

Влияние фаз импульсов на развитие электромагнитных каскадов в предлагаемой для установки XCELS конфигурации поля

Е.Н.Неруш, Р.Р.Илигенов, И.Ю.Костюков

Продемонстрирована потенциальная возможность наблюдения самоподдерживающихся электромагнитных каскадов на установке XCELS при случайной разности фаз импульсов излучения в разных каналах для суммарной мощности 36 ПВт.

Ключевые слова: электромагнитные каскады, установка XCELS, фазы импульса.

1. Введение

В настоящее время предложены различные конфигурации полей для наблюдения самоподдерживающихся электромагнитных каскадов в лазерном поле [1, 2]. Необходимым условием развития каскадов является набор электронами и позитронами параметра χ (так называемого квантового параметра) порядка единицы. Поскольку этот параметр пропорционален энергии частицы и напряжённости поля, то для развития каскадов критически важным становится достижение высокой напряжённости поля. Для установки XCELS предложена так называемая double-belt-конфигурация – конфигурация фокусировки двенадцати лазерных импульсов, позволяющая получить напряжённость поля, которая близка к максимально возможной, достигаемой при фокусировке дипольной волны [3, 4]. В double-belt-конфигурации импульсы фокусируются с зеркал, расположенных по двум кольцам, параллельным плоскости xu (одно выше неё, другое – ниже). При поляризации импульсов вдоль оси z и при одинаковой фазе всех импульсов в точке фокусировки достигается поле, близкое к полю электрической дипольной волны [4]. Расчёты в рамках численного моделирования развития каскадов в таком поле показали, что для развития самоподдерживающегося каскада достаточно общей мощности лазерных импульсов около 8 ПВт [5], однако при этом все двенадцать импульсов должны быть строго сфазированы. В работах [5, 6] показано, что развитие каскада устойчиво к наличию у лазерных импульсов случайных фаз на уровне $2\pi/20$, однако полностью случайные фазы не рассматривались.

В настоящей работе исследуется развитие каскадов в поле, создаваемом при double-belt-конфигурации фокусировки, но при случайных фазах лазерных импульсов в интервале $[0, 2\pi]$. И поскольку ситуация, при которой фазы отдельных каналов лазерной системы не контролируются, проще в реализации, рассматриваемый нами случай представляет большой интерес.

Е.Н.Неруш, Р.Р.Илигенов, И.Ю.Костюков. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: nerush@ipfran.ru, kost@ipfran.ru

2. Постановка задачи

Для анализа развития каскадов в выбранной конфигурации было проведено численное моделирование задачи кодом QUILL [7–9]. В моделировании двенадцать импульсов мощностью 3 ПВт каждый в начальный момент времени располагались на двух кольцах в шахматном порядке. Для моделирования электромагнитных полей использовался метод FDTD с шагом по осям x , y и z , равным 0.12λ , временной шаг составлял $0.05\lambda/c$ (λ – длина волны, c – скорость света). Импульсы имели гауссов профиль, длительность их составляла 25 фс, и угол фокусировки был 20° . Рассмотренная нами конфигурация несколько отличается от предложенной в работе [3] (в частности, углом фокусировки и поперечным профилем импульса), однако обеспечивает стабильное развитие каскада независимо от формы выбранной мишени (что не всегда достигается для более острой фокусировки). В качестве «затравки» для каскада использовалась кубическая мишень из атомов углерода размером $1.2 \times 1.2 \times 1.2$ мкм с плотностью электронов 1.3×10^{22} см⁻³, находящаяся в центре области моделирования. Начальное расстояние от максимума огибающей лазерных импульсов до центра области моделирования составляло 9λ .

На рис.1 показана компонента поля E_z в плоскостях xz и xu в момент времени $ct/\lambda = 2$ для случая одинаковых фаз всех импульсов. Такая конфигурация обеспечивает достижение максимального электрического поля в процессе фокусировки и должна быть одной из наиболее благоприятных для развития электромагнитного каскада. Помимо моделирования каскада в данной конфигурации, мы провели моделирование в двух дополнительных конфигурациях, где фазы отдельных импульсов равны их азимуту (углу вокруг оси z , указывающему начальное по-

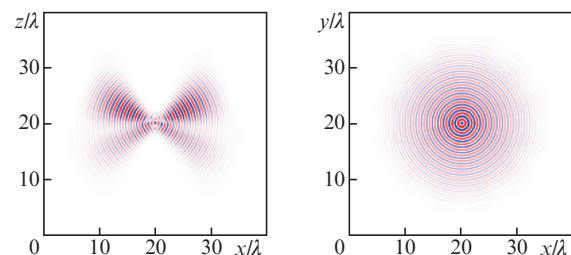


Рис.1. Распределение электрического поля E_z в double-belt-конфигурации при идеальной фазировке лазерных импульсов.

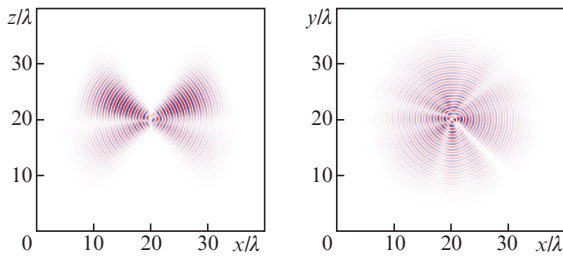


Рис.2. Распределение электрического поля E_z в double-belt-конфигурации для случайных фаз лазерных импульсов (моделирование #4).

ложение импульса): snail_xy (поляризация импульсов в плоскости xy) и snail_z (поляризация вдоль оси z). В конфигурации snail_xy из соображений симметрии все поля в точке фокусировки всё время остаются равными нулю, и каскад развивается не в самой точке фокусировки, а в её окрестностях. Конфигурация snail_z аналогична конфигурации snail_xy с точностью до замены магнитного поля на электрическое, и наоборот (с точностью до знака).

Также была проведена серия из семи моделирований, в которых фазы импульсов совершенно случайны, а импульсы поляризованы вдоль оси z . Компонента поля E_z в одном из таких моделирований показана на рис.2. Максимальное поле для подобного численного эксперимента, достигаемое в точке фокусировки, можно оценить как $1/12$ от поля для случая синфазных импульсов, помноженную на сумму двенадцати единиц со случайным знаком «+» или «-». Используя центральную предельную теорему, можно видеть, что в среднем для ситуации случайных фаз максимальное поле в $12^{1/2} \approx 3.5$ раза меньше, чем для случая синфазных импульсов. Такое поле было бы получено при использовании меньшего числа импульсов, следовательно, можно ввести эффективную мощность для случайных фаз, которая по оценке составляет $(3 \times 12 \text{ ПВт})/3.5 \approx 10 \text{ ПВт}$, что лишь немного выше порога развития каскада для синфазного случая (8 ПВт).

3. Результаты численного моделирования

Результаты численного моделирования показали, что во всех рассмотренных случаях развивается самоподдерживающийся электромагнитный каскад. В качестве «меры», позволяющей сравнить разные случаи между собой, была выбрана доля поглощаемой энергии электромагнитного поля. Если каскад не развивается, то данная доля мала, поскольку плазменная мишень прозрачна для лазерного излучения в силу эффекта релятивистски индуцированной прозрачности [10]. Развитие каскада создаёт

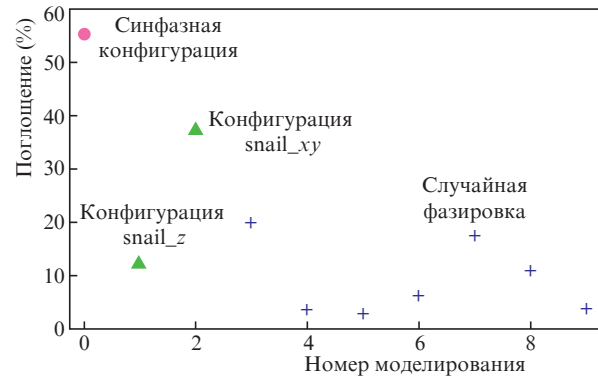


Рис.3. Поглощение лазерного поля электрон-позитронной плазмой, рождённой в точке фокусировки, для всех проведённых моделирований.

плотную электрон-позитронную плазму, эффективно поглощающую электромагнитное поле и преобразующую его энергию в энергию гамма-квантов. При этом доля поглощённой энергии связана со скоростью роста числа частиц в каскаде. При низкой скорости роста числа частиц лазерные импульсы успеют пройти через плазму до достижения ей релятивистской критической плотности [11, 12], и большая часть энергии не будет поглощена. Напротив, при высокой скорости развития каскада и при раннем начале его развития лазерные импульсы начинают поглощаться ещё до достижения максимального поля в области фокусировки.

Доля поглощённой энергии во всех проведённых численных экспериментах показана на рис.3. Видно, что в целом наличие случайных фаз у лазерных импульсов существенно ухудшает развитие электромагнитного каскада. Однако в некоторых случаях поглощение лишь в 2–3 раза меньше, чем в случае синфазных импульсов (моделирование #0). Более того, при моделировании #3 и #7 поглощение поля больше, чем в случае регулярных фаз snail_z (#1). Таким образом, хотя случайные фазы могут существенно ухудшить развитие каскада, достаточно небольшого количества «выстрелов» лазерной системы, чтобы в одном из них достичь поглощения поля, сопоставимого с поглощением при конфигурациях с регулярными фазами.

Число позитронов, генерируемое при развитии каскада, существенно коррелирует с поглощением поля: для моделирований #0 и #2 оно достигает 10^{12} , для моделирований #1, #3 и #7 оно в 3–4 раза ниже, а для моделирований #5 и #9 – ниже более чем на порядок. При этом генерируемые позитроны разлетаются в разных случаях по-разному и, как правило, несимметрично (рис.4). Формы

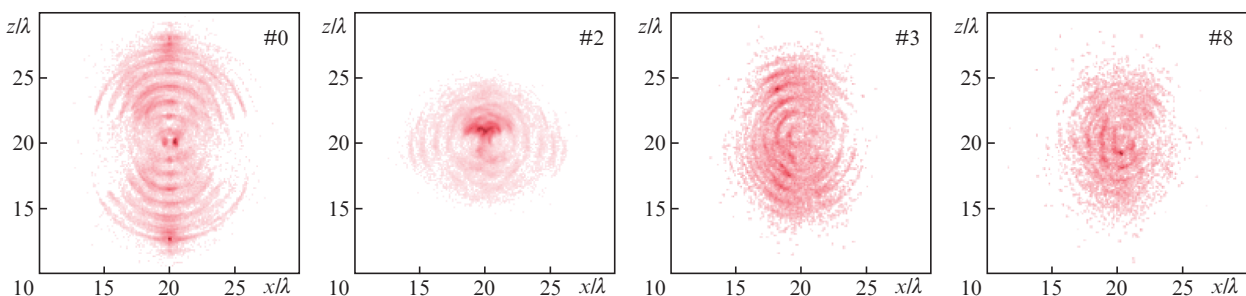


Рис.4. Распределение плотности позитронов в момент времени $ct/\lambda = 15$ для различных наборов фаз лазерных импульсов (номер моделирования, соответствующий рис.3, указан в правом верхнем углу).

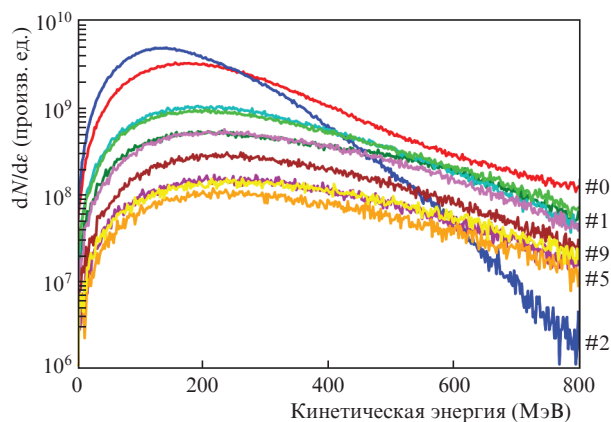


Рис.5. Спектры позитронов в момент времени $ct/l = 15$ для различных наборов фаз лазерных импульсов.

спектров сгенерированных позитронов для всех моделирований (кроме #0 и #2) практически совпадают (рис.5): максимум по энергии лежит около 200 МэВ, после него наблюдается спад по степенному закону с примерно одним и тем же показателем степени. В моделировании #0 максимум спектра выражен сильнее, а в моделировании #2 спад спектра более резкий. Последнее, возможно, объясняется тем, что большинство электронов в такой конфигурации поля попадают в область доминирования магнитного поля, где эффективно теряют энергию на излучение, не набирая её вновь.

4. Заключение

В работе продемонстрирована потенциальная возможность наблюдения самоподдерживающихся электромагнитных каскадов на установке Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS) при случайной разности фаз импульсов излучения в разных каналах и суммарной их мощности 36 ПВт. При этом в среднем число сгенерированных позитронов может быть на порядок меньше, чем в случае сфазированных импульсов, собираемых в «дипольную волну», однако с вероятностью более 10% «выстрел» установки XCELS фотонами со случайными

фазами приведёт к рождению более 25% от числа позитронов, генерируемых в случае дипольной волны. Кроме того, поглощение лазерного поля при случайной разности фаз, которое тоже может быть маркером развития каскада, также значительно и может достигать до 20% и более с вероятностью более 10% от поглощения при идеальной фазировке импульсов.

В работе рассмотрена ситуация, когда мощность системы существенно превышает порог развития каскадов в «синфазной» конфигурации. Очевидно, что при мощности, близкой к пороговой, также можно ожидать развития каскада для импульсов со случайными фазами, однако вероятность успешных «выстрелов» может быть существенно ниже, чем в рассмотренной ситуации. Таким образом, анализ возможности использования установки XCELS со случайными фазами для наблюдения каскадов при общей мощности вблизи порога требует дальнейшего изучения.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 20-12-00077, численное моделирование) и ИЦМУ «Центр фотоники» при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2022-316).

1. Bell A.R., Kirk J.G. *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 200403 (2008).
2. Fedotov A.M., Narozhny N.B., Mourou G., Korn G. *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 080402 (2010).
3. Bashinov A.V., Gonoskov A.A., Kim A.V., Mourou G., Sergeev A.M. *The European Physical Journal Special Topics*, **223**, 1105 (2014).
4. Gonoskov I., Aiello A., Heugel S., Leuchs G. *Phys. Rev. A*, **86**, 053836 (2012).
5. Gonoskov A., Bashinov A., Bastrakov S., Efimenko E., Ilderton A., Kim A., Marklund M., Meyerov I., Muraviev A., Sergeev A. *Phys. Rev. X*, **7**, 041003 (2017).
6. Efimenko E.S., Bashinov A.V., Bastrakov S.I., Gonoskov A.A., Muraviev A.A., Meyerov I.B., Kim A.V., Sergeev A.M. *Scientific Reports*, **8**, 2329 (2018).
7. <https://github.com/QUILL-PIC/Quill>.
8. <https://ipfran.ru/institute/structure/421969/quill-3d-code>.
9. Nerush E.N., Serebryakov D.A., Kostyukov I.Yu. *The Astrophysical Journal*, **851**, 129 (2017).
10. Tushentsov M., Kim A., Cattani F., Anderson D., Lisak M. *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 275002 (2001).
11. Nerush E.N. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 035001 (2011).
12. Brady C.S. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **109**, 245006 (2012).