

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра дискретной математики и
информационных технологий

**Разработка системы моделирования эффекта Швингера на
параллельных вычислительных системах**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента(ки) 2 курса 271 группы
направления (специальности) 09.04.01 Информатика и вычислительная техника
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Веревин Тимофей Тимофеевич

Научный руководитель
к. ф.-м.н., доцент

подпись, дата

А.Д. Панферов

Зав. кафедрой
к. ф.-м.н., доцент

подпись, дата

Л.Б. Тяпаев

Саратов 2018 год

ВВЕДЕНИЕ

Исследования физических процессов в сильных полях различной природы актуально для современной теоретической физики. Предполагается, что в случае достаточно сильных полей возможны прямые процессы квантового рождения частиц за счет энергии классического поля. Наблюдение таких процессов было бы еще одним прямым подтверждением квантовых законов природы. А соответствие параметров этих процессов расчетным продемонстрировало бы успех специфических моделей, которые строятся для их описания и отличаются применением в одном формализме и квантовых, и классических подходов.

Математические модели таких процессов сложны и доступны только для численного исследования. При этом потребности в вычислительных ресурсах высоки и без использования параллельных вычислительных систем надеяться на получение правильных и экспериментально воспроизводимых результатов не приходится.

В магистерской работе поставлена задача:

- Поиск новых версий и вариантов библиотек для решения обыкновенных дифференциальных уравнений с ориентацией на систему уравнений, используемую в модели.
- Исследования их применимости и эффективности.
- Реализовать версию программы для специфической формы зависимости электрического поля от времени, при которой меняется не только амплитуда, но и частота поля.
- Провести адаптацию программы для модели рождения пар носителей под действием электрического поля в графене.

Бакалаврская работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников и двух приложений.

В первой главе определяется математическая модель, описывающая процесс рождения электрон - позитронных пар (в общем случае пар частица - античастица) в сверхсильном электрическом поле.

Во второй главе производится обзор и выбор программных инструментов для решения задачи.

В третьей главе производится сравнение работы последовательной и параллельной версии программы, также производится оптимизация настроек решателя и предоставлены результаты эксперимента.

В четвертой главе проводится численное моделирование для систем с графеном и предоставлены результаты экспериментов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Постановка задачи. Предметом исследования в работе является математическая модель, описывающая процесс рождения электрон - позитронных пар (в общем случае пар частица - античастица) в сверхсильном электрическом поле. Такой процесс невозможен с точки зрения классической физики и при наблюдении будет представлять из себя прямую демонстрацию основных принципов квантовой теории.

Для его наблюдения необходимы поля очень высокой напряженности, не реализованные до настоящего времени в лабораторных условиях. Надежда на их достижение появилась с развитием лазерных установок сверх высокой мощности. Поскольку это очень дорогие устройства, наличие средств оценки возможных при их работе процессов крайне важно [1].

Основой используемой модели является интегро-дифференциальное уравнение вида:

$$f'(\vec{p}, t) = \frac{1}{2} \Lambda(t) \int_0^t dt' \Lambda(t') [1 - 2f(t')] \cos 2\Theta(t, t'), \quad (1)$$

где

$$\Theta(t, t') = \int_{t'}^t d\tau \varepsilon(\vec{p}, t) \quad (2)$$

$$\Lambda(\vec{p}, t) = eE(t) \varepsilon_{\perp} / \varepsilon^2(\vec{p}, t) \quad (3)$$

$$\varepsilon(\vec{p}, t) = \sqrt{\varepsilon_{\perp}^2(\vec{p}) + (p_{\parallel} - eA(t))^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \sqrt{(m^2 + p_{\perp}^2)} \quad (5)$$

вспомогательные функции, определяемые через массу частицы (m), импульс частицы (p) и его параллельные (p_{\parallel}) и перпендикулярные (p_{\perp}) относительно направления поля составляющие, а также векторный потенциал электрического поля $A(t)$.

Функция распределения $f(p, t)$ определяет плотность вероятности обнаружения рождающихся частиц в заданный момент времени в заданной точке импульсного пространства.

Для практической реализации модели интегро-дифференциальное уравнение представляется в виде системы ОДУ:

$$\begin{aligned} f' &= \frac{1}{2} \Lambda u, \\ u' &= \Lambda(1 - 2f) - 2\omega v, \\ v' &= 2\omega u \end{aligned} \quad (6)$$

В данной системе функция f имеет тот же смысл, что и в исходном уравнении (1), а u и v представляют собой вспомогательные функции.

Для представления о результатах действия электрического поля необходимо детально воспроизвести функцию распределения для некоторого конечного момента времени, когда можно считать, что поле уже выключено. Это вычислительно сложная задача. Потребное время счета зависит от нашего умения эффективно решать систему уравнений (6) во всем возможном диапазоне параметров и умения делать это одновременно для очень большого количества вариантов значений параметров p_{\parallel} и p_{\perp} .

Последнее зависит от наличия параллельно задействованных вычислительных ресурсов, а вот эффективность решения системы уравнений определяется удачно выбранным инструментом для их решения.

Поэтому первым этапом моей работы является изучение возможностей свободных библиотек, позволяющих эффективно решать системы ОДУ представленного вида с обеспечением сходимости результатов и их достаточной точности.

Для практического применения результатов оптимизации программы переменное электрическое поле задается следующей зависимостью напряженности от времени:

$$E(t) = E_0(b * t^2 + v * t + \varphi) \exp\left[-(t - t_m)^n / 2\tau^n\right], \quad n > 2$$

где

$$\tau = \frac{\sigma}{\nu},$$

где τ – длительность лазерного импульса, ν – частота лазерного излучения, E_0 – амплитуда напряженности электрического поля. Такие «чирпованные» (чирикующие) импульсы используются в современных сверхмощных лазерах для обеспечения возможности их многостадийного усиления.

Результаты эксперимента. В ходе работы требовалось решить систему уравнений (6) для набора параметров, определенных физической задачей, и исследовать поведение функции плотности распределения (1) на заданной области импульсного пространства.

Первым этапом было исследование эволюции функции (1) на достаточно большом участке импульсного пространства при постоянном нулевом значении перпендикулярной компоненты импульса p_{\perp} и со значением линейно-частотной модуляции b от 0 до 0.00010. Такой эксперимент позволяет оценить характер поведения функции, определить необходимую степень детализации вычислительной сетки, скорректировать различные параметры системы для достижения наилучшего результата с точки зрения поставленных задач.

Использовались следующие параметры системы:

- $\text{chastotaP} - 0.05;$
- $\text{ePolyaAmplituda} - 0.1;$
- $\text{sIigma} - 6;$
- $\text{pp} = 0, \text{pl} = [-1.5; 1.5];$
- $\text{число точек сетки} - 2000;$
- $b = 0.$

Полученные результаты представлены на графике (рисунок 1):

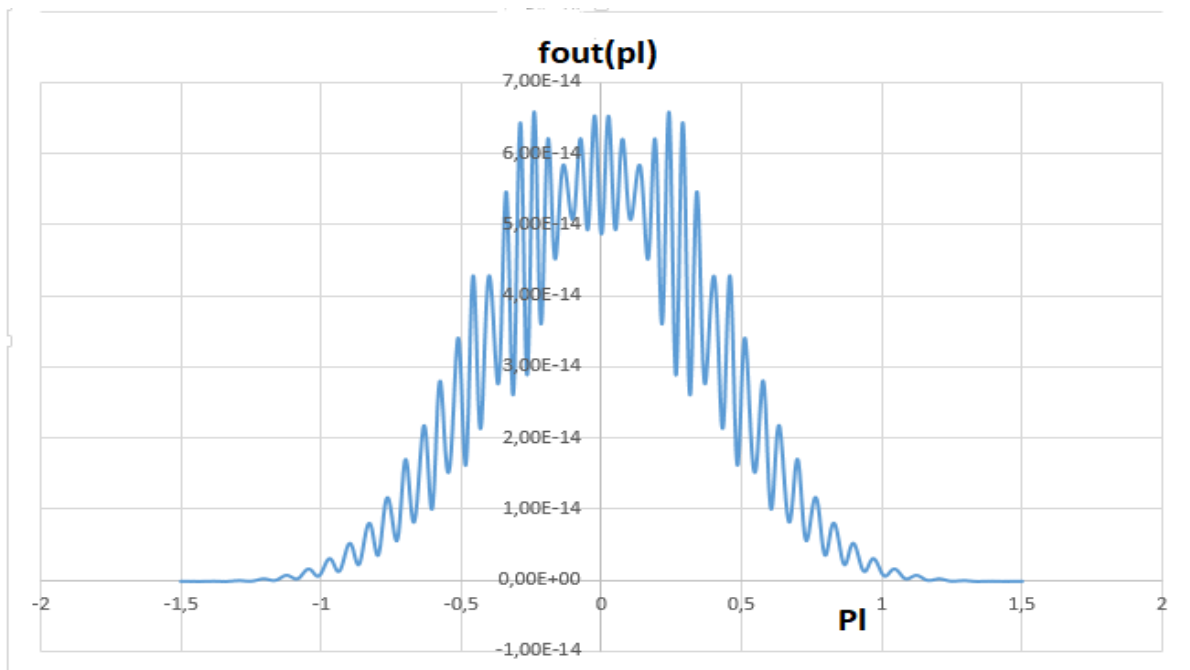


Рисунок 1 - Поведение функции распределения вероятности [-1.5;1.5]

Следующим шагом изменим значение $ePolyaAmplituda$ с 0.1 до 0.2, полученный результат виден на рисунке 2.

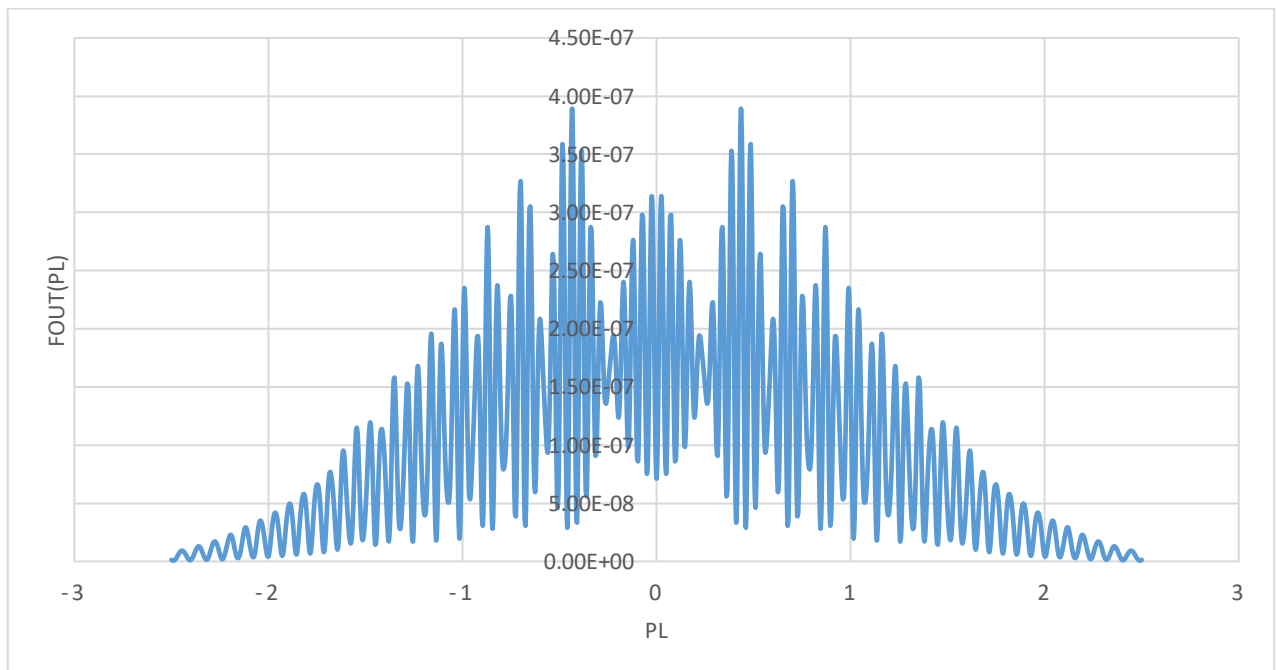


Рисунок 2 - Поведение функции распределения вероятности с $ePolyaAmplituda = 0.2$

Следующим шагом изменим частотно импульсную модуляцию с 0.0 до 0.00005, полученный результат виден на рисунке 3.

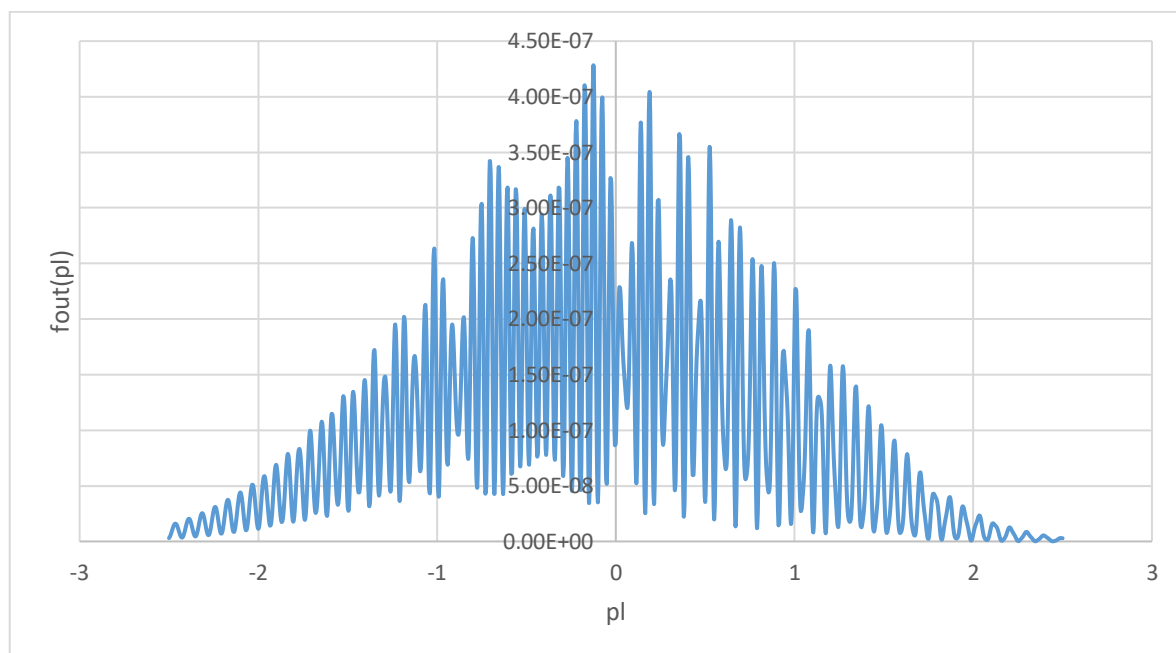


Рисунок 3 - Поведение функции распределения вероятности с $b = 0.00005$

Как видно на полученном изображении, у функции пропадает симметрия относительно середины координат, и она обладает выраженной нелинейностью на всем исследуемом участке. Пик обнаруженной вероятности рождения частиц не сильно смещен влево от центра интервала.

Следующим шагом изменим частотно импульсную модуляцию с 0.0 до 0.00010, полученный результат виден на рисунке 4.

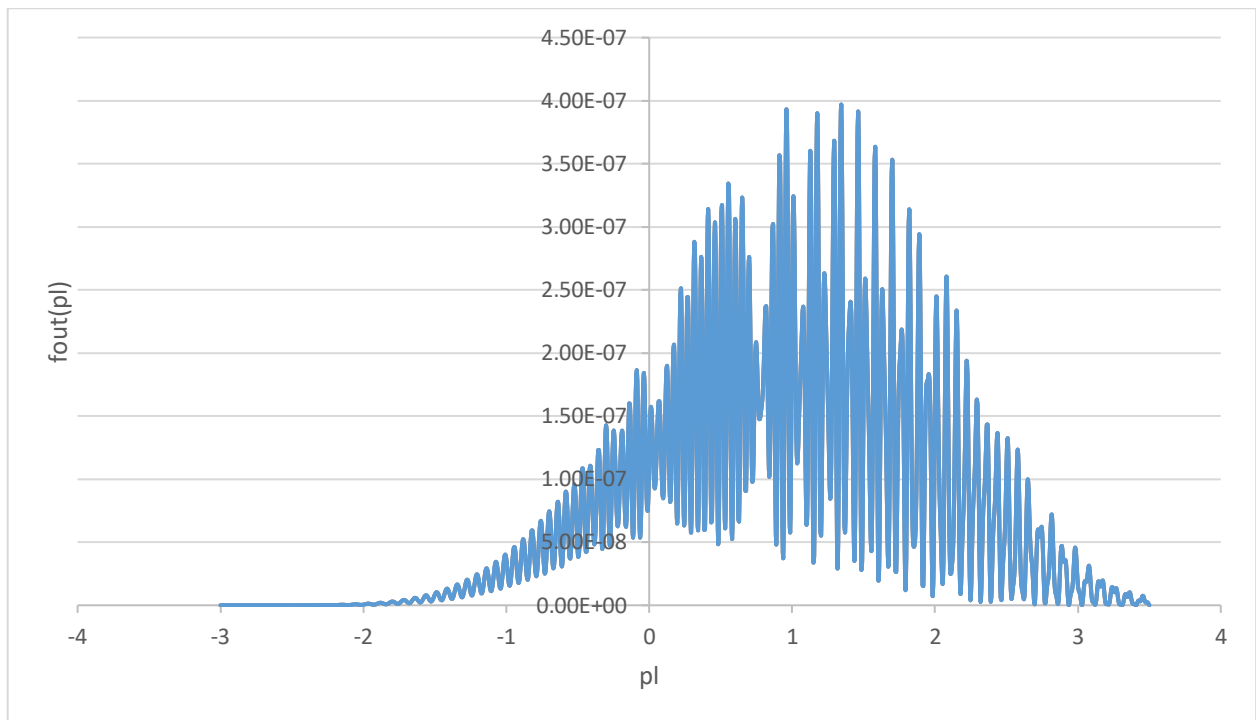


Рисунок 4 - Поведение функции распределения вероятности с $b = 0.00010$

Как видно на полученном изображении, пик обнаруженной вероятности рождения частиц смещается вправо от середины интервала.

Перейдем к рассмотрению исследуемой функции на двумерной области импульсного пространства.

Использовались следующие параметры системы:

- $chastotaP$ - 0.05
- $sI\sigma$ - 6
- $pp = [0; 1.5]$, $p_l = [-3.5; -3.5]$
- число точек сетки - 10x3000 соответственно
- $ePolyaAmplituda$ - 0.2

Полученное изображение представлено на рисунке 5:

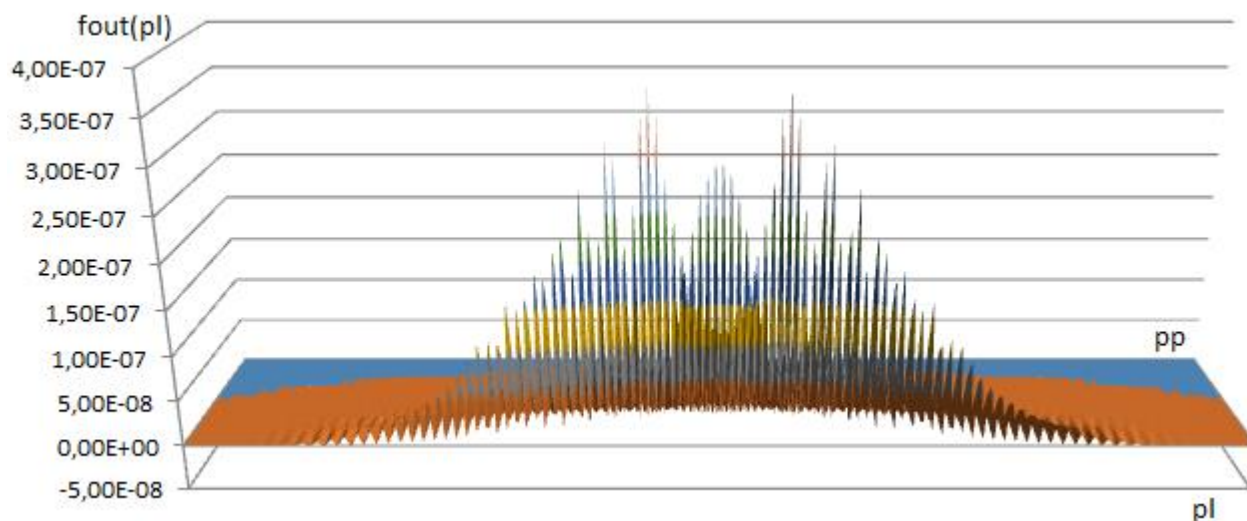


Рисунок 5 - Поведение функции распределения вероятности

$$pp = [0; 1.5], pl = [-3.5; -3.5]$$

Далее представлено изображение с другой стороны для наглядности на рисунке 6.

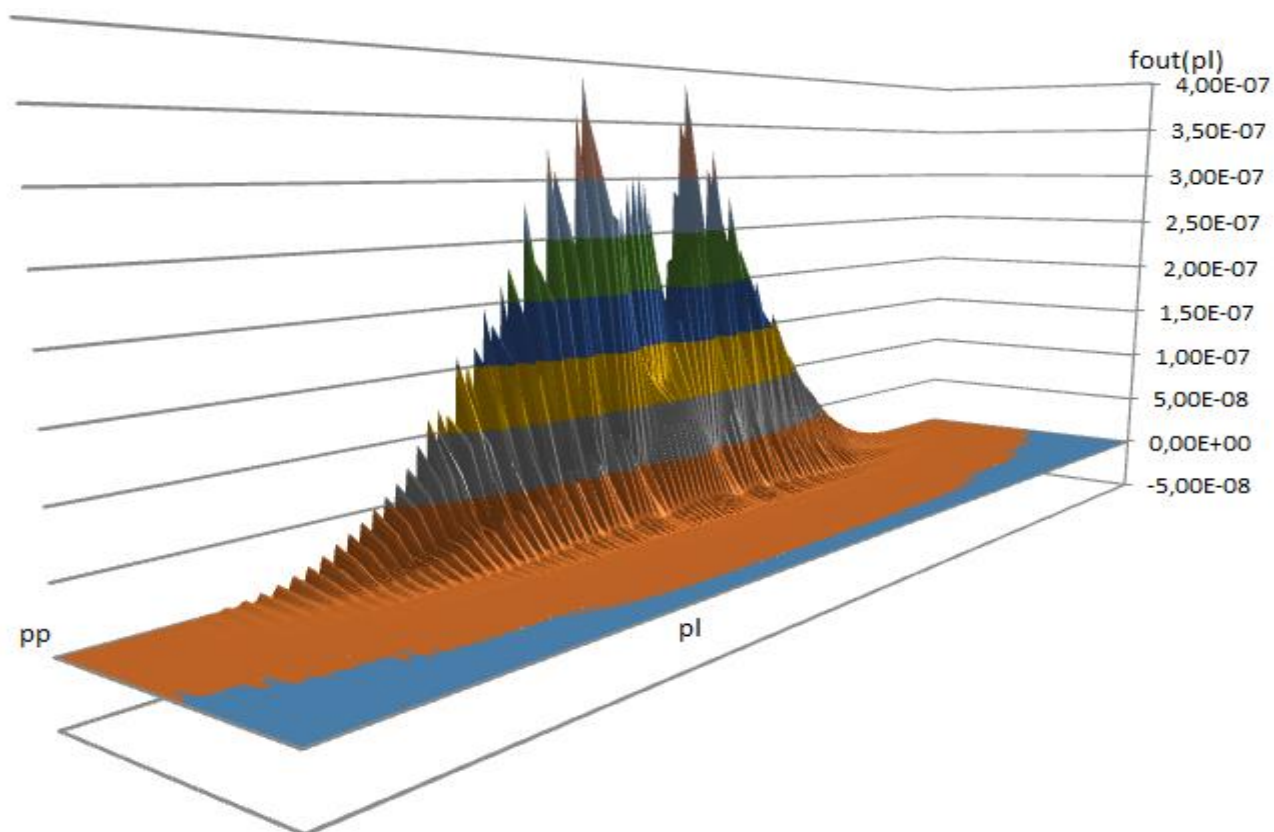


Рисунок 6 – Поведение функции распределения вероятности (вид сзади)

$$pp = [0; 1.5], pl = [-3.5; -3.5]$$

Из приведенных графиков можно получить представление об объёме получаемых при моделировании расчетных данных. И это при относительно «удачных» параметрах численного эксперимента. В общем случае требуются гораздо более плотные сетки и покрытие ими больших объёмов импульсного пространства.

Важно, что имея подробную информацию о поведении функции распределения, мы можем посчитать наблюдаемые интегральные характеристики: пространственную плотность рождающихся частиц и пространственную плотность электрического тока, образующегося за счет их движения

$$n = \frac{2}{(2\pi)^2} \sum \nabla p_z \nabla p_x p_x f(p_z, p_x)$$

$$j_{cond} = \frac{2}{(2\pi)^2} \sum \nabla p_z \nabla p_x \frac{p_z - A(t)}{\varepsilon} p_x f(p_z, p_x)$$

Необходимая для этого функциональность в программе моделирования была успешно реализована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование эффективности используемых для научного моделирования программ является важной и актуальной задачей. В работе выполнен обзор возможностей свободных библиотек, позволяющих эффективно решать системы обыкновенных дифференциальных уравнений на параллельных системах для моделирования сложных физических процессов, происходящих в области фокусировки лазерных импульсов сверхвысокой мощности.

Проблема большой вычислительной сложности для решения задачи в качестве обязательного условия диктует необходимость использования параллельной вычислительной среды. Эта проблема решена путем оптимального выбора математической библиотеки и выбора в качестве инструмента для реализации параллелизма MPI. Выбранный способ распараллеливания обеспечит универсальность программы по отношению к архитектуре параллельной вычислительной системы и её высокую масштабируемость.

Практическое применение оптимизированной программы реализовано для специфической формы зависимости электрического поля от времени, при которой меняется не только амплитуда, но и частота поля. Был получен большой массив данных, которые позволяют исследовать детали процесса и получить некоторые его интегральные характеристики (плотность рождающихся в поле частиц и генерируемую плотность тока).

Также была выполнена адаптация программы для модели рождения пар носителей под действием электрического поля в графене. Это позволило оптимизировать работу программы для этой новой модели и получить инструмент для моделирования процессов в этом перспективном материале.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Вакуумное рождение частиц в сильных электромагнитных полях. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/2001_2с.pdf (дата обращения: 01.04.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 2 Proposed Draft Technical Report on C++ Library Extensions URL: <http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2005/n1745.pdf> (дата обращения: 01.04.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 3 Vacuum particle-antiparticle creation in strong fields as a field induced phase transition URL: Cornell University Library URL: <https://arxiv.org/pdf/1607.08775.pdf> (дата обращения: 15.06.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 4 Gsl - GNU Scientific Library URL: GNU.org URL: <https://www.gnu.org/software/gsl/> (дата обращения: 14.05.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 5 GSL URL: <http://cholm.home.cern.ch/cholm/misc/#gslmm> (дата обращения: 15.05.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 6 GNU Scientific Library URL: <http://git.savannah.gnu.org/> (дата обращения: 15.02.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 7 Boost C++ Library Boost.org URL: <http://www.boost.org/> (дата обращения: 15.05.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 8 ODEINT URL: <http://headmyshoulder.github.io/odeint-v2/> (дата обращения: 14.01.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 9 Intel Ode Solvers URL: <https://software.intel.com/en-us/articles/intel-ordinary-differential-equations-solver-library> (дата обращения: 15.05.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 10 MPICH User's Guide* Version 3.2.1 Mathematics and Computer Science Division Argonne National Laboratory URL: <http://www.mpich.org/static/downloads/3.2.1/mpich-3.2.1-userguide.pdf> (дата обращения: 01.04.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.

- 11 MPI: The Message Passing Interface. URL: http://parallel.ru/tech/tech_dev/mpi.html (дата обращения: 01.04.2018).
- 12 Стандарт интерфейса передачи сообщений (MPI). URL: <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpi/Cсс> (дата обращения: 01.04.2018).
- 13 Boost.MPI URL: https://www.boost.org/doc/libs/1_64_0/doc/html/mpi.html (дата обращения: 01.04.2018)
- 14 Базовые функции MPI URL: <http://rsusu1.rnd.runnet.ru/tutor/method/m2/page03.html> (дата обращения: 01.04.2018)
- 15 Параллельное программирование на основе MPI URL: https://www.intuit.ru/studies/professional_retraining/954/courses/398/lecture/9177 (дата обращения: 01.04.2018)
- 16 Менеджер ресурсов Torque URL: <http://cluster.linux-ekb.info/torque.php> (дата обращения: 06.04.2018)
- 17 Что такое Torque URL: <https://kb.iu.edu/d/avmy> (дата обращения: 06.04.2018)
- 18 С.А. Левенец, Т.Т. Веревин, А.В. Маханьков, А.Д. Панферов, С.О. Пирогов // Моделирование динамики безмассовых носителей заряда в двумерной системе. Изд. СГУ, Саратов, 2018