

Аппроксимация синхротронных функций для ускорения численного моделирования плазмы с учетом эффектов квантовой электродинамики*

В.Д. Волокитин^{1,2}, С.И. Бастраков^{3,1}, А.В. Башинов^{1,2}, А.А. Гоносков^{1,2,4},
Е.С. Ефименко², И.А. Сурмин¹, И.Б. Мееров¹

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского¹
Институт прикладной физики РАН²
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf³
Chalmers University of Technology⁴

Необходимость в вычислении синхротронных функций возникает во многих задачах вычислительной физики. Одним из недавно возникших примеров является численное моделирование процессов проявления эффектов квантовой электродинамики в сверхсильных электромагнитных полях. К таким эффектам относятся испускание фотонов и их распад на электроны и позитроны, что может приводить к генерации электрон-позитронной плазмы и фотонов с высокой энергией.

Интерес к изучению этих процессов существенно возрос в связи с появлением планов создания крупных лазерных комплексов ELI и XCELS. Данные комплексы позволят путем фокусировки сверхинтенсивных электромагнитных импульсов света создать электромагнитные поля, необходимые для экспериментального наблюдения этих процессов. Помимо фундаментального интереса к экспериментальному наблюдению эффектов квантовой электродинамики [1], значительный интерес представляет возможность достижения экстремальных параметров, таких как рекордная плотность электрон-позитронной плазмы и электромагнитной энергии, а также высокая энергия частиц и фотонов [2, 3]. Это может открыть новые возможности для получения фундаментальных знаний о строении вещества и вакуума. Сегодня ведется активное теоретическое исследование различных возможностей постановки экспериментов.

В силу существенной нелинейности и вероятностной природы указанных процессов центральную роль в исследованиях играет численное моделирование с использованием суперкомпьютеров. Наиболее распространенный подход, получивший название QED-PIC [4–6], основывается на использовании метода частиц в ячейках для моделирования плазмы с дополнительным учетом эффектов квантовой электродинамики. Метод частиц в ячейках [7] подразумевает релятивистское движение частиц, которые влияют и движутся под действием электромагнитных полей. Моделирование испускания фотонов высокой энергии и их распада на электроны и позитроны производится с помощью вероятностных процедур; выражения для вероятностей основаны на формулах квантовой электродинамики [8].

В работах [6, 9] были предложены схемы QED-PIC с явными формулами вероятностей указанных процессов, использующими синхротронные функции. В данных схемах накладываются ограничения на шаг по времени, зависящие от интенсивности электромагнитного поля. Для существенного сокращения требуемых вычислительных ресурсов используется автоматическое локальное подразбиение шага по времени. Таким образом, в областях высокой интенсивности поля в течение одного шага метода частиц в ячейках может производиться локальное подразбиение шага по времени на несколько порядков и за счет этого моделироваться целый каскад событий квантовой электродинамики [6]. При этом на каждом из шагов подразбиения производится вычисление выражений для вероятности событий испускания фотонов и рождения электрон-позитронных пар. Эти вычисления, основную часть которых составляют синхротронные функции, занимают значительную долю времени работы данного этапа и в совокупности до 25% общего времени расчета.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Нижегородской области в рамках научного проекта № 18-47-520001.

В данной работе рассматриваются возможности сокращения временных расходов на вычисление синхротронных функций в контексте указанной задачи. Работа направлена на сокращение времени вычислений при суперкомпьютерном моделировании лазерной плазмы методом частиц в ячейках с учетом эффектов квантовой электродинамики. Эксперименты показывают, что в подобных моделированиях, требующих значительных вычислительных ресурсов, существенное время тратится на вычисление значений синхротронных функций в широком диапазоне границ области определения. Задача аппроксимации подобных функций решена в распространенной математической библиотеке GSL, использовавшейся в программном комплексе для моделирования плазмы PICADOR [6]. В данной работе была построена другая аппроксимация, которая может быть вычислена за меньшее время на современных вычислительных системах.

Первый этап в достижении указанной цели состоял в программной оптимизации кода в рамках библиотеки GSL. Так, использование схемы Горнера и новых инструкций FMA позволили ускорить имеющуюся базовую реализацию в несколько раз. Далее была разработана другая, более эффективная с вычислительной точки зрения, схема аппроксимации синхротронных функций. Для этого область определения функций была разбита на подобласти малых, средних и больших значений аргумента. Для каждой из этих подобластей построена отдельная аппроксимация. При этом для малых значений использована частичная сумма ряда, для средних и больших – минимаксный полином.

Разработанная программная реализация интегрирована в код численного моделирования плазмы PICADOR. В качестве тестовой задачи был выбран модельный расчет, который можно было выполнить в параллельном режиме, но на одном вычислительном узле. Для разработанной схемы аппроксимации рассматривались два режима: аппроксимация с относительной погрешностью не более 10^{-14} и не более 10^{-8} . Первый из режимов аналогичен GSL по точности и демонстрирует несколько лучшую производительность. Вторым режимом позволяет получить ускорение расчета синхротронных функций до 40%. При этом общее время работы программы сократилось на 14%, а вычисление синхротронных функций перестало быть одним из основных ресурсоемких этапов вычислений. Разработанная программная реализация синхротронных функций будет доступна для использования в открытых исходных кодах.

Литература

1. Gonoskov A. et al. Anomalous Radiative Trapping in Laser Fields of Extreme Intensity // *Physical Review Letters*. 2014, Vol. 113. P. 014801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.014801.
2. Grismayer T. et al. Laser absorption via quantum electrodynamics cascades in counter propagating laser pulses // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23. P. 056706.
3. Gonoskov A., Bashinov A., Bastrakov S., Efimenko E., Ilderton A., Kim A., Marklund M., Meyerov I., Muraviev A., Sergeev A. Ultrabright GeV Photon Source via Controlled Electromagnetic Cascades in Laser-Dipole Waves // *Physical Review X*. 2017. Vol. 7. P. 041003.
4. Elkina N.V., Fedotov A.M., Kostyukov I.Yu., Legkov M.V., Narozhny N.B., Nerush E.N., Ruhl H. QED cascades induced by circularly polarized laser fields // *Physical Review ST Accelerators and Beams*. 2011. Vol. 14. P. 05440.
5. Ridgers C.P., Kirk J.G., Ducloux R. et al. Modelling gamma-ray photon emission and pair production in high-intensity laser-matter interactions // *Journal of Computational Physics*. 2014. Vol. 260, P. 273–285.
6. Gonoskov A., Efimenko E., Ilderton A., Marklund M., Meyerov I., Muraviev A., Sergeev A., Surmin I., Wallin E. Extended particle-in-cell schemes for physics in ultrastrong laser fields: Review and developments // *Physical review E*. 2015. Vol. 92. P. 023305.
7. Birdsall C.K., Langdon A.B. *Plasma Physics via Computer Simulation*. McGraw-Hill, 1985.
8. Никишов А.И., Ритус В.И. Квантовые процессы в поле плоской электромагнитной волны в постоянном поле // *ЖЭТФ*. 1964. Т. 46. № 2. С. 776.
9. Harvey C.N., Gonoskov A., Marklund M., Wallin E. Narrowing of the emission angle in high-intensity Compton scattering // *Physical Review A*. 2016. Vol. 93. P. 022112.