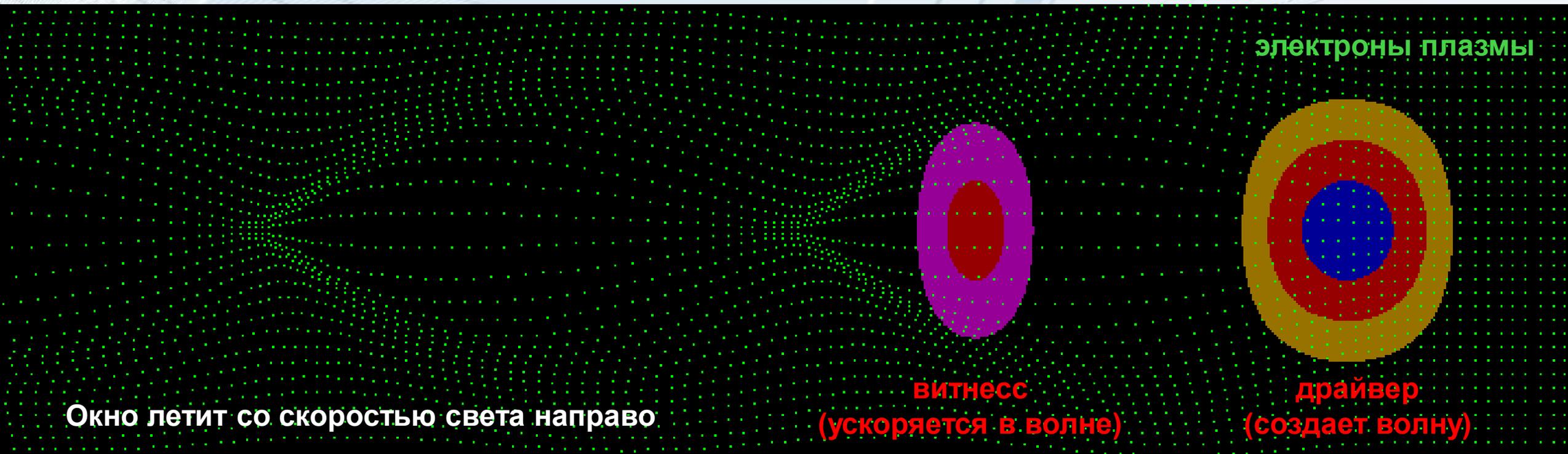
# Что такое кильватерное ускорение



# Что такое кильватерное ускорение



# Что такое кильватерное ускорение



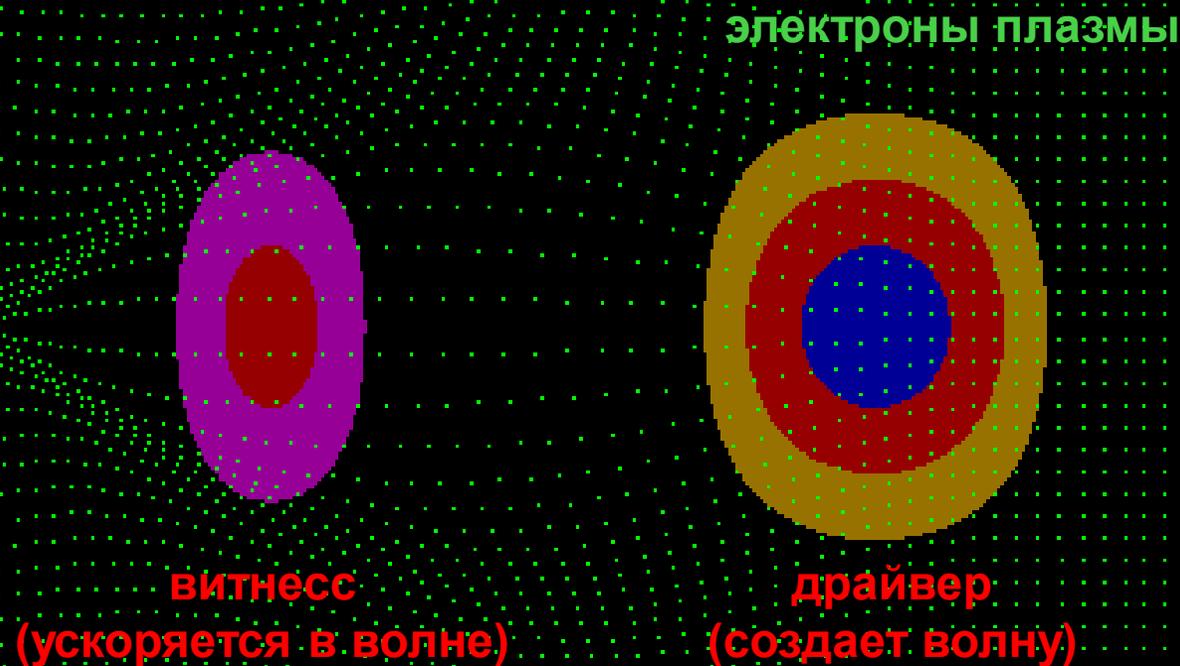
Задача масштабируется на плотность плазмы  $n_0$

Оценки для  $n_0 = 10^{16} \text{см}^{-3}$

- Поля:  $E_0 = (4\pi n_0 m c^2)^{1/2} \sim 10 \text{ ГВ/м}$
- Времена:  $\sim \omega_p^{-1} = (4\pi n_0 e^2 / m_e)^{-1/2} \sim 0,2 \text{ пс}$
- Масштабы:  $\sim c / \omega_p \sim 50 \text{ мкм}$

# Что такое кильватерное ускорение

Окно летит со скоростью света направо



Задача масштабируется на плотность плазмы  $n_0$

Оценки для  $n_0 = 10^{16} \text{см}^{-3}$

- Поля:  $E_0 = (4\pi n_0 m c^2)^{1/2} \sim 10 \text{ ГВ/м}$
- Времена:  $\sim \omega_p^{-1} = (4\pi n_0 e^2 / m_e)^{-1/2} \sim 0,2 \text{ пс}$
- Масштабы:  $\sim c / \omega_p \sim 50 \text{ мкм}$

Металл ВЧ-резонаторов:

Пробой при  $\sim 100 \text{ МВ/м}$

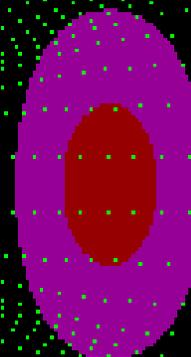
Плазма:

«У тебя не будет пробоя в материале, если материал уже разрушен»

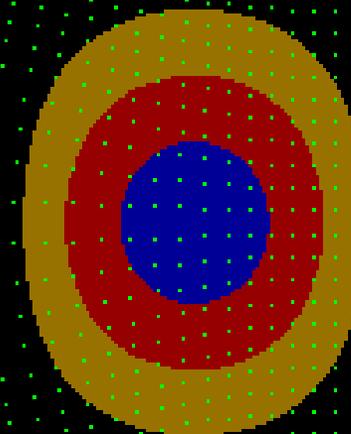


# Что такое кильватерное ускорение

электроны плазмы



**витнесс**  
(ускоряется в волне)



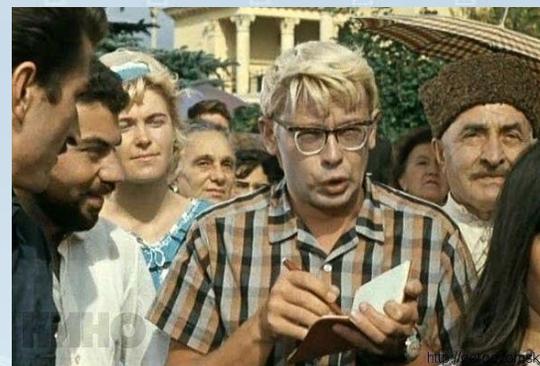
**драйвер**  
(создает волну)

Окно летит со скоростью света направо

Задача масштабируется на плотность плазмы  $n_0$

Оценки для  $n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

- Поля:  $E_0 = (4\pi n_0 m c^2)^{1/2} \sim 10 \text{ ГВ/м}$
- Времена:  $\sim \omega_p^{-1} = (4\pi n_0 e^2 / m_e)^{-1/2} \sim 0,2 \text{ пс}$
- Масштабы:  $\sim c / \omega_p \sim 50 \text{ мкм}$

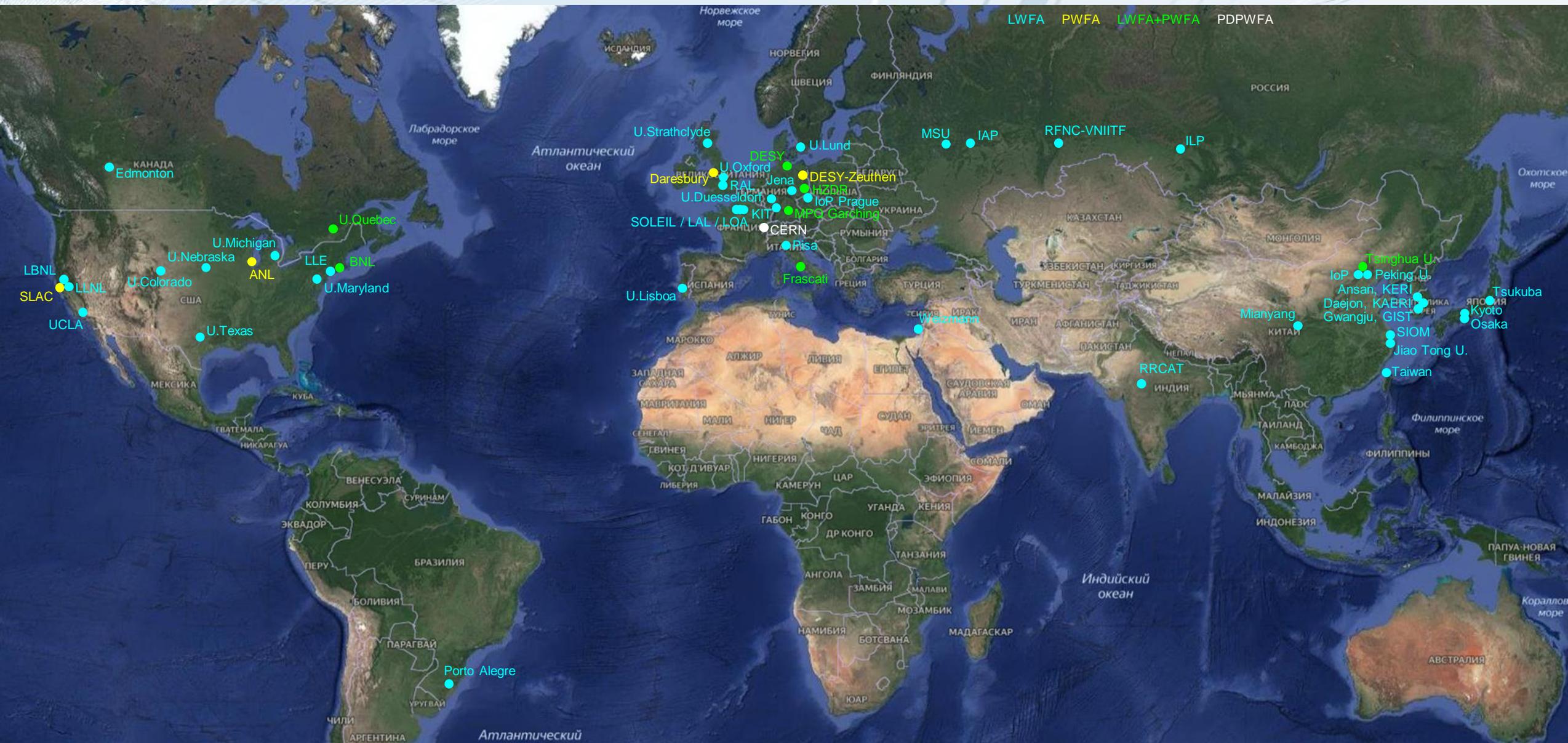


«Будьте добры, помедленее..»



Малые масштабы

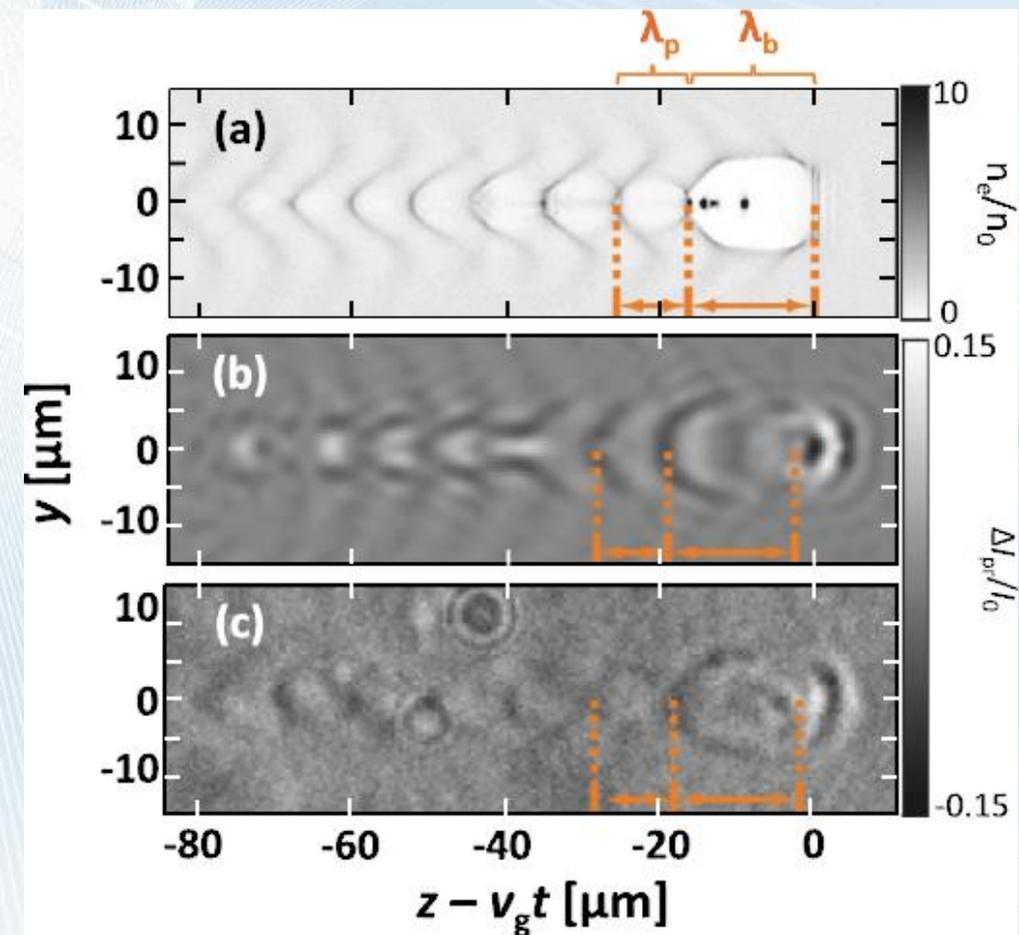
# Что такое кильватерное ускорение



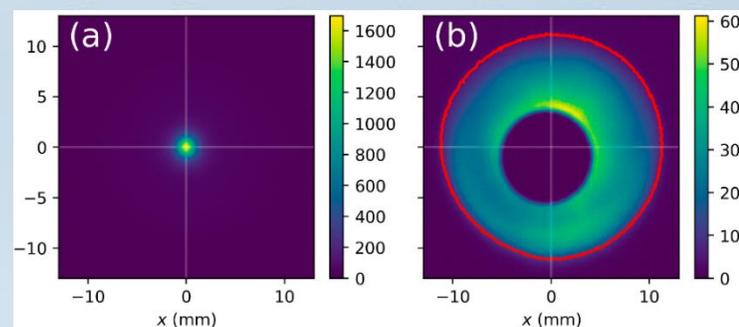
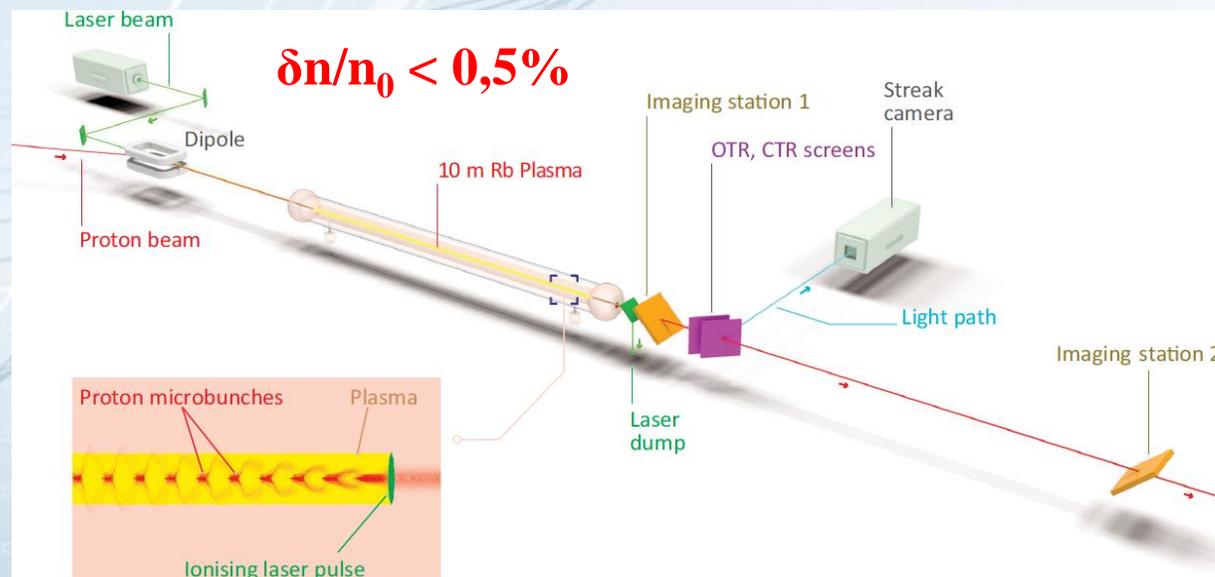
# Зачем нужно численное моделирование

Быстропротекающие процессы на малых пространственных масштабах.

«Внутрь» заглянуть не всегда возможно, анализ по вторичным и интегральным результатам.



M.C. Downer, et al., Rev. Mod. Phys. 90, 035002 (2018)



A.A. Gorn, M. Turner and AWAKE Collaboration, Plasma Phys. Control. Fusion 62, 125023 (2020).

## Прямолинейный подход: particle-in-cell (PIC) коды

Поля и движение частиц:

- уравнения Максвелла
- уравнения движения



+ Точные и полные

- Долгие и ресурсоемкие

# Как моделировать?

## Прямолинейный подход: particle-in-cell (PIC) коды

Поля и движение частиц:

- уравнения Максвелла
- уравнения движения

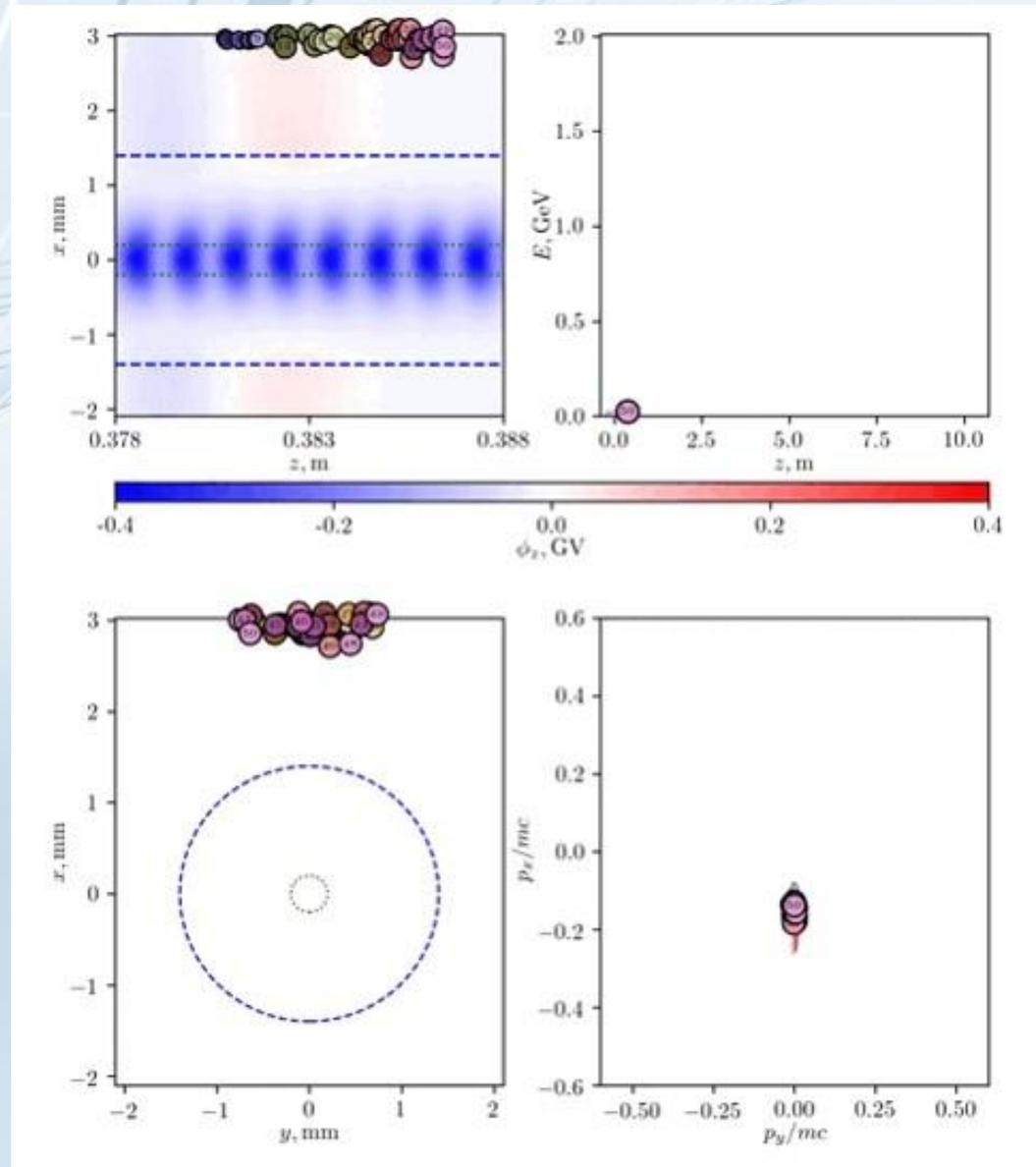


+ Точные и полные

- Долгие и ресурсоемкие

## Пример: 3D-моделирование AWAKE.

- Объяснено малое количество захваченных электронов;
- Показано отсутствие шланговой неустойчивости



N.Moschuering, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 61, 104004 (2019).

## Прямолинейный подход: particle-in-cell (PIC) коды

Поля и движение частиц:

- уравнения Максвелла
- уравнения движения

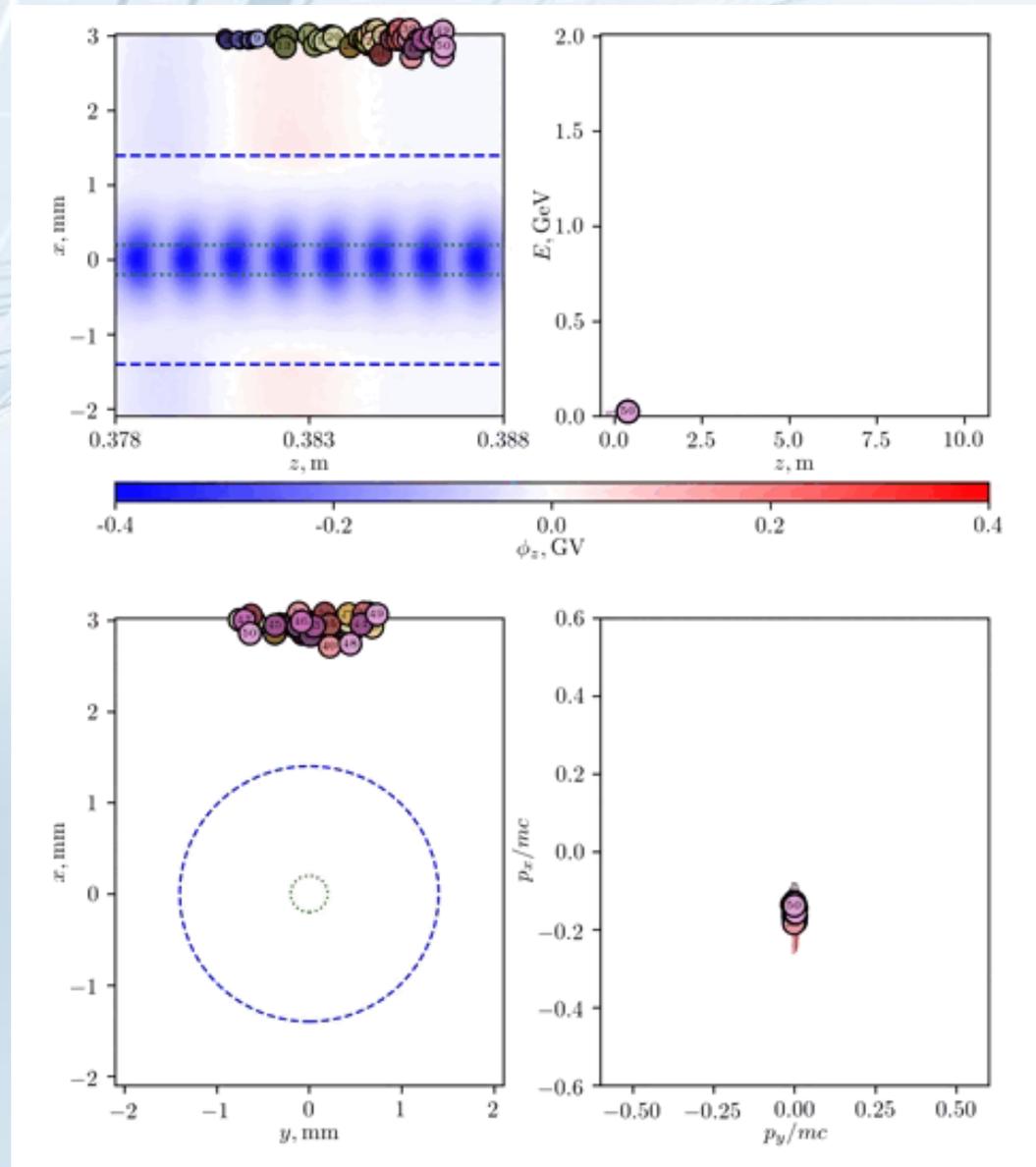


+ Точные и полные

- Долгие и ресурсоемкие

## Пример: 3D-моделирование AWAKE.

- Объяснено малое количество захваченных электронов;
- Показано отсутствие шланговой неустойчивости



N.Moschuering, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 61, 104004 (2019).

## Прямолинейный подход: particle-in-cell (PIC) коды

Поля и движение частиц:

- уравнения Максвелла
- уравнения движения



+ Точные и полные

- Долгие и ресурсоемкие

## Пример: 3D-моделирование AWAKE.

- Объяснено малое количество захваченных электронов;
- Показано отсутствие шланговой неустойчивости

22 миллиона процессорных часов

**220 к€**



## Прямолинейный подход: particle-in-cell (PIC) коды

Поля и движение частиц:

- уравнения Максвелла
- уравнения движения



+ Точные и полные

- Долгие и ресурсоемкие

## Пример: 3D-моделирование AWAKE.

- Объяснено малое количество захваченных электронов;
- Показано отсутствие шланговой неустойчивости

22 миллиона процессорных часов

**220 к€ (только за электричество)**



## Прямолинейный подход: particle-in-cell (PIC) коды

**Моделируем движение частиц с околосветовой  
скоростью**

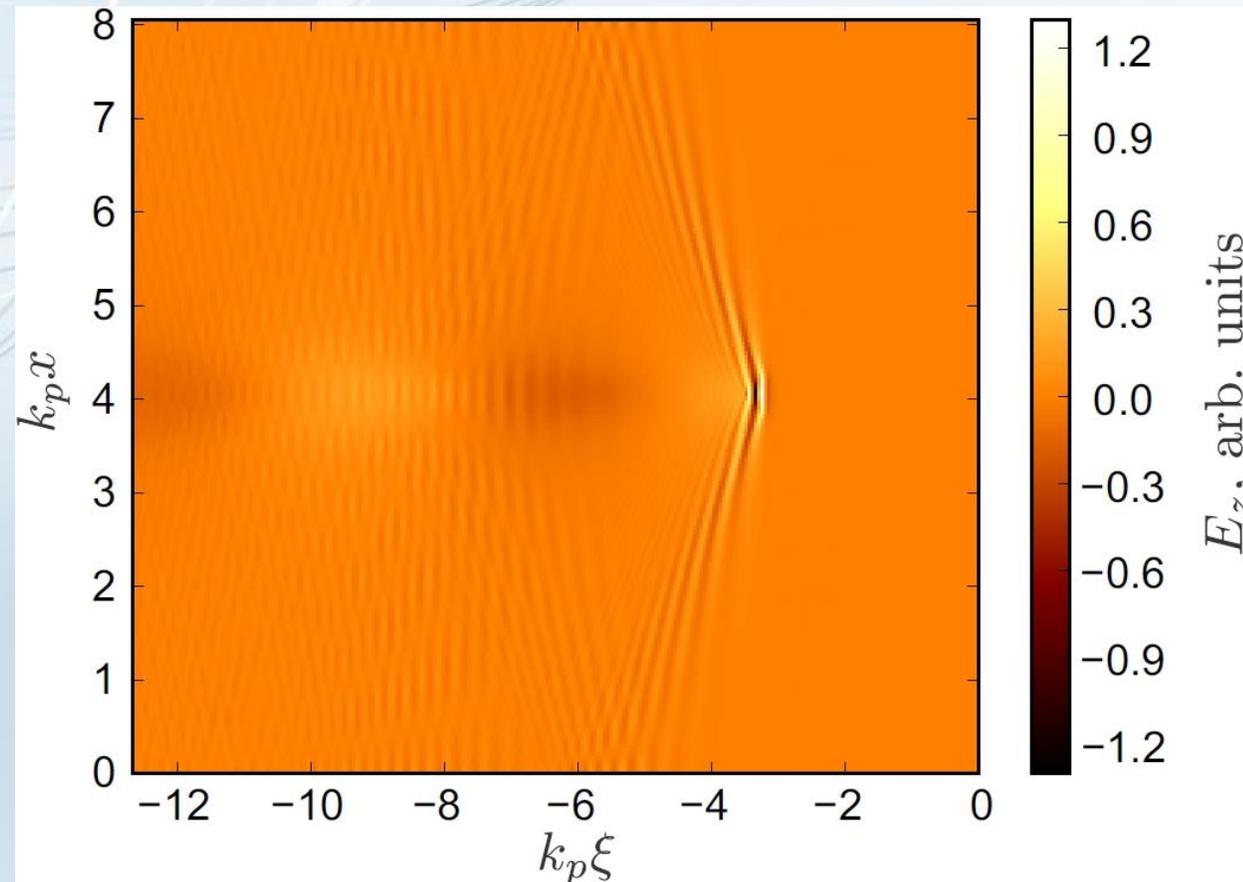
**Необходимы методы корректного расчета  
фазовой скорости волн**

## Прямолинейный подход: particle-in-cell (PIC) коды

Моделируем движение частиц с околосветовой скоростью

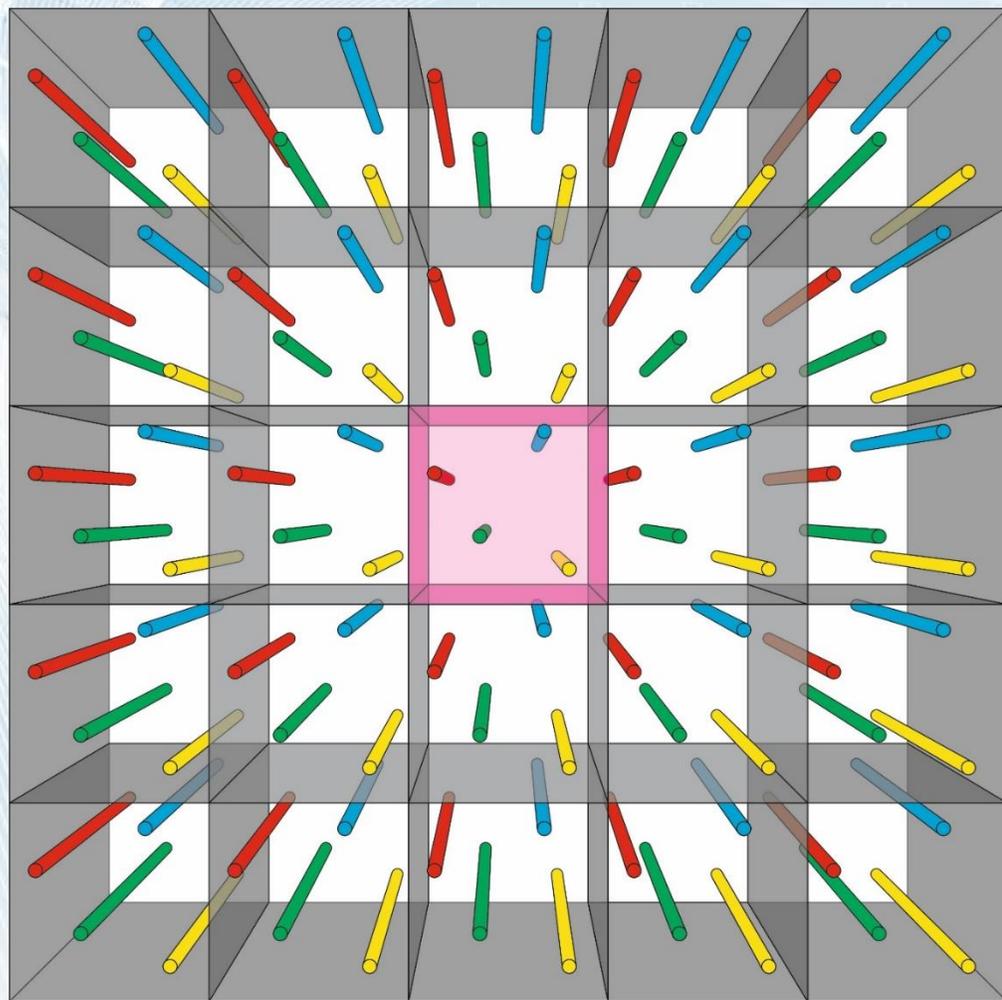
Необходимы методы корректного расчета фазовой скорости волн

**Иначе: численная черенковская неустойчивость**



N.Moschuering, et al., Phys. Plasm. 24, 103124 (2017).

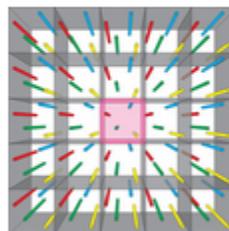
## Прямолинейный подход: particle-in-cell (PIC) коды



N.Moschuering, et al., Phys. Plasm. 24, 103124 (2017).

### Editor's Picks

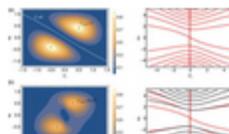
The articles listed below have been hand selected by the Editorial staff for their significance to the journal. They have been made free to download for a limited time.



**Generation of controllable plasma wakefield noise in particle-in-cell simulations**

N. Moschuering, H. Ruhl, R. I. Spitsyn, K. V. Lotov

[Read More](#)



**Linear coupling of the fast extraordinary wave to electrostatic plasma oscillations: A revised theory**

A. G. Kutlin, E. D. Gospodchikov, A. G. Shalashov

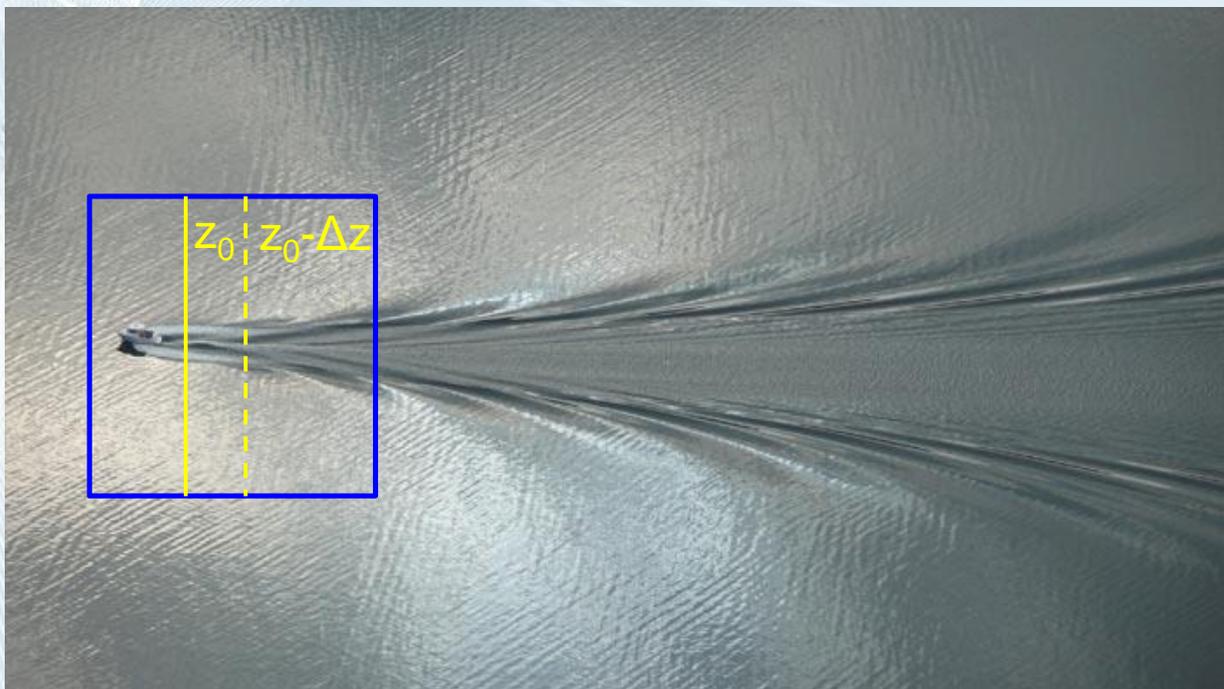
**Не стесняйтесь рисовать интересные пояснительные картинки.**

**Можно попасть в «выбор редакции».**

**Мелочь, а приятно =)**

## Специализированные модели: квазистатическое приближение

Используем факт, что форма драйвера меняется медленно.



Каждый «слой» жидкости, встреченный катером, ведет себя одинаково, хотя и с разной временной задержкой. Отследим его динамику лишь единожды, на примере слоя  $z_0$ .

Вводим сопутствующую координату  $\xi = z - ct$ . В качестве состояния соседних слоев возьмем состояния нашего слоя в другие моменты времени.

Закон изменения «нашего» слоя жидкости зависит от его состояния в «будущем» (связь запрятана внутри  $\xi = z - ct$ ).

Сделать устойчивую разностную схему для квазистатики – искусство.

В мире 7 квазистатических кодов (WAKE, **L**CODE, QuickPIC, INF&RNO, HiPace, QV3D, WAND-PIC).

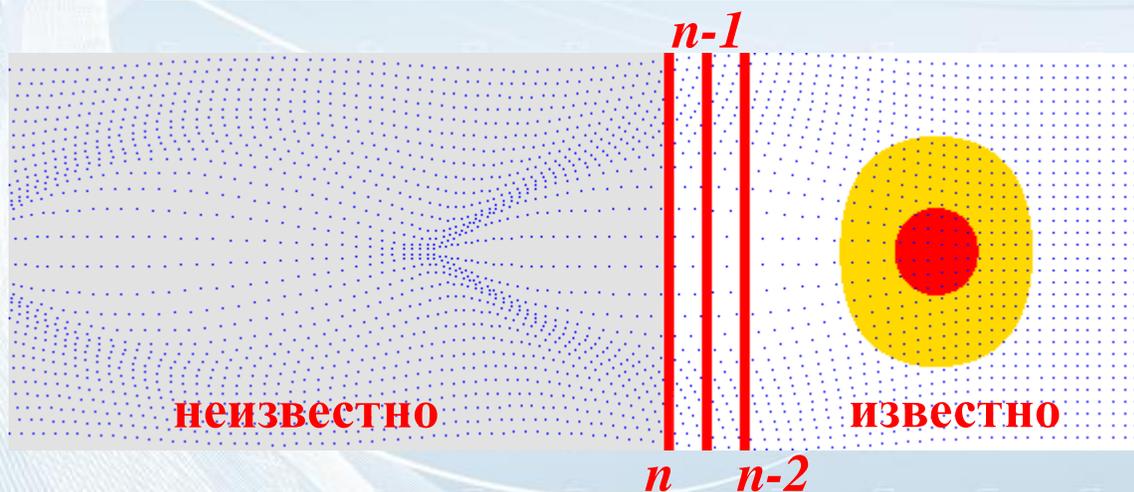
## Уравнение эволюции вектор-потенциала лазерного импульса в квазистатическом приближении

$$\left[ \frac{2}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left( ik_0 + \frac{\partial}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x_{\perp}^2} \right] A_{\perp}(\xi, x_{\perp}, t) = k_p^2 \frac{\bar{n}}{n_0 \bar{\gamma}} A_{\perp}(\xi, x_{\perp}, t)$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{1 + \frac{1}{m_e^2 c^2} \left( |\vec{p}|^2 + \left| \frac{e}{c} A_{\perp} \right|^2 \right)}$$

## Уравнение эволюции вектор-потенциала лазерного импульса в квазистатическом приближении

$$\left[ \frac{2}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left( ik_0 + \frac{\partial}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x_{\perp}^2} \right] A_{\perp}(\xi, x_{\perp}, t) = k_p^2 \frac{\bar{n}}{n_0 \bar{\gamma}} A_{\perp}(\xi, x_{\perp}, t)$$

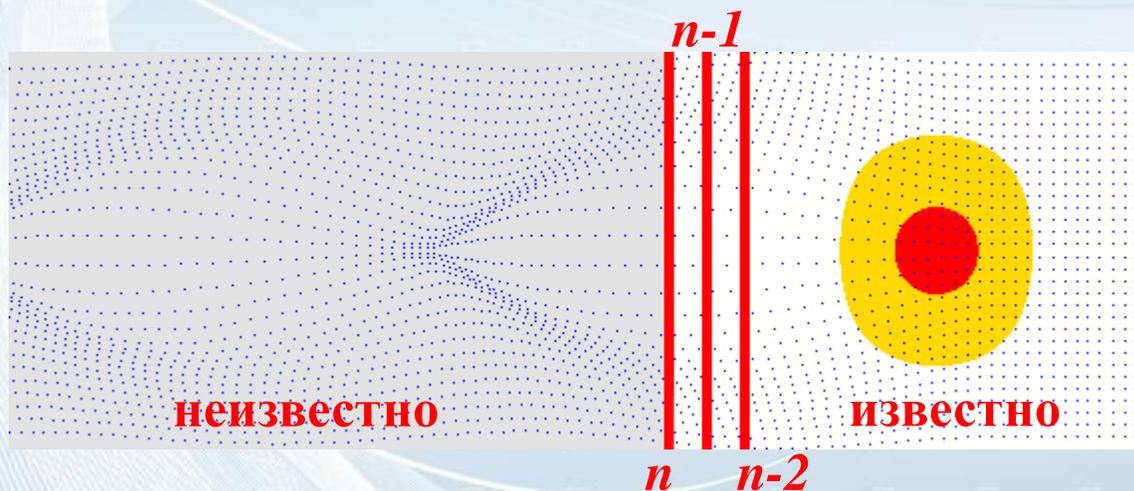


$$\bar{\gamma} = \sqrt{1 + \frac{1}{m_e^2 c^2} \left( |\vec{p}|^2 + \left| \frac{e}{c} A_{\perp} \right|^2 \right)}$$

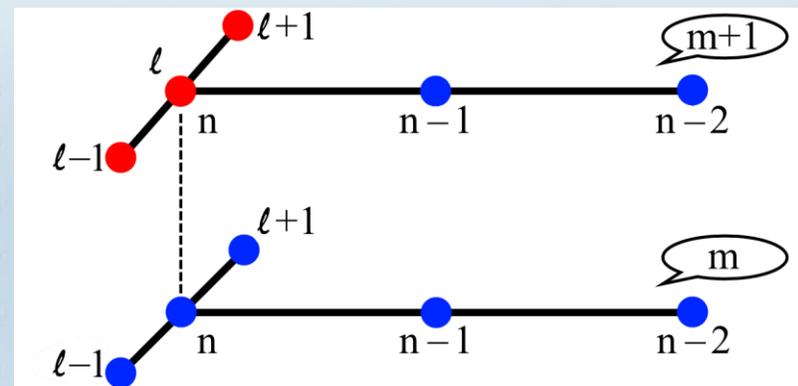
# Модель лазерного импульса

## Уравнение эволюции вектор-потенциала лазерного импульса в квазистатическом приближении

$$\left[ \frac{2}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left( ik_0 + \frac{\partial}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x_{\perp}^2} \right] A_{\perp}(\xi, x_{\perp}, t) = k_p^2 \frac{\bar{n}}{n_0 \bar{\gamma}} A_{\perp}(\xi, x_{\perp}, t)$$



$$\bar{\gamma} = \sqrt{1 + \frac{1}{m_e^2 c^2} \left( |\vec{p}|^2 + \left| \frac{e}{c} A_{\perp} \right|^2 \right)}$$



$$\frac{\partial A(\xi_n, x_l, t_m)}{\partial \xi} = \frac{-3A_{n,l}^m + 4A_{n-1,l}^m - A_{n-2,l}^m}{2h}$$

$$\frac{\partial^2 A(\xi_n, x_l, t_m)}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \frac{A_{n,l-1}^m - 2A_{n,l}^m + A_{n,l+1}^m}{g^2} + \frac{1}{2} \frac{A_{n,l-1}^{m+1} - 2A_{n,l}^{m+1} + A_{n,l+1}^{m+1}}{g^2}$$

# Модель лазерного импульса

времени, и на неизвестном. В то же время, в работе [10] было отмечено, что простые разностные схемы для продольной производной (правая, левая или симметричная) дают неустойчивые численные решения.

ритма, которому посвящен этот раздел, была выбрана разностная схема

$$\frac{\partial A(\xi_n, x_l, t_m)}{\partial \xi} = \frac{-3A_{n,l}^m + 4A_{n-1,l}^m - A_{n-2,l}^m}{2h}. \quad (19)$$

формулы (19), преобразуется в явную схему, поскольку первые две точки можно задать известными (например, они находятся там, где точно нет лазерного импульса — первые два столбца сетки), и тогда одна точка на

Если теперь в уравнении (15) расписать поперечный лапласиан (например, для декартовой системы координат) по схеме Кранка-Николсона

$$\frac{\partial^2 A(\xi_n, x_l, t_m)}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \frac{A_{n,l-1}^m - 2A_{n,l}^m + A_{n,l+1}^m}{g^2} + \frac{1}{2} \frac{A_{n,l-1}^{m+1} - 2A_{n,l}^{m+1} + A_{n,l+1}^{m+1}}{g^2}, \quad (20)$$

что верно всегда, независимо от параметров сетки, плазмы или лазерного импульса. Следовательно, алгоритм является абсолютно устойчивым.

Discretization of the longitudinal derivative,  $\partial_\zeta$  (second term in equation (2)), requires particular care in order to design an accurate and efficient solver. In a code based on a

one presented in figure 1 for  $\tau = 1500$ . Longitudinal derivatives are computed using a 2nd-order upwind scheme, namely  $\partial_\zeta f|_{\zeta=\zeta_j} = (-3f_j + 4f_{j+1} - f_{j+2})/2\Delta_\zeta$ . The dashed lines

all the laser-related quantities are zero. This can be easily implemented in the algorithm by adding two layers of ‘ghost’ grid points to the right of the  $\zeta = \zeta_{\max}$  boundary at a longitudinal location corresponding to  $j = N_\zeta$  and  $j = N_\zeta + 1$  (i.e., on the front of the computational domain), such that  $\hat{a}_{N_\zeta,k}^l = \hat{a}_{N_\zeta+1,k}^l = 0$ , for any  $k$  and  $l$ . On the other hand, for

$\tau = \tau_l$ ). In addition, for the  $\nabla_\perp^2$  term and for the envelope amplitude on the rhs of equation (1), we use the Crank–Nicolson method, namely  $\hat{a}|_{\tau=\tau_n} \rightarrow (\hat{a}^{n+1} + \hat{a}^{n-1})/2$ . The temporal

obtained by solving a tridiagonal system. We recall that this solver, being based on a Crank–Nicolson scheme, is unconditionally stable, i.e., there is no Courant–Friedrichs–Lewy condition restricting the time step  $\Delta_\tau$ . The choice of  $\Delta_\tau$  is

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Спицына Романа Игоревича  
(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ЛАЗЕРНОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО  
КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ

Новосибирск, 2016 год

## An accurate and efficient laser-envelope solver for the modeling of laser-plasma accelerators

C Benedetti<sup>1</sup>, C B Schroeder, C G R Geddes, E Esarey and W P Leemans

Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, United States of America

E-mail: [cbenedetti@lbl.gov](mailto:cbenedetti@lbl.gov)

Received 23 June 2017, revised 4 August 2017

Accepted for publication 31 August 2017

Published 17 October 2017



CrossMark

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Спицына Романа Игоревича  
(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ЛАЗЕРНОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО  
КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ

Новосибирск, 2016 год

## An accurate and efficient laser-envelope solver for the modeling of laser-plasma accelerators

C Benedetti<sup>1</sup>, C B Schroeder, C G R Geddes, E Esarey and W P Leemans

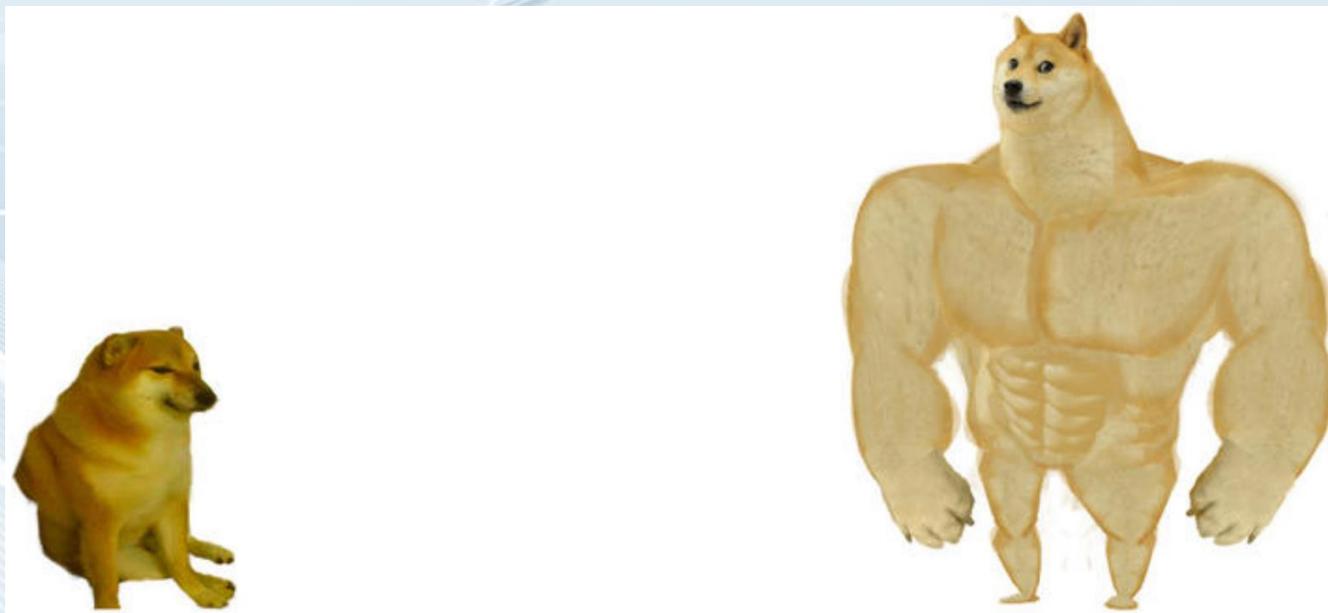
Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, United States of America

E-mail: [cbenedetti@lbl.gov](mailto:cbenedetti@lbl.gov)

Received 23 June 2017, revised 4 August 2017

Accepted for publication 31 August 2017

Published 17 October 2017



ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Спицына Романа Игоревича  
(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ЛАЗЕРНОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО  
КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ

Новосибирск, 2016 год

## An accurate and efficient laser-envelope solver for the modeling of laser-plasma accelerators

C Benedetti<sup>1</sup>, C B Schroeder, C G R Geddes, E Esarey and W P Leemans

Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, United States of America

E-mail: [cbenedetti@lbl.gov](mailto:cbenedetti@lbl.gov)

Received 23 June 2017, revised 4 August 2017

Accepted for publication 31 August 2017

Published 17 October 2017



ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Спицына Романа Игоревича  
(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ЛАЗЕРНОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО  
КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ

Новосибирск, 2016 год

## An accurate and efficient laser-envelope solver for the modeling of laser-plasma accelerators

C Benedetti<sup>1</sup>, C B Schroeder, C G R Geddes, E Esarey and W P Leemans

Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, United States of America

E-mail: [cbenedetti@lbl.gov](mailto:cbenedetti@lbl.gov)

Received 23 June 2017, revised 4 August 2017

Accepted for publication 31 August 2017

Published 17 October 2017



CrossMark



ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Спицына Романа Игоревича  
(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ЛАЗЕРНОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО  
КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ

Новосибирск, 2016 год

## An accurate and efficient laser-envelope solver for the modeling of laser-plasma accelerators

C Benedetti<sup>1</sup>, C B Schroeder, C G R Geddes, E Esarey and W P Leemans

Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, United States of America

E-mail: [cbenedetti@lbl.gov](mailto:cbenedetti@lbl.gov)

Received 23 June 2017, revised 4 August 2017

Accepted for publication 31 August 2017

Published 17 October 2017



CrossMark

**Публикуйте Ваши результаты!!!**

## О представлении результатов и пассивном залоге

— «Папа, я хочу на завтрак кукурузных хлопьев. Неужели и сегодня овсянка?»

— «Да. Мама выдвинула предположение, что ввиду похолодания будет полезно повысить температуру твоего тела путём поедания тобою овсянки. Кроме того, ввиду вышеупомянутых температурных условий твои связанные бабушкой перчатки и пальто с тёплой подкладкой и капюшоном несомненно должны быть надеты».

— «Можно посыпать овсянку сахаром?»

— «Отсутствие сахара в сахарнице, имеющейся в нашем распоряжении, отмечалось некоторое время тому назад папой. Однако в настоящее время очередная доза этого вещества доставляется мамой из кухни, где оно хранится в специально приспособленном контейнере».

Из «Конобеев Ю., Павлинчук В., Работнов Н., Турчин В., - «Физики продолжают шутить», Москва, **1968**»

## О представлении результатов и пассивном залоге

— «Папа, я хочу на завтрак кукурузных хлопьев. Неужели и сегодня овсянка?»

— «Да. Мама выдвинула предположение, что ввиду похолодания будет полезно повысить температуру твоего тела путём поедания тобою овсянки. Кроме того, ввиду вышеупомянутых температурных условий твои связанные бабушкой перчатки и пальто с тёплой подкладкой и капюшоном несомненно должны быть надеты».

— «Можно посыпать овсянку сахаром?»

— «Отсутствие сахара в сахарнице, имеющейся в нашем распоряжении, отмечалось некоторое время тому назад папой. Однако в настоящее время очередная доза этого вещества доставляется мамой из кухни, где оно хранится в специально приспособленном контейнере».

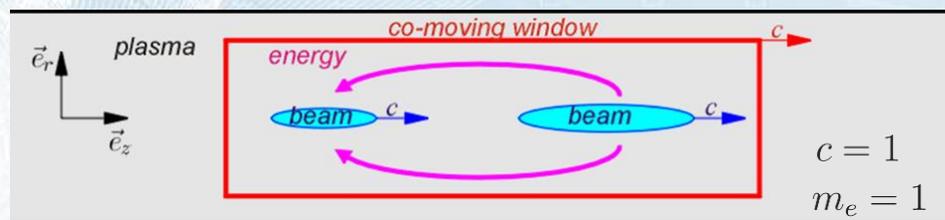
Из «Конобеев Ю., Павлинчук В., Работнов Н., Турчин В., - «Физики продолжают шутить», Москва, 1968»



Реакция науча на черновик твоей первой статьи, состоящей из пассивного залога чуть более, чем полностью

**Не переборщите**  
**с пассивным залогом!**

В численном моделировании можно отслеживать, куда и как уходит энергия в сопутствующем окне, летящем со скоростью света



Было: невозмущенная холодная плазма

Стало: драйвер создал возмущения  $\Rightarrow$

движение частиц (кин.энергия) + ЭМ поля (энергия ЭМ полей)

Поток энергии ЭМ-поля:

$$\Psi_{em}(r_m, \xi) = - \int_0^{r_m} \left( [\vec{E} \times \vec{B}]_z - \frac{E^2 + B^2}{2} \right) 2\pi r dr$$

Поток кинетической энергии:

$$\Psi_p(r_m, \xi) = - \int_0^{r_m} \sum_j (\gamma_j - 1) (\vec{v}_{jz} - \vec{e}_z) 2\pi r dr \quad (\text{по частицам})$$

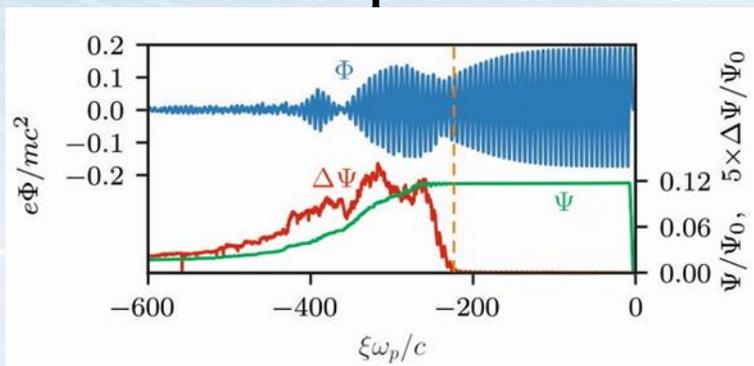
$$\Psi_f(r_m, \xi) = - \int_0^{r_m} \sum_{s=i,e} n_s (\gamma_s - 1) (\vec{v}_{sz} - \vec{e}_z) 2\pi r dr \quad (\text{по макроскопическим параметрам})$$

Опрокидывание волны  $\Rightarrow$  быстрые частицы:  $\Delta\Psi = \Psi_p - \Psi_f \neq 0$

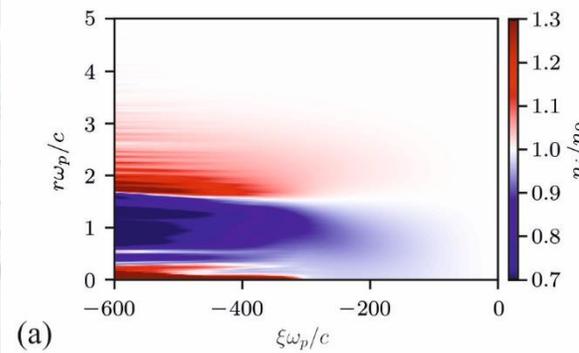
Механизм затухания волны может быть разный, но критерий универсальный:  $\Delta\Psi = \Psi_p - \Psi_f \neq 0$

## 1. Ограничение времени жизни кильватерной волны из-за движения ионов плазмы

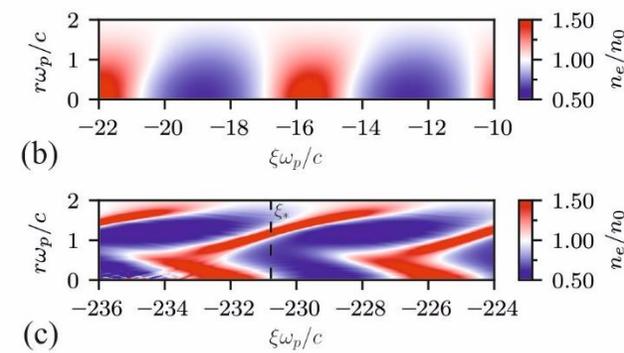
Генерация ТГц-излучения из взаимодействующих кильватерных волн встречных лазерных импульсов.



Поведение потенциала и потоков энергии



(a) Плотность ионов



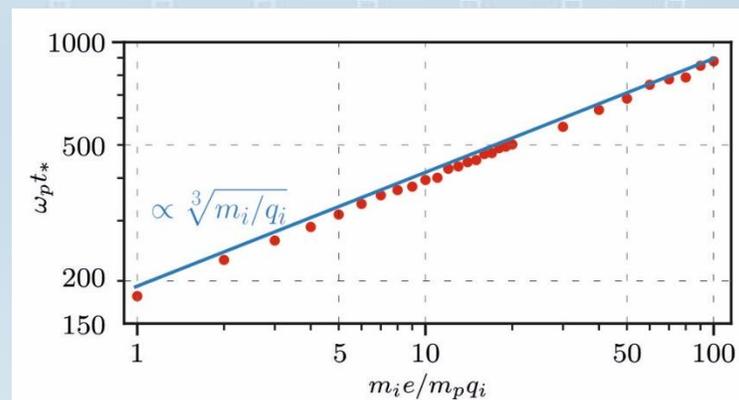
(c) Плотность электронов

## 2. Зависимость времени жизни кильватерной волны от массы ионов плазмы

L.M. Gorbunov, P. Mora, and A.A. Solodov, *Dynamics of a plasma channel created by the wakefield of a short laser pulse*.  
Phys. Plasmas 10, 1124 (2003).



Теория опрокидывания волны из-за движения ионов (но без проверки численным моделированием)



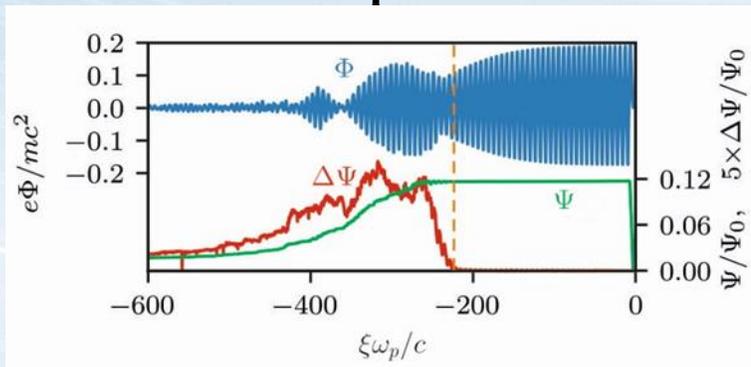
R.I. Spitsyn et al., Phys. Plasmas 25, 103103 (2018).

# Применение контроля потоков энергии

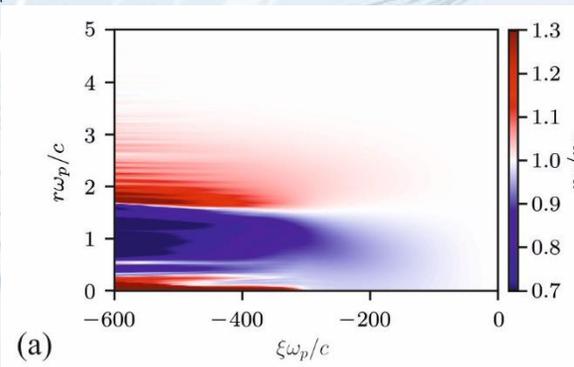
Механизм затухания волны может быть разный, но критерий универсальный:  $\Delta\Psi = \Psi_p - \Psi_f \neq 0$

## 1. Ограничение времени жизни кильватерной волны из-за движения ионов плазмы

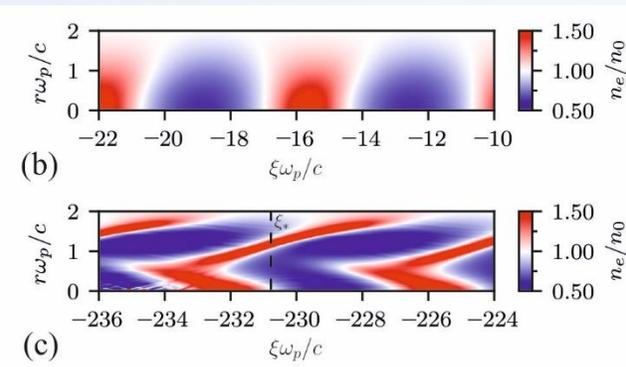
Генерация ТГц-излучения из взаимодействующих кильватерных волн встречных лазерных импульсов.



Поведение потенциала и потоков энергии



(a) Плотность ионов



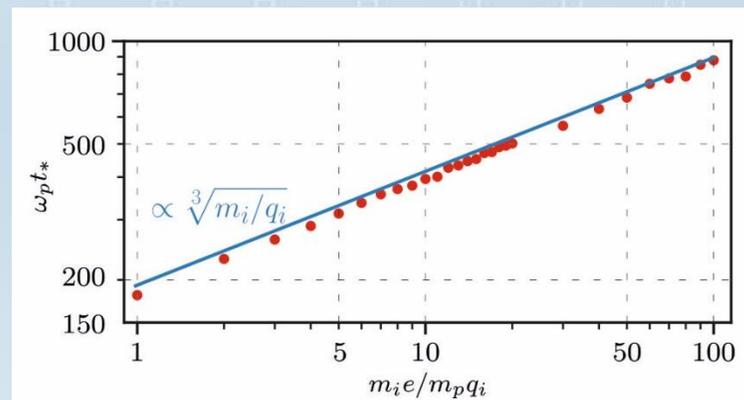
(c) Плотность электронов

## 2. Зависимость времени жизни кильватерной волны от массы ионов плазмы

L.M. Gorbunov, P. Mora, and A.A. Solodov, *Dynamics of a plasma channel created by the wakefield of a short laser pulse*. Phys. Plasmas 10, 1124 (2003).



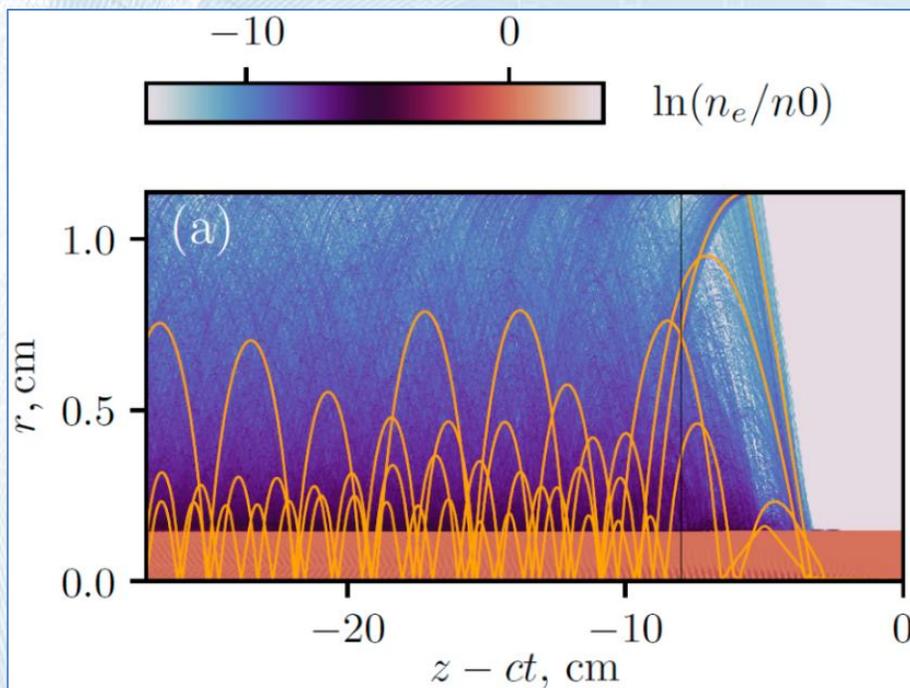
Теория опрокидывания волны из-за движения ионов (но без проверки численным моделированием)



R.I. Spitsyn et al., Phys. Plasmas 25, 103103 (2018).

**Около решаемой задачи тоже может быть интересный результат!**

# Электронное гало в эксперименте AWAKE



Распределение плотности электронов (из А.А. Gorn, M. Turner and AWAKE Collaboration, Plasma Phys. Control. Fusion 62, 125023 (2020)).



Вокруг плазмы формируется область отрицательного заряда с некоторой плотностью электронов – **электронное гало**

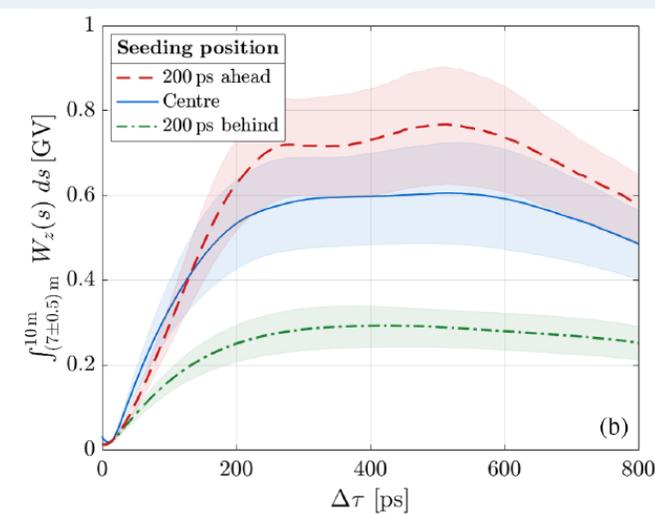
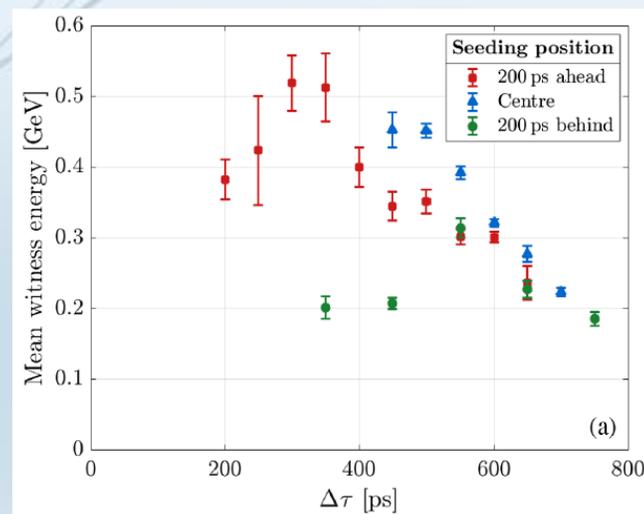
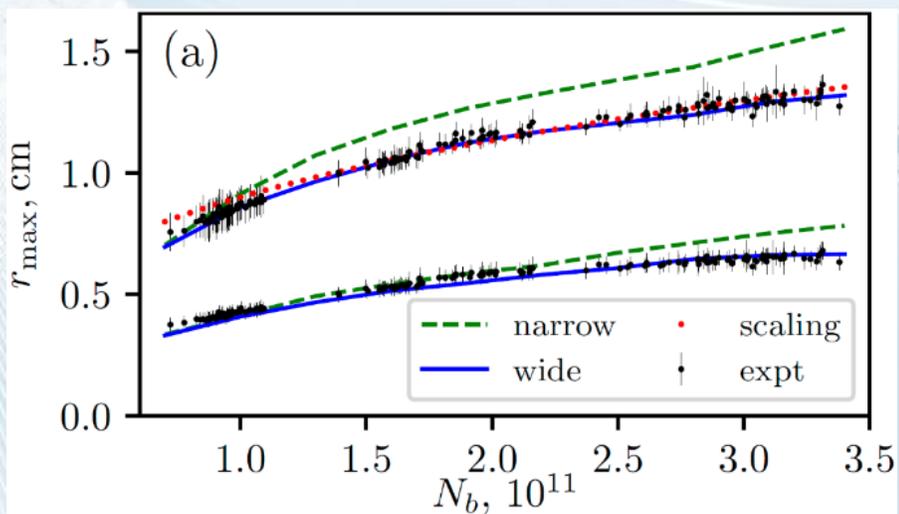
## Учет влияния электронного гало

- важен для контролируемого кильватерного ускорения в плазме  
**т.к. эффект ограничивает время жизни плазменной волны**
- накладывает дополнительные ограничения на минимальную ширину окна моделирования

Соответствие экспериментальных данных и результатов численного моделирования с учетом эффекта:

A.A. Gorn, M. Turner and AWAKE Collaboration,  
*Plasma Phys. Control. Fusion* 62, 125023 (2020).

J. Chappell and AWAKE Collaboration,  
*Phys. Rev. Accel. Beams* 24, 011301 (2021).

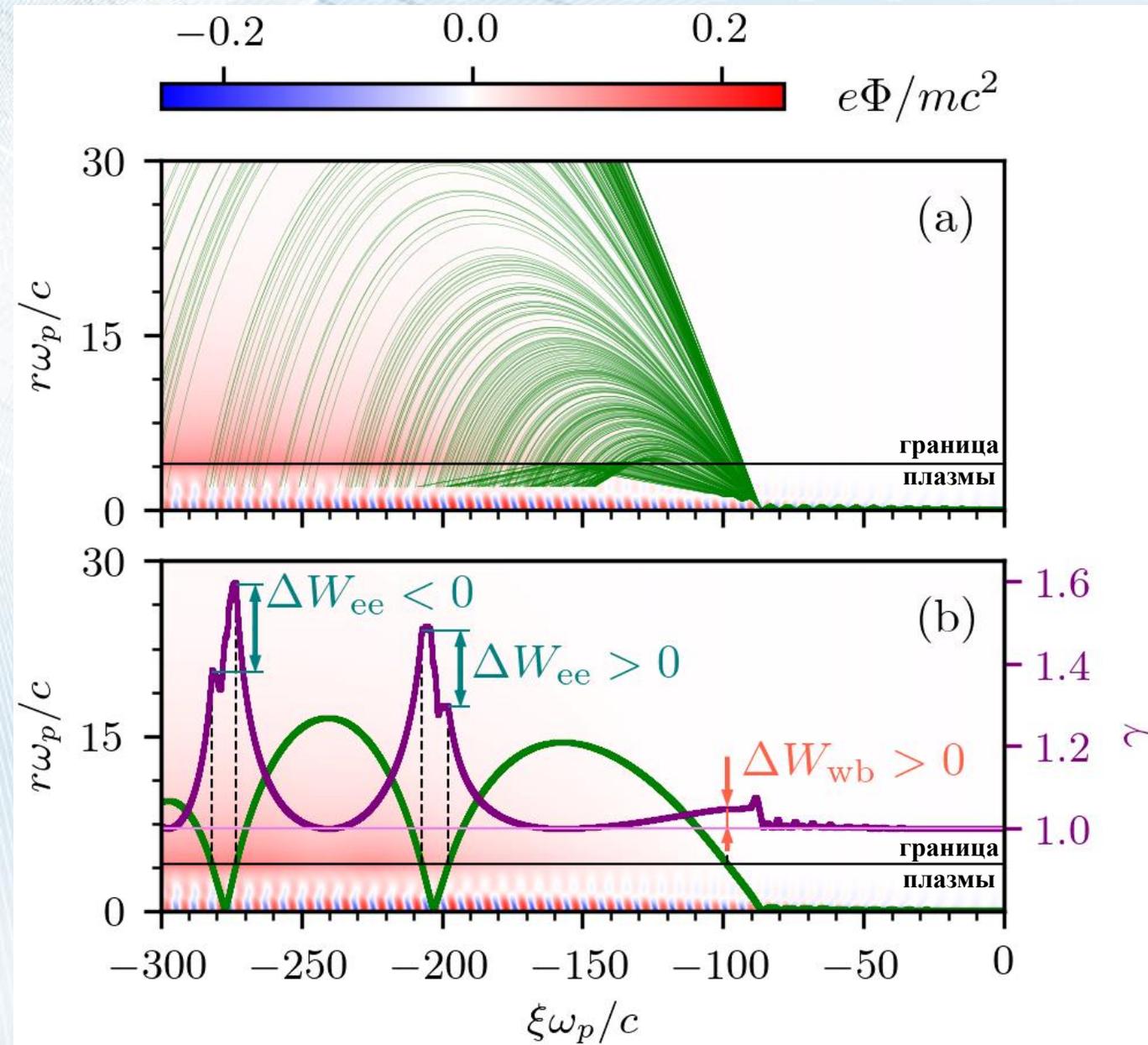


Разрушение плазменной волны  $\Leftrightarrow$  потери энергии



Требуется охарактеризовать энергообмен между плазменной волной и электронным гало

# Электронное гало в эксперименте AWAKE

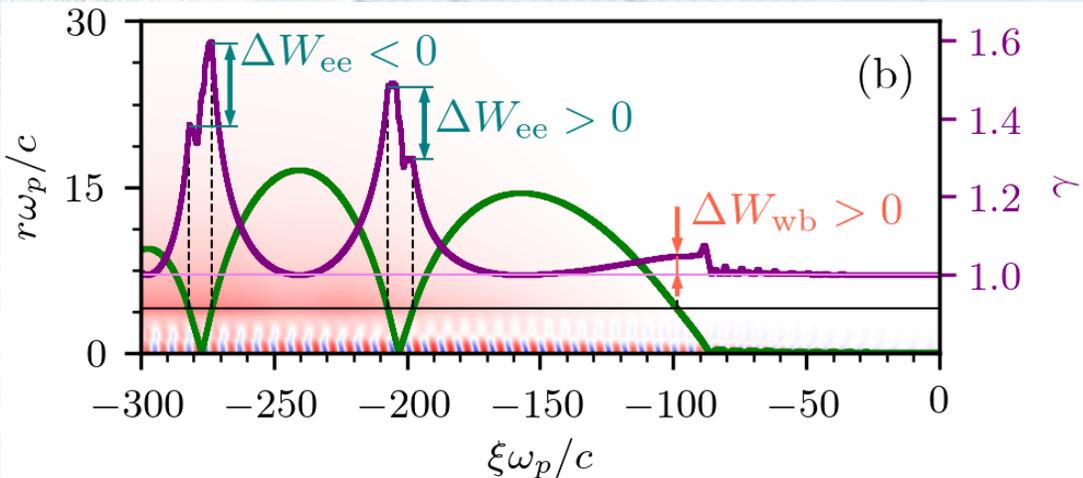


После опрокидывания волны электроны вылетают пучками как из шланга. Чем выше энергия, тем дальше отлетают. Траектории не дорисованы до конца, чтобы была видна фаза потенциала.

Корреляции между точкой вылета и точкой возвращения в плазму не наблюдается, возвращаются вроде бы в случайные фазы волны.

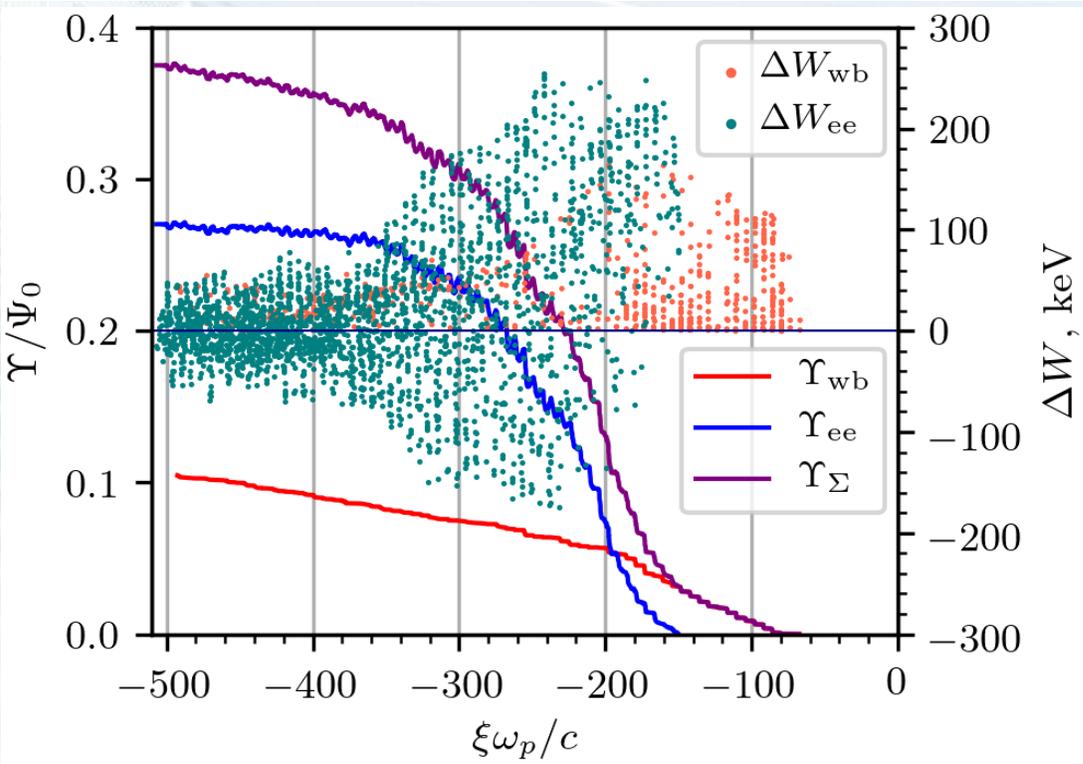
Вылетев из плазмы, электроны гало позже многократно пролетают сквозь плазменную волну, то ускоряясь (забирая энергию из волны), то замедляясь (возвращая энергию обратно).

# Энергетические процессы в электронном гало



$$\Upsilon_{wb}(\xi) = \sum_{\xi_e > \xi} \Delta W_{wb}(\xi_e) \quad \Upsilon_{ee}(\xi) = \sum_{\xi_e > \xi} \Delta W_{ee}(\xi_e)$$

$$\Upsilon_{\Sigma}(\xi) = \Upsilon_{wb}(\xi) + \Upsilon_{ee}(\xi)$$



**Ожидание (в среднем):**

- $\Upsilon_{wb}$  **нарастает**
- $\Upsilon_{ee}$  **нулевая (малая)**
- $\Upsilon_{\Sigma}$  **нарастает**

**Реальность:**

- $\Upsilon_{wb}$  **нарастает**
- $\Upsilon_{ee}$  **нарастает**
- $\Upsilon_{\Sigma}$  **нарастает резко**

**АСИММЕТРИЯ!**

# Энергетические процессы в плазменной волне

Энергия, оставляемая драйвером

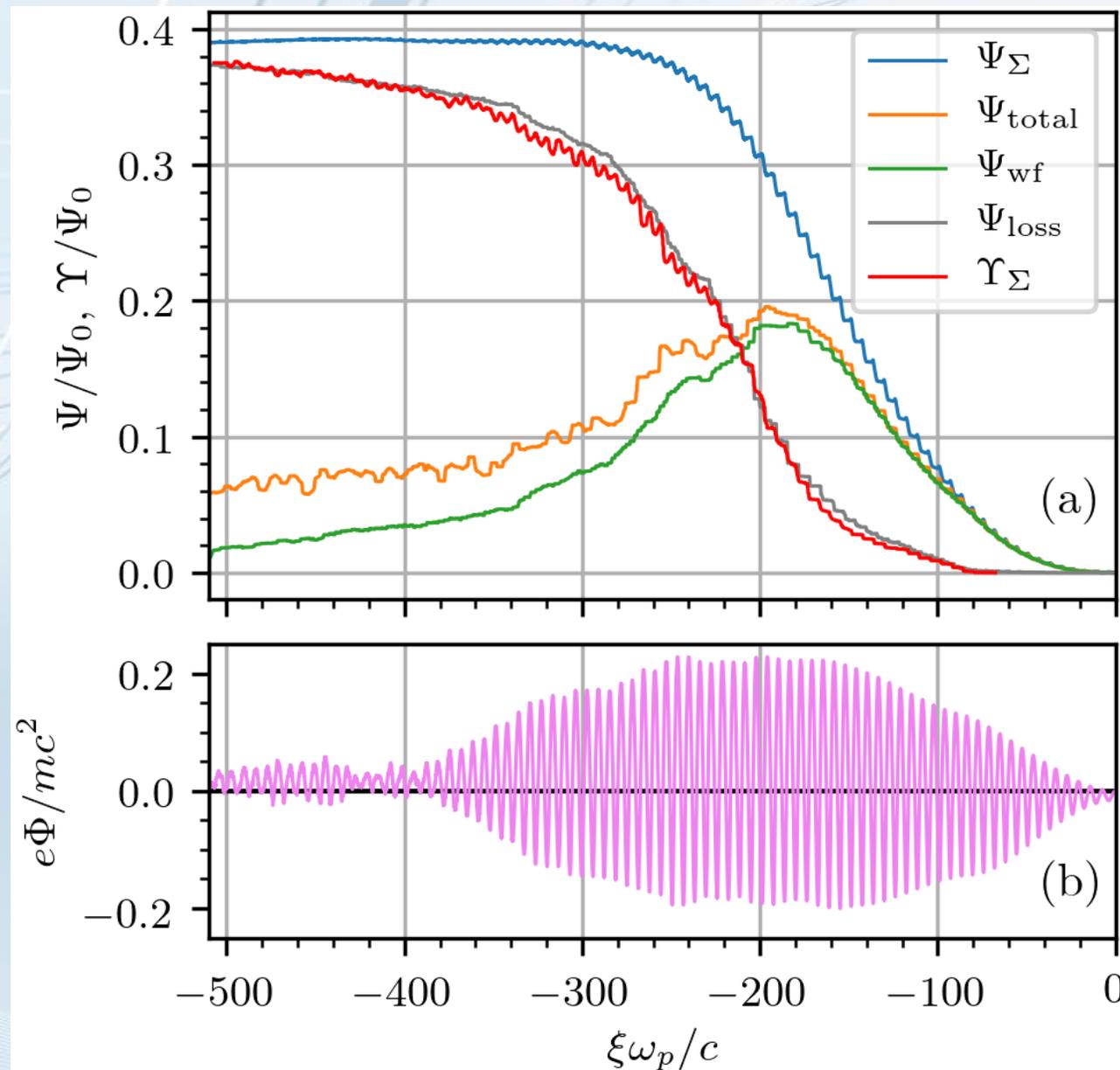
?

Энергия, переданная в волну

Энергетические потери волны = разность

$$\Psi_{loss}(\xi) \neq \Psi_{\Sigma}(\xi) - (\Psi_{em}(\xi) + \Psi_p(\xi))$$

Вклад быстрых электронов, пролетающих вблизи оси  
 (не являются «частью» волны)



# Энергетические процессы в плазменной волне

Энергия, оставляемая драйвером

?

Энергия, переданная в волну

Энергетические потери волны = разность

$$\Psi_{loss}(\xi) \neq \Psi_{\Sigma}(\xi) - (\Psi_{em}(\xi) + \Psi_p(\xi))$$

Вклад быстрых электронов, пролетающих вблизи оси  
(не являются «частью» волны)

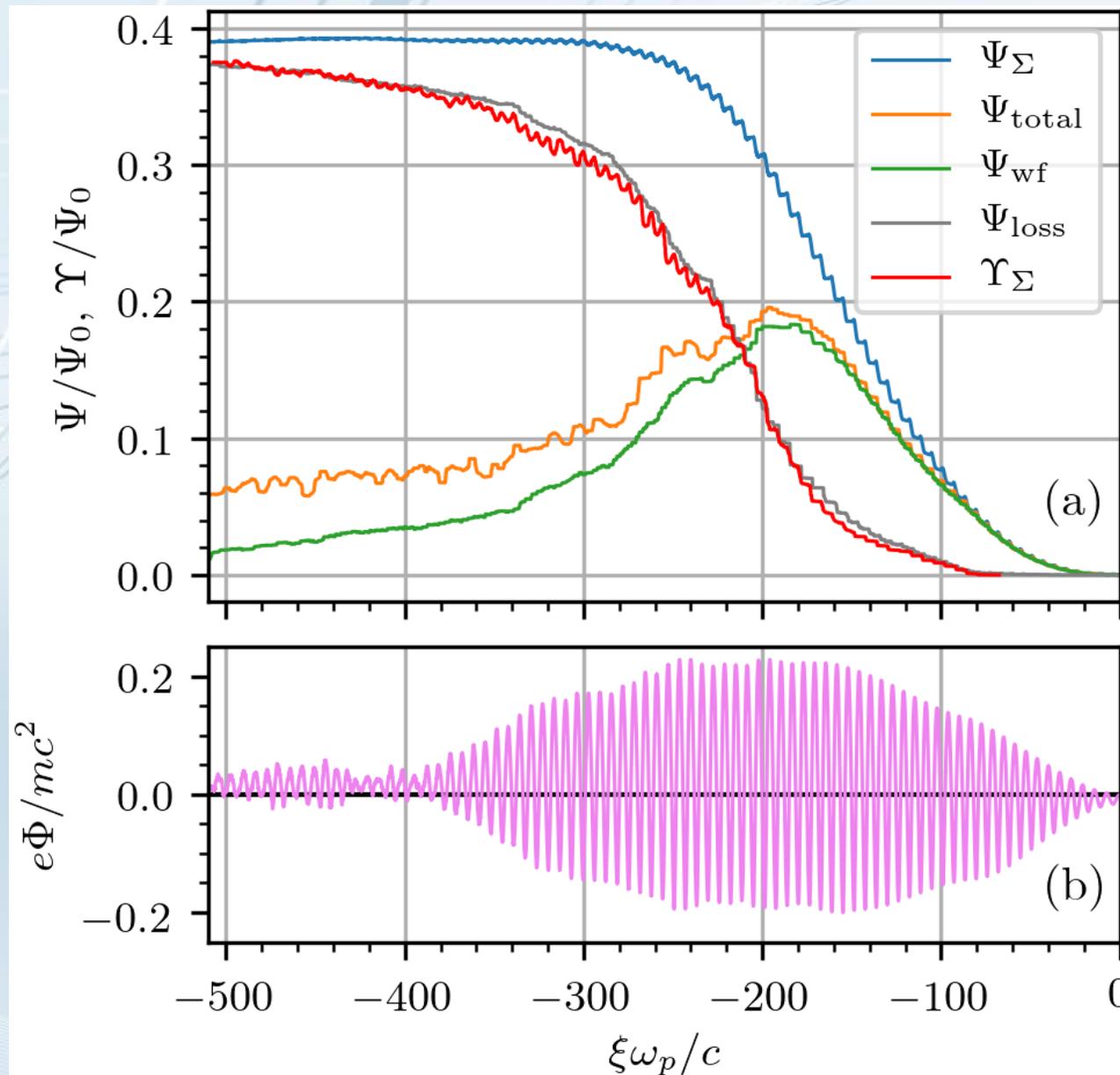
В линейной плазменной волне:

$$\langle E_{em} \rangle = \langle E_{kinetic} \rangle = \frac{1}{2} E_{total}$$



$$\Psi_{loss}(\xi) = \Psi_{\Sigma}(\xi) - 2\Psi_{em}(\xi)$$

**Полезно преподавать физику студентам!**



- 1. Публикуйте Ваши научные результаты. Иначе можно опоздать, и в диссертации будете цитировать жалкий диплом, а не прекрасную публикацию.**
- 2. Старайтесь рисовать красивые картинки для статей, это украшает представление результатов. Можно даже попасть в «выбор редакции».**
- 3. Не переборщите с пассивным залогом. Все понимают, что живой человек пишет статью, а не «статья была написана живым человеком».**
- 4. Около решаемой задачи может быть еще интересный результат. Не пропустите его.**
- 5. Вливайтесь в преподавательскую деятельность. Полезно для структурирования знаний, да и освежение знаний в памяти может помочь в научной работе.**
- 6. Постарайтесь полностью подготовить диссертацию за период аспирантуры. Потом не успеете оглянуться, и вот Вы ничего не успеваете. Хорошим людям работа найдется всегда.**

**Спасибо за внимание!**

**Спицын Роман Игоревич**



<https://lcode.info>