

Численное моделирование и анализ эффективности метода Flying Focus для повышения яркости источника комптоновского излучения

Захарова Алина Александровна

Студент (магистр)

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Филиал МГУ в городе Сарове, Саров, Россия

E-mail: zaharowa.alina@gmail.com

Обратное комптоновское рассеяние (ОКР) широко используется для генерации гамма-излучения в научных и медицинских приложениях [1]. Однако традиционные схемы со статической фокусировкой гауссовых лазерных пучков сталкиваются с фундаментальным ограничением: длина взаимодействия (длина Рэлея) и пиковая интенсивность (параметр нелинейности a_0) жестко связаны через размер фокального пятна, что вынуждает идти на компромисс между выходом фотонов и их спектральной шириной [2]. Увеличение длины взаимодействия требует расширения пучка, что ведет к падению интенсивности и снижению эффективности генерации фотонов. В то же время, увеличение интенсивности и работа в нелинейном режиме ($a_0 \geq 1$) приводит к уширению спектра и падению эффективности. Метод «летающего фокуса» (flying focus) позволяет независимо управлять скоростью движения фокального пятна и его интенсивностью, формируя протяженную область взаимодействия без потери плотности мощности [3-5]. В данной работе представлены результаты численного моделирования процесса ОКР с использованием этого метода, направленные на количественную оценку влияния его применения на полное число гамма-квантов и спектральную яркость источника.

Для исследования была разработана программа на языке Python, моделирующая столкновение релятивистского электронного сгустка с гауссовым распределением по энергии и поперечным координатам (с использованием параметров Твисса) с лазерным импульсом, имеющим «летающий фокус». В основе расчета полного числа гамма-квантов N_γ лежит вычисление интеграла перекрытия пространственных распределений пучков с томсоновским сечением рассеяния. Пространственно-временное распределение лазерного импульса описывается в переменных $\xi = z - \beta_f ct$, что позволяет ввести модифицированную рэлеевскую длину $\xi_R = z_R(1 + \beta_f)$ и независимо задавать скорость движения фокуса $v_f = \beta_f c$.

Моделирование проводилось для шести точек взаимодействия перспективного источника комптоновского излучения (ИКИ) НЦФМ с параметрами электронных пучков в диапазоне энергий 35–2000 МэВ и лазерных импульсов с энергией от 0,3 мДж до 20 Дж, длительностью от 10 до 300 пс. Анализ показал, что применение метода flying focus приводит к увеличению выхода гамма-квантов, однако величина эффекта существенно зависит от исходных параметров. Были определены условия, необходимые для реализации преимуществ метода: скорость фокуса должна обеспечивать синхронизм с электронами ($\beta_f \approx 1$, т.е. движение фокуса, попутное электронному сгустку); длительность электронного сгустка должна быть существенно меньше длительности лазерного импульса ($\tau_e \ll \tau_l$), чтобы фокус сопровождал большую часть электронов на всей длине взаимодействия; поперечный размер электронного пучка должен быть значительно меньше размера лазерного пятна ($\sigma_{ex,ey} \ll \sigma_{l0}$), чтобы обеспечивалось перекрытие в области максимальной интенсивности. Показано, что при оптимальных параметрах выигрыш в полном числе гамма-квантов составляет более порядка.

Полученные результаты демонстрируют, что метод flying focus позволяет не только увеличить выход гамма-излучения за счет удлинения эффективной длины взаимодействия,

но и подавить нелинейное уширение спектра за счет сохранения линейности режима рассеяния ($a_0 < 1$). Совокупность этих факторов позволяет многократно увеличивать пиковую спектральную яркость источника, что подтверждает перспективность метода flying focus в контексте создания компактных источников рентгеновского и гамма-излучения нового поколения.

Источники и литература

- 1) Григоренко Л.В. и др. Проект научной программы ИНОК – комптоновского источника монохроматических гамма-квантов НЦФМ // Физмат. 2023. № 3-4. Т. 1.
- 2) Захарова А.А. и др. Влияние параметров лазерного пучка на эффективность генерации излучения в комптоновском источнике // Материалы XVI Всероссийской школы НЦФМ и ИЛФИ по лазерной физике и лазерным технологиям. 28–30 октября 2025г. С. 42.
- 3) Froula D.H. et al. Flying focus: Spatial and temporal control of intensity for laser-based applications // Physics of Plasmas. 2019. Vol. 26. P. 032109.
- 4) Pigeon J.J. et al. Ultrabroadband flying-focus using an axiparabola-echelon pair // Optics Express. 2024. Vol. 32. P. 576–585.
- 5) Ye H. et al. Enhanced Thomson scattering X-ray sources with flying focus laser pulse // AIP Advances. 2023. Vol. 13. P. 035330.