

Лазерная имплозия сферических микроростов в плазме с учетом КЭД-эффектов

Серебряков Д. А., к.ф.-м.н.
н.с. ИПФ РАН

Костюков И. Ю., д.ф.-м.н.
зав. отд. сверхбыстрых процессов ИПФ РАН

18 мая 2023 г.

Лазерная имплозия

Лазерная имплозия (коллапс) ионов в плазменных микрополостях — разновидность динамики ионов в облучаемых лазерными импульсами мишенях с микрополостями.

Механизм впервые рассмотрен в 2018 г. в статье Мураками и др. [*M. Murakami et al., Sci. Rep. 8 (1), 1–10 (2018)*] и в последующих публикациях японской группы.

Исследования были продолжены в рамках совместной деятельности с ИПФ РАН (в рамках российско-японского гранта РФФИ).

Физический смысл процесса:

- Лазерное поле ионизует вещество мишени, а также нагревает электроны и они заполняют микрополости
- В полостях появляется нескомпенсированный отрицательный заряд, который притягивает ионы со стенок полостей
- В результате ионы коллапсируют к центру каждой микрополости, что может приводить к формированию плотных ионных сгустков в центральных областях и сильного электрического поля в их окрестности.

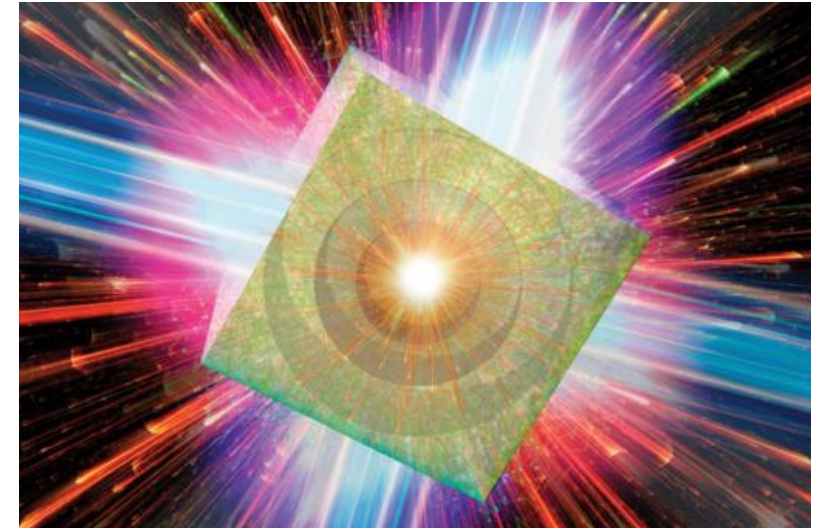


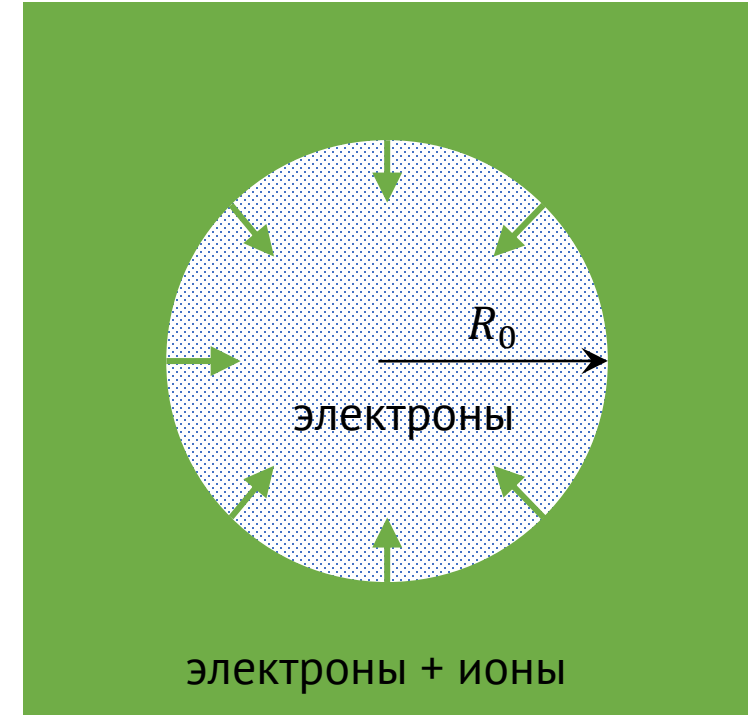
Иллюстрация облучения мишени с микрополостью интенсивными лазерными импульсами

Модель лазерной имплозии

Рассмотрим одномерную модель процесса имплозии [1, 2].

Основные предположения:

- В плазменной мишени находится полость радиуса R_0 , свободная от ионов изначально
- Температура электронов достаточно высока, так что они распределены равномерно в полости и в толще плазмы
- Динамику ионов можно рассматривать как коллапс очень тонких ионных слоев к центру под действием поля электронов в полости и поля «внутренних» ионных слоев



[1] M. Murakami et al., *Sci. Rep.* 8 (1), 1–10 (2018)

[2] M. Murakami et al., *Phys. Plasmas* 26 (4), 043112 (2019)

Модель лазерной имплозии

Из условия баланса энергии для внутреннего слоя находится минимальный радиус компрессии ионов [1]:

$$r_{min} = \frac{3n_{i0}^{2/3}}{n_{e0}}$$

$$n_i(r) = \frac{1}{6} n_{i0} \frac{R_0^2}{r^2}$$

Поле при этом описывается как [2]:

$$E_f(r) = 4E_{max} \left(\frac{r_{min}}{r} - \frac{r_{min}^2}{r^2} \right)$$

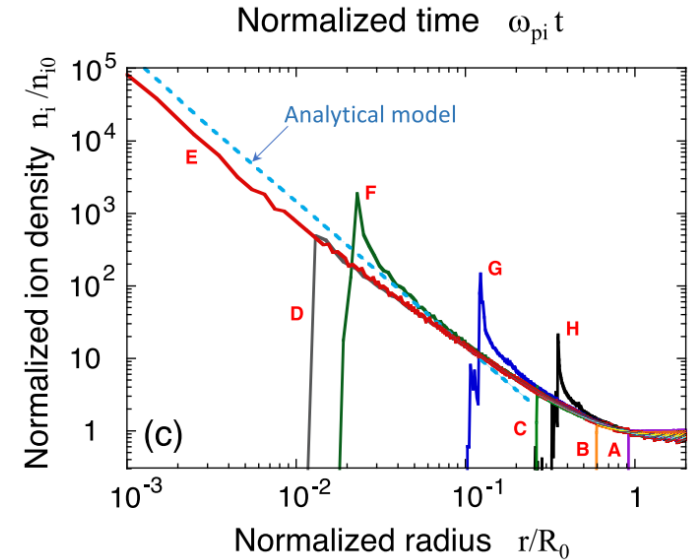
$$E_{max} \approx \frac{\pi e}{18} n_0^{4/3} R_0^2$$

(в предположении $n_{e0} \approx n_{i0} \approx n_0$, для оценки рассматриваем полностью ионизованный водород).

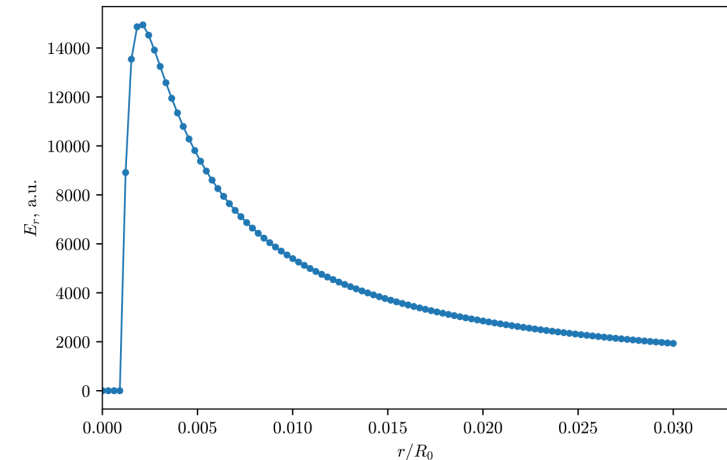
Для $R_0 = \lambda = 1 \mu m$, $n_0 \sim 10 n_{cr}$ оценка дает $E_{max} \sim 15000$ (в безразмерных единицах $a_0 = eE\lambda/2\pi mc^2$)

[1] M. Murakami et al., Sci. Rep. 8 (1), 1–10 (2018)

[2] M. Murakami et al., Phys. Plasmas 26 (4), 043112 (2019)



Радиальный профиль концентрации ионов в модели (пунктиром) и в 1D численном моделировании в различные моменты времени (A-H) из статьи [1].



Профиль электрического поля $E_f(r)$ в момент максимального сжатия

3D PIC-моделирование процесса имплозии

Полномасштабное 3D-моделирование процесса сопряжено с некоторыми сложностями.

Поскольку $E_{max} \approx \frac{\pi e}{18} n_0^{4/3} R_0^2$, для усиления поля требуется увеличивать размер полости (который может достигать порядка лазерной длины волны и выше)

При этом в рамках 1D модели $r_{min} \approx 3n_0^{1/3}$ и для типичных концентраций мишеней составляет порядка 1 нм.

Таким образом, для точного самосогласованного моделирования нужно разрешать оба пространственных масштаба и это требует больших вычислительных ресурсов.

С другой стороны, компрессия ионов до масштабов r_{min} (т.е. до типичных расстояний между ионами в плазме) является тонким эффектом и может не всегда реализовываться в 3D-геометрии.

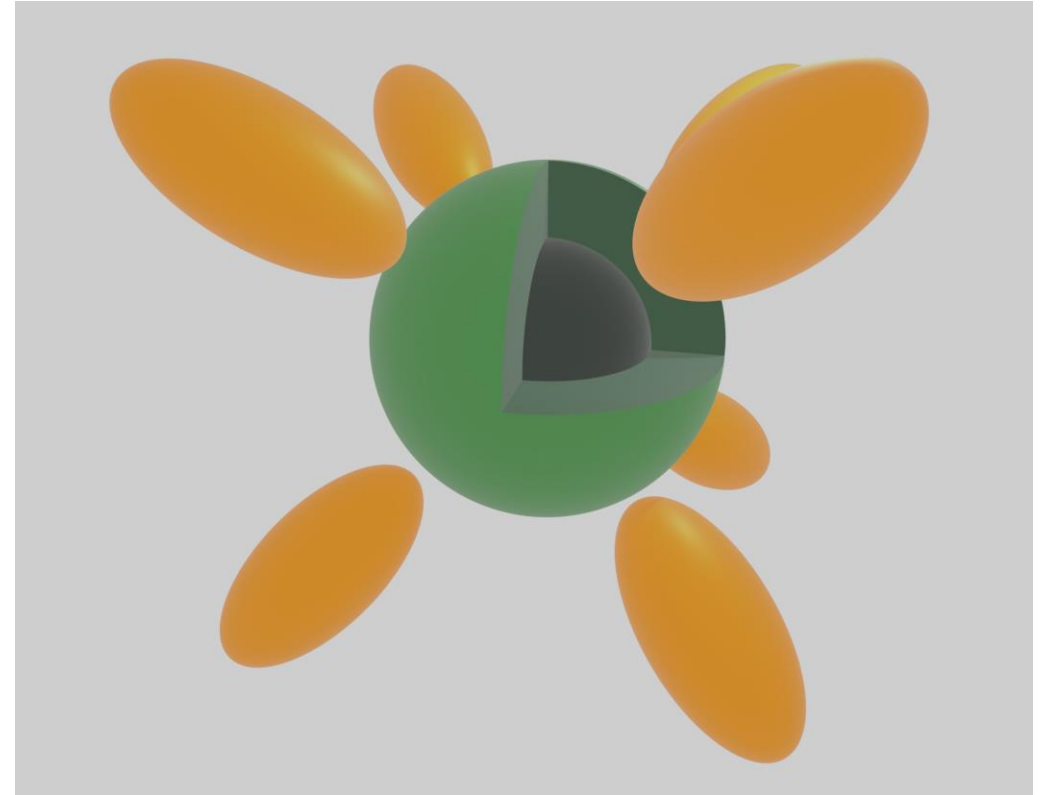
В итоге было рассмотрено 2 задачи:

1. самосогласованное полномасштабное 3D PIC-моделирование коллапса ионов и формирования ионного сгустка
2. 3D PIC-моделирование КЭД-процессов в центральной области плазмы после формирования сгустка.

Самосогласованное 3D PIC моделирование

Параметры моделирования:

- В центре расчетной области задается плазменный шар диаметром 1.2 мкм с полостью диаметром 0.6 мкм
- Материал – полностью ионизованный водород с концентрацией $n_e = 50 n_{cr}$
- Лазерные импульсы распространяются к центру, $\lambda = 1$ мкм
- Количество лазерных импульсов от 2 до 8



Д. А. Серебряков, И. Ю. Костюков. Квантовая электроника (2023), принято к публикации в спецвыпуск про XCELS.

Схема численного моделирования симметричного облучения плазменной сферы с полостью 8 лазерными импульсами

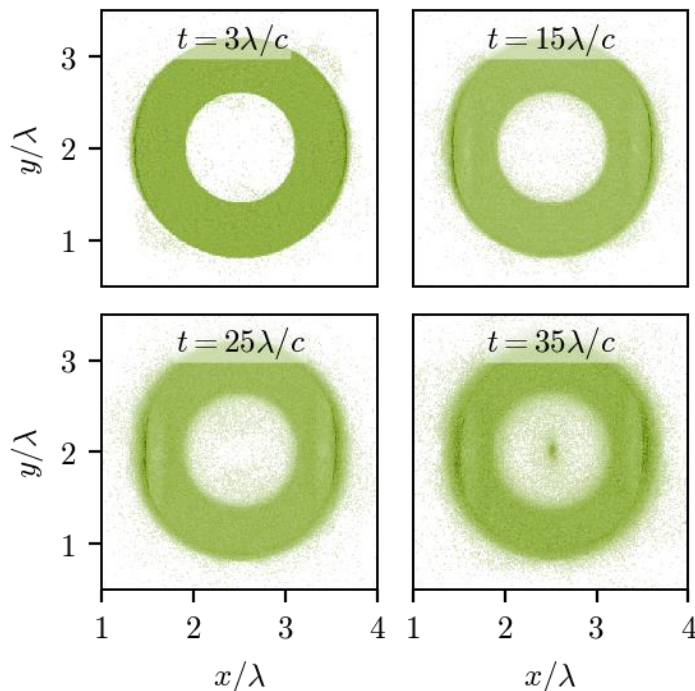
3D PIC-моделирование процесса имплозии

Нагрев электронов производится за счет 2 лазерных импульсов ($a_0 = 6$), распространяющихся по оси x в сторону центра.

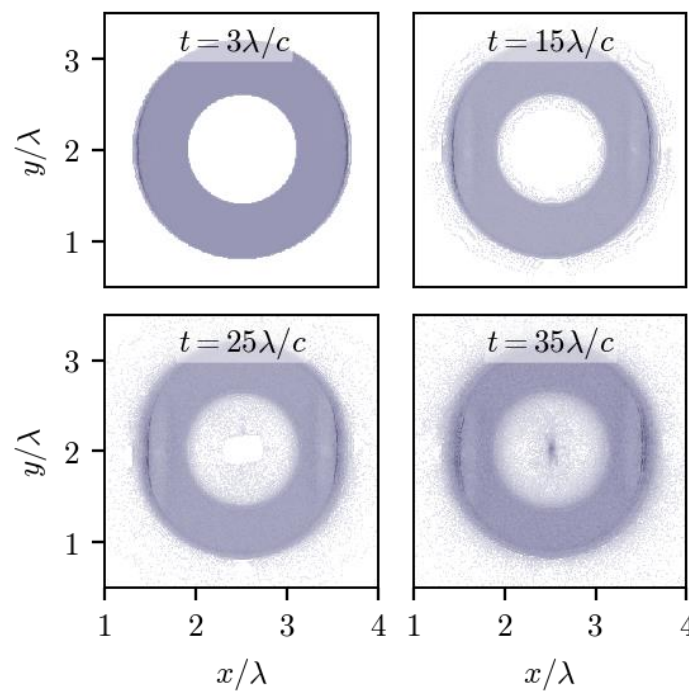
На распределениях концентрации электронов и ионов можно видеть основные этапы:

- нагрев электронов и заполнение ими полости
- коллапс ионов к центру полости
- формирование плотного сгустка ионов в центре

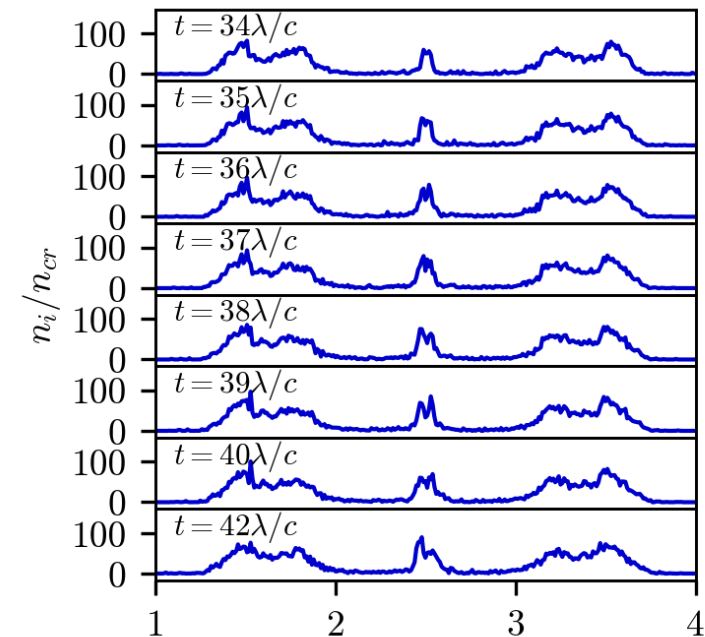
Основным отличие от 1D-моделирования является то, что центральный пик плотности оказывается сравнительно долгоживущим.



Распределение концентрации электронов в плоскости xu в различные моменты времени



Распределение концентрации ионов в плоскости xu в различные моменты времени



Распределение концентрации ионов по оси x вблизи момента формирования сгустка

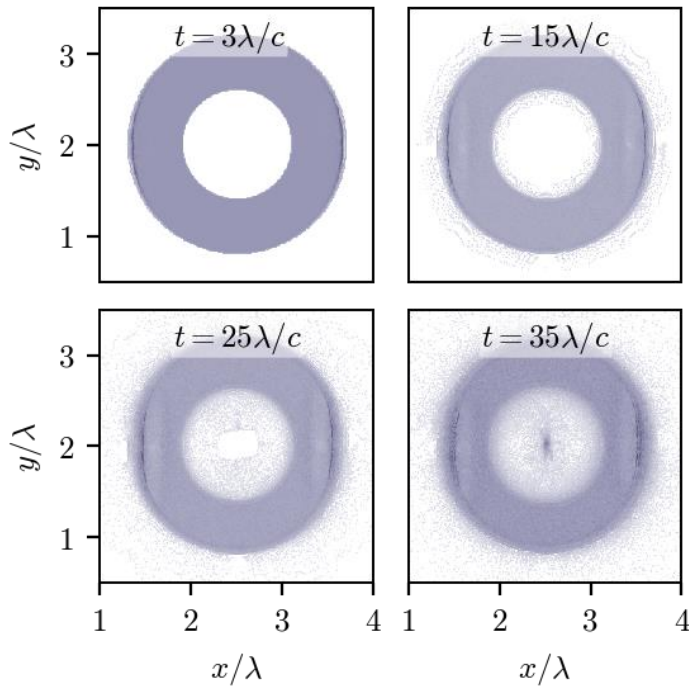
Влияние числа лазерных импульсов на форму сгустка

Моделирование было проведено с 2, 4 и 8 лазерными импульсами, облучающими мишень симметрично.

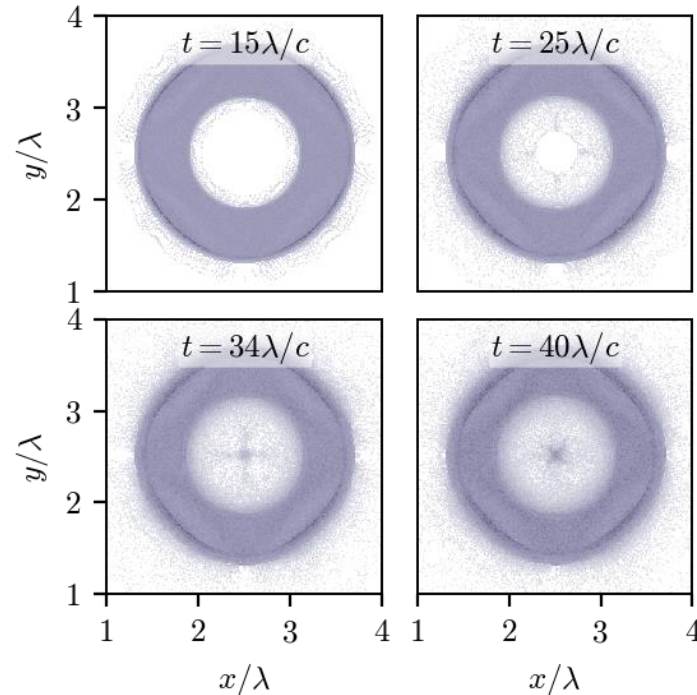
Полная энергия лазерного поля во всех численных эксперимента одинакова (и составляла 12 мДж).

Для 2 импульсов $a_0 = 6$, для 4 импульсов $a_0 = 4.24$, для 8 импульсов $a_0 = 3$

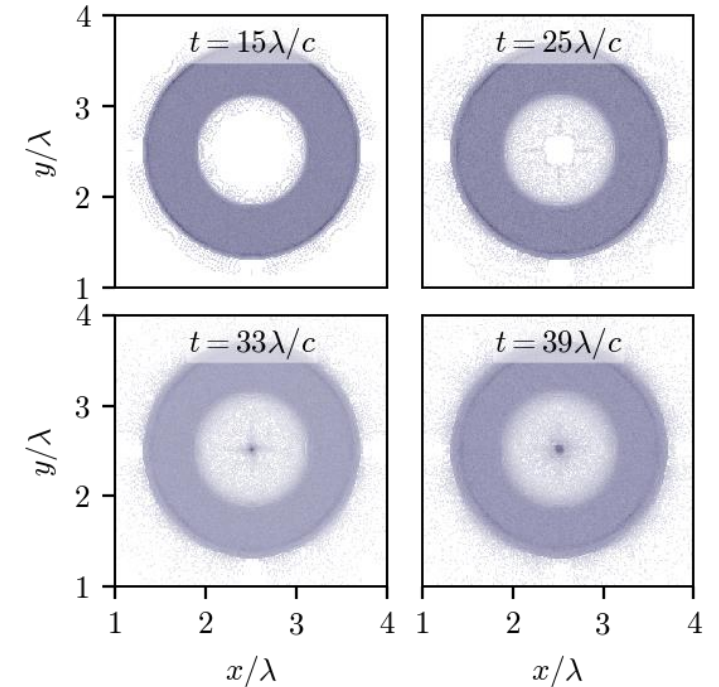
В целом заметно, что при увеличении количества импульсов коллапс происходит более симметрично, тем не менее, качественных различий нет. В первую очередь это связано с непрямым характером влияния лазерного поля на ионы (заполнение полости горячими электронами происходит во всех случаях).



Концентрация ионов в плоскости xu в различные моменты времени для 2 лазерных импульсов



Концентрация ионов в плоскости xu в различные моменты времени для 4 лазерных импульсов

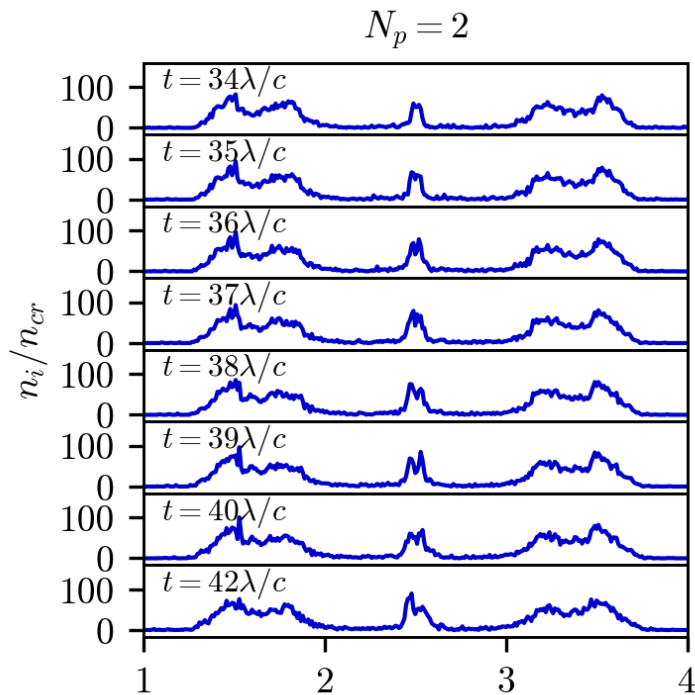


Концентрация ионов в плоскости xu в различные моменты времени для 8 лазерных импульсов

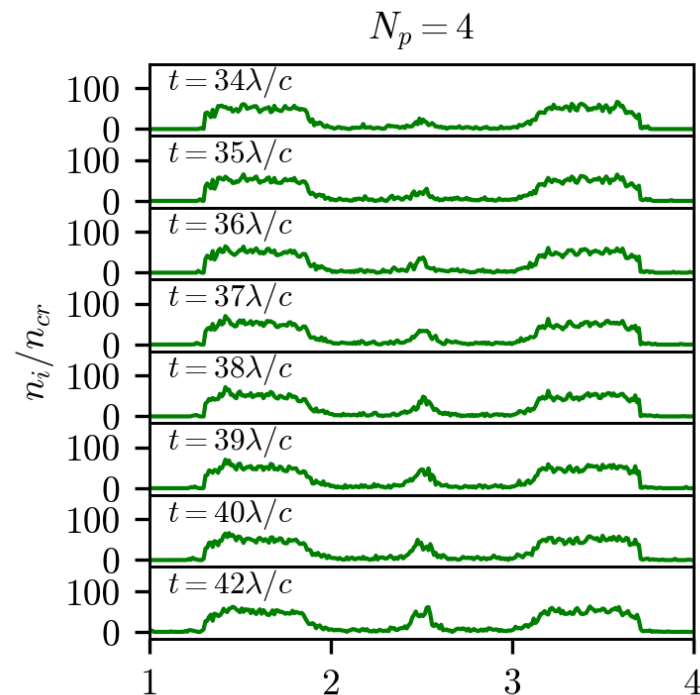
Влияние числа лазерных импульсов на максимальную концентрацию ионов в сгустке

Наибольшая концентрация ионов в сгустке наблюдается в случае 8 лазерных импульсов и составляет приблизительно в 3 раза выше невозмущенной.

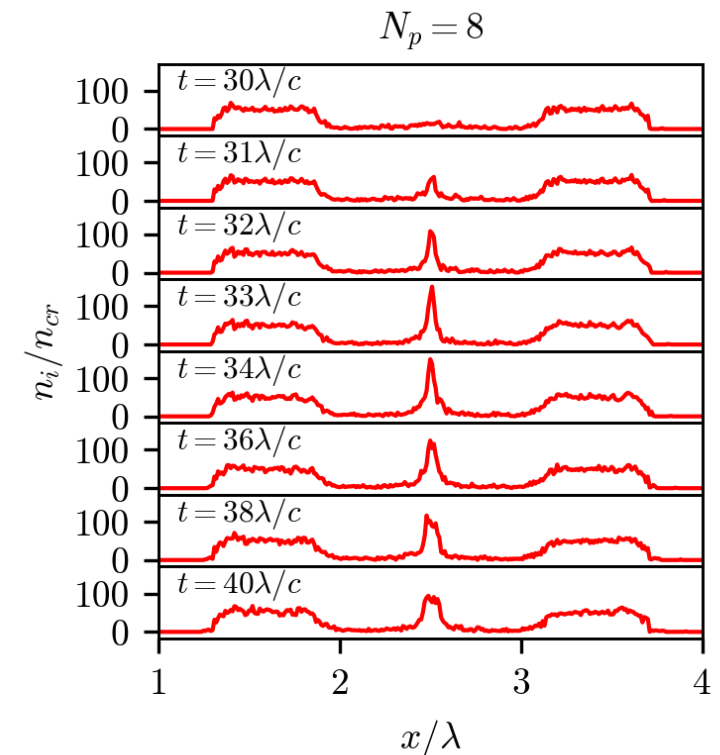
Несколько неожиданным является результат, что в случае 4 лазерных импульсов максимальная концентрация ионов в сгустке оказывается ниже, чем для 2 импульсов. На данный момент здесь требуется дальнейший анализ.



Концентрация ионов по оси x в различные моменты времени для 2 лазерных импульсов



Концентрация ионов по оси x в различные моменты времени для 4 лазерных импульсов

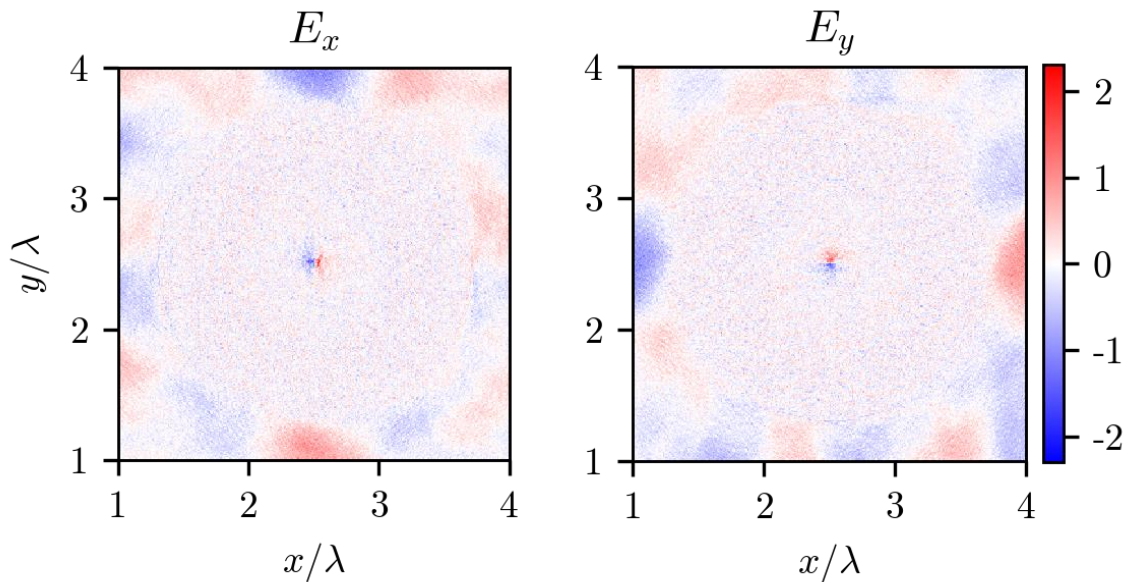


Концентрация ионов по оси x в различные моменты времени для 8 лазерных импульсов

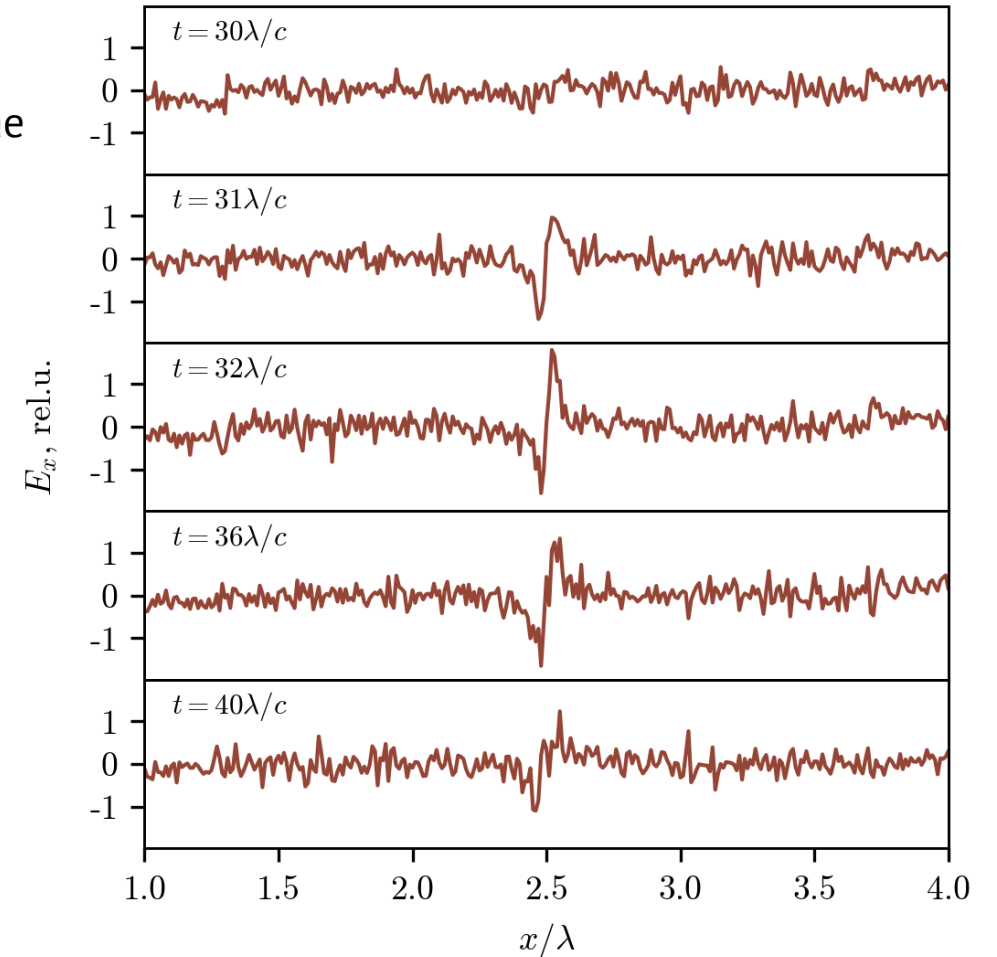
Формирование сильного электрического поля

Поле имеет квазистационарный характер и формируется благодаря наличию сгустка.

Максимальная амплитуда центрального поля составила 2.14 (в случае 8 импульсов), что сопоставимо с амплитудой лазерного поля. В случае 2 и 4 импульсов центральное поле также формировалось, но амплитуда была ниже.



Распределение компоненты поля E_x и E_y в плоскости xu в момент макс. сжатия ($t = 35\lambda/c$) для 8 импульсов



Распределение компоненты поля E_x по оси x в различные моменты времени для 8 импульсов

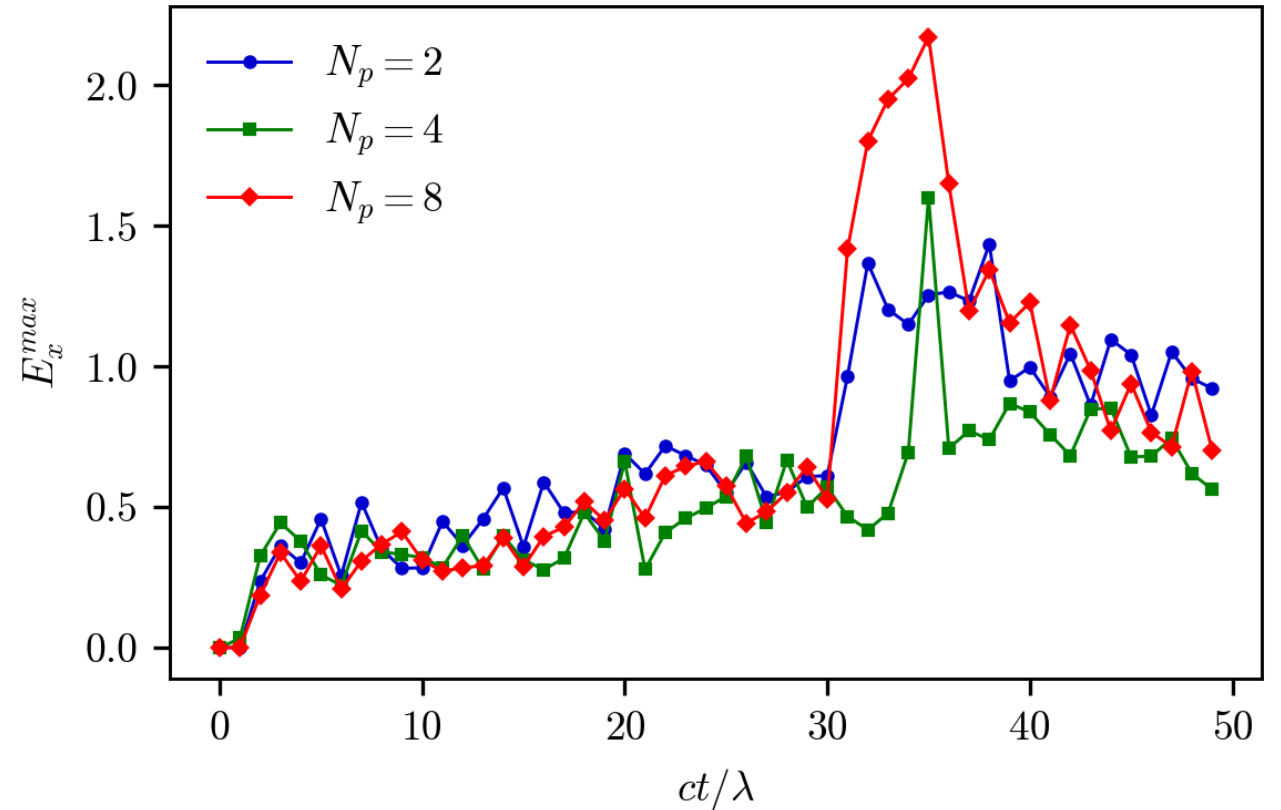
Максимальная амплитуда поля – сравнение различных конфигураций

Общая тенденция:

- При увеличении числа импульсов нагрев происходит равномернее и ионный сгусток сжимается более изотропно
- За счет этого минимальный размер уменьшается и максимальное поле увеличивается

Тем не менее, максимальное поле сосредоточено на пространственном масштабе порядка 1-3 шагов сетки (10-30 нм), поэтому расчет не является точным и количественные сравнения затруднены.

Для повышения точности самосогласованного моделирования необходимо уменьшение масштаба сетки (требующее больших вычислительных ресурсов).



Зависимость максимального значения поля E_x от времени для разных конфигураций (с различным числом лазерных импульсов)

Моделирование воздействия центрального поля на электроны

Характерный пространственный масштаб поля при максимальной компрессии – порядка шага сетки

Следовательно, самосогласованное описание может некорректно описывать центральную область.

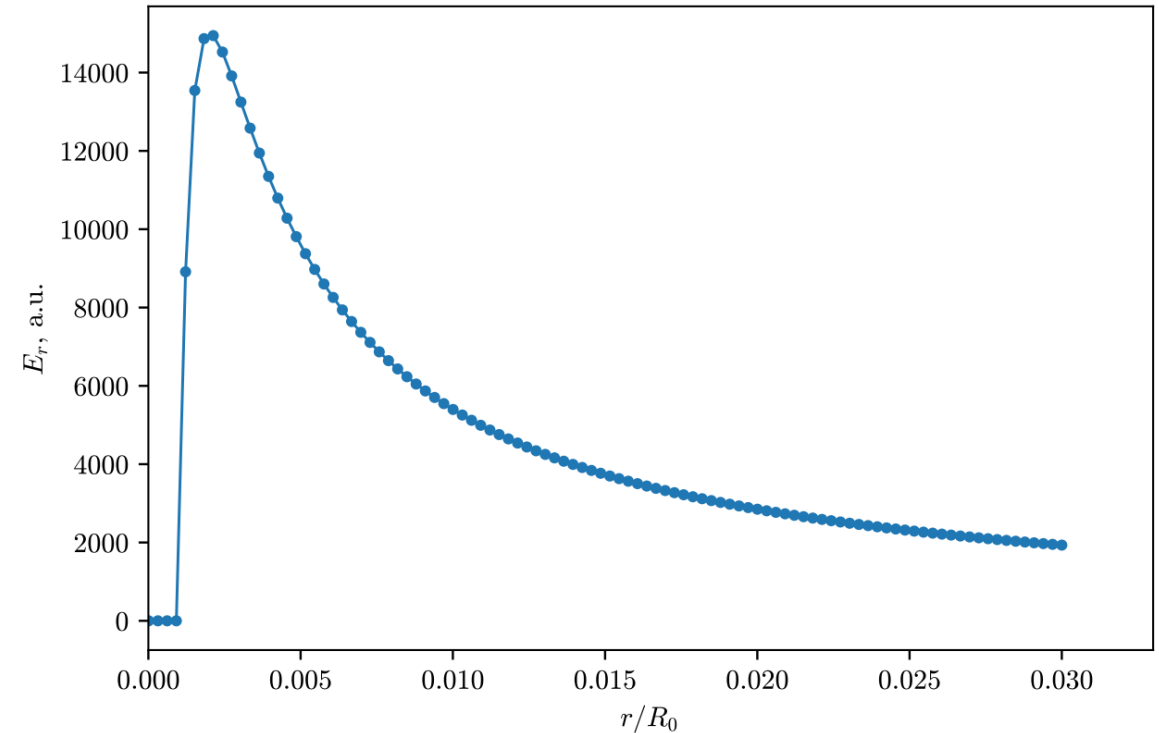
Для повышения точности описания один из возможных вариантов – задать поле аналитически (несамосогласованное описание).

В качестве внешнего аналитического поля было взято поле из одномерной модели, которая была рассмотрена ранее:

$$E_f(r) = 4E_{max} \left(\frac{r_{min}}{r} - \frac{r_{min}^2}{r^2} \right)$$

Поле задавалось либо стационарным, либо с плавным включением / выключением:

$$E \sim \cos^2((t - t_0)/\sigma_t).$$



Аналитический профиль электрического поля

Результаты моделирования опубликованы в [Д. А. Серебряков, И. Ю. Костюков, М. Мураками. Квантовая электроника 51 (9), 795-801 (2021)]

Несамосогласованное 3D PIC-моделирование

Проведено КЭД-PIC-моделирование динамики электронов с дополнительным радиально-симметричным полем в центре.

Задавался сферический объем из электронов с концентрацией $50 n_{cr}$. Температура электронов варьировалась от 0 до 100 МэВ.

Уравнения движения для квазичастиц модифицированы:

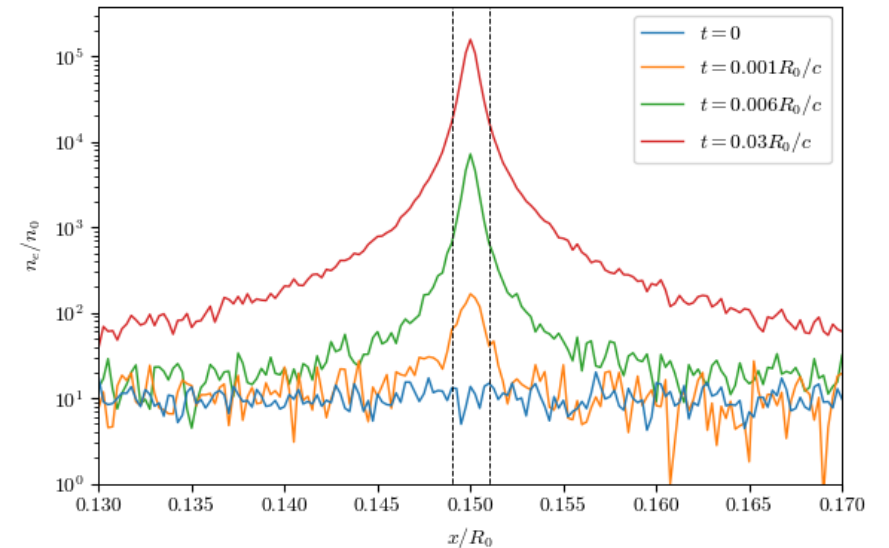
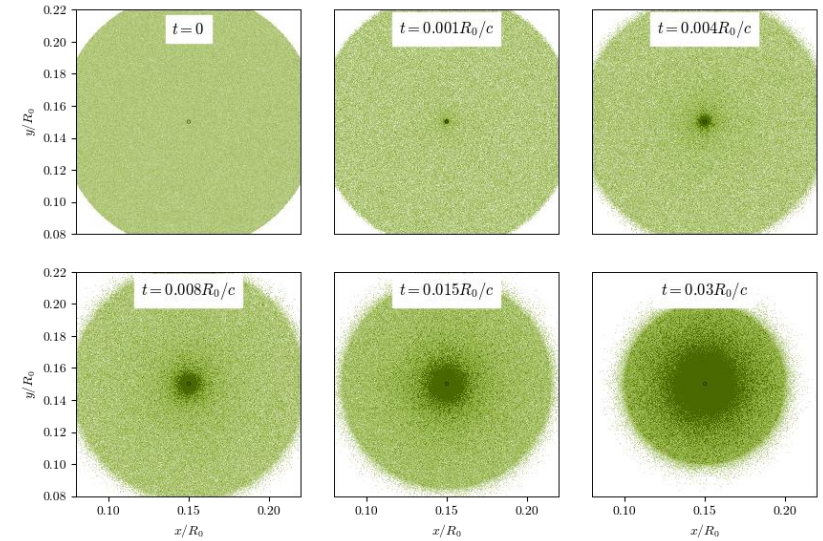
$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q \left(\mathbf{E}_{grid} + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}_{grid}] + \mathbf{E}_{ext} \right)$$

Максимум поля был взят из оценок (см. ранее) и составлял $a_0 = 15000$ (для эффективной лазерной длины волны 1 мкм).

В моделировании учитывались КЭД-процессы: излучение гамма-квантов в сильном поле и распад фотонов на электрон-позитронные пары.

На распределении электронов наблюдается их движение к центральной области сильного поля, где происходят КЭД-эффекты.

Результаты моделирования опубликованы в [Д. А. Серебряков, И. Ю. Костюков, М. Мураками. Квантовая электроника 51 (9), 795-801 (2021)]



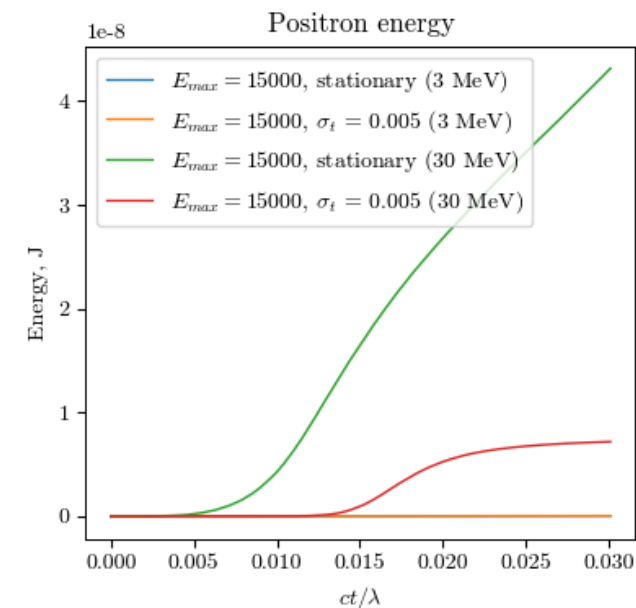
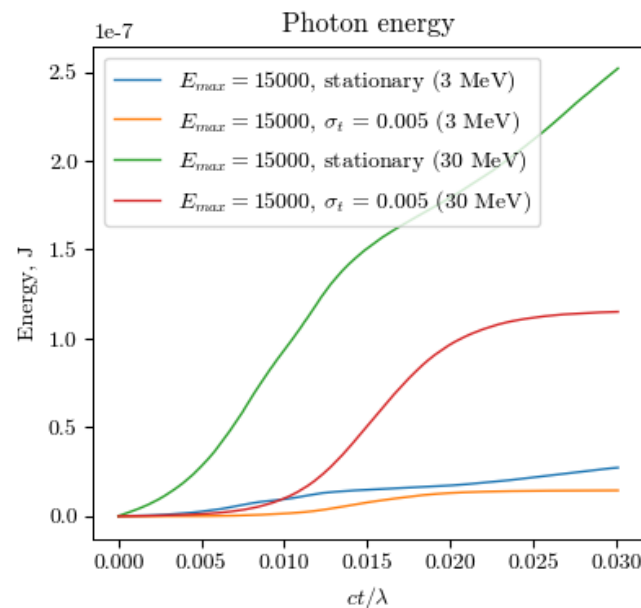
Распределение концентрации электронов в плоскости $x-y$ (сверху) и по оси x (снизу)

Генерация гамма-квантов и формирование КЭД-каскадов

В моделировании наблюдается сильная зависимость эффективности генерации гамма-фотонов и позитронов от температуры «электронного газа».

При нулевой начальной температуре («газе из покоящихся электронов») эффективность генерации фотонов стремится к нулю. При этом электроны имеют чисто радиальную компоненту скорости, тогда как для сколько-либо заметного излучения требуется искривление траектории.

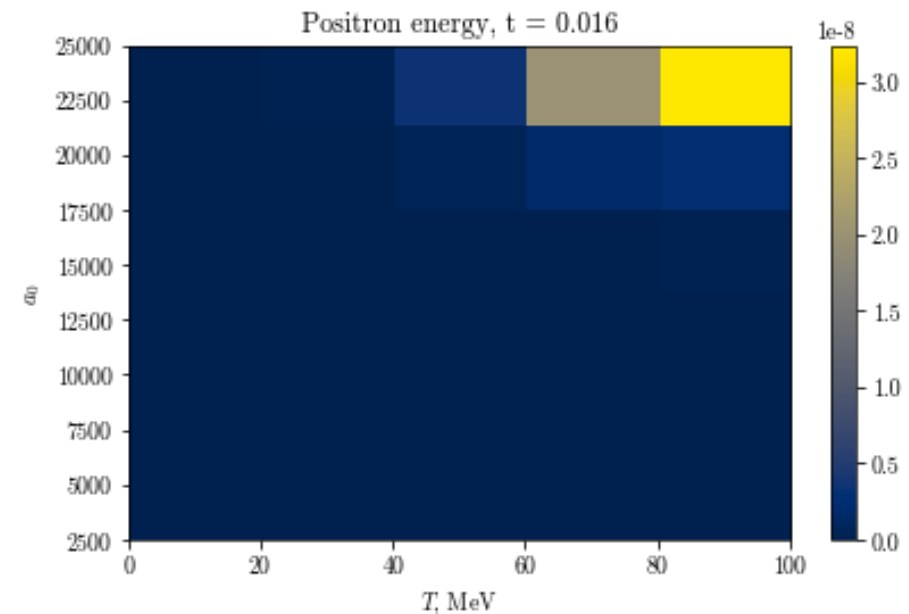
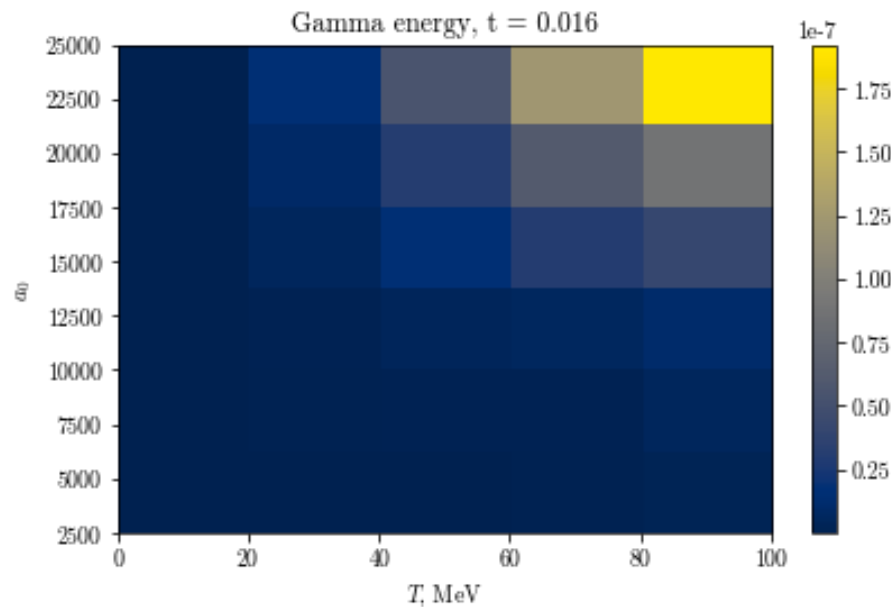
Форма временной огибающей поля также влияет на эффективность КЭД-процессов, причем влияние на рождение пар оказывается сильнее



Энергия гамма-квантов (слева) и позитронов (справа) в зависимости от времени в различных численных экспериментах

Зависимость от амплитуды поля и температуры

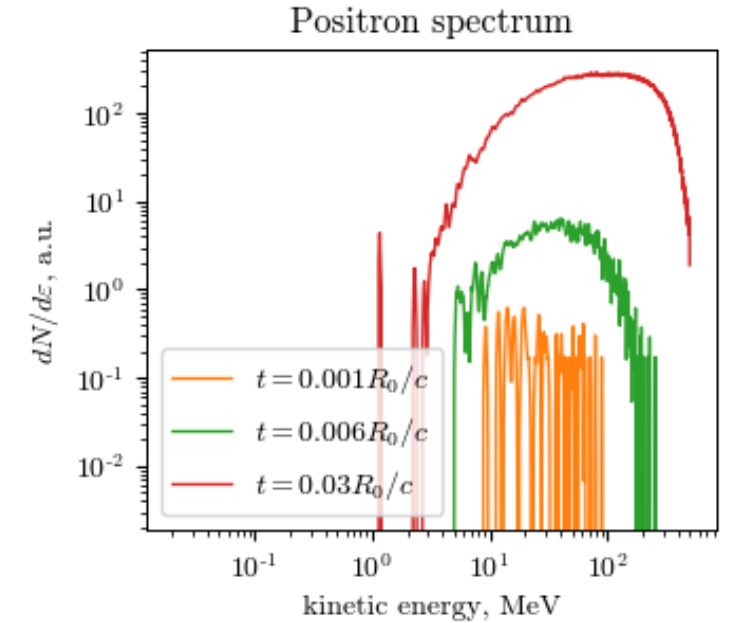
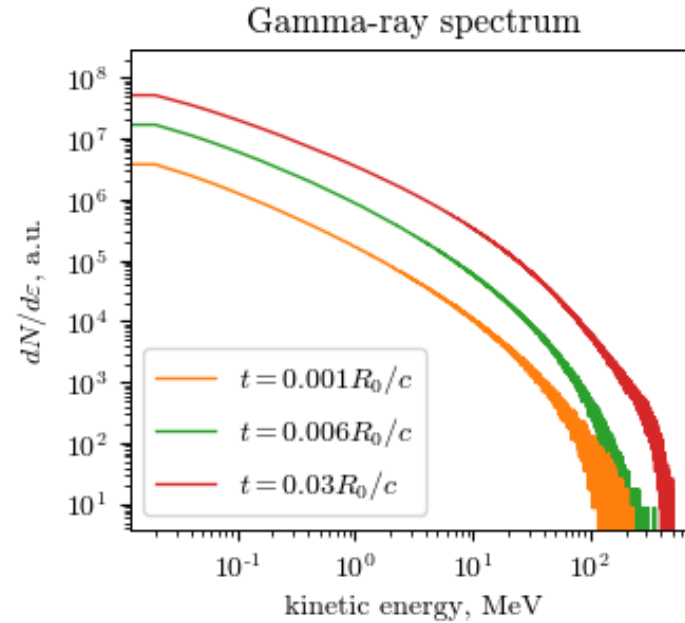
- Поскольку поле в модели 100% радиальное, для излучения электрону нужно иметь компоненту скорости поперек поля
- В целом, чем выше температура, тем эффективнее излучение. Однако для рождения пар влияние температуры оказывается ниже (по сравнению с генерацией гамма-квантов)



Энергия гамма-квантов (слева) и позитронов (справа) в зависимости от температуры электронов и амплитуды внешнего поля

Спектры гамма-квантов и позитронов

При рассмотренных параметрах моделирования максимальная энергия фотонов находится в диапазоне сотен МэВ, а позитронов – десятков МэВ



Спектры гамма-квантов (слева) и позитронов (справа) в разные моменты времени в одном из численных экспериментов

Выводы

- В самосогласованном 3D PIC-моделировании при облучении сферической полости 2, 4 и 8 лазерными импульсами наблюдается формирование плотного ионного сгустка и сильного квазистационарного электрического поля в центре полости
- Наибольшая концентрация ионов и амплитуда центрального поля наблюдаются в случае 8 лазерных импульсов
- В несамосогласованном моделировании динамики электронов под действием поля ионов, рассчитанного на основе модели, в области ионного сгустка происходит эффективная генерация гамма-квантов и рождение пар при ненулевой температуре
- Эффективность генерации фотонов и позитронов сильно зависит от температуры «электронного облака» и с ростом температуры сильно повышается

Требуются дальнейшие исследования: повышение точности существующих расчетов и самосогласованное моделирование с учетом КЭД-эффектов

Спасибо за внимание!

