

Е.Ю. Ечкина¹, И.Н. Иновенков¹

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ОПТИКИ

Введение

В земных условиях лазеры представляют собой источники сильного электромагнитного излучения. Использование лазеров большой мощности привело к теоретическим и экспериментальным исследованиям ускорения ионов. Основным параметром в большинстве технологических приложений лазера является плотность мощности (интенсивность) лазерного луча. Наиболее важные приложения пучков быстрых ионов, получаемых в результате воздействия лазерного импульса на плазму, связаны с адронной терапией онкологических заболеваний, с созданием источников для позитронно-электронной томографии, с исследованием нейтринных осцилляций [1].

Остановимся подробно только на некоторых приложениях релятивистской оптики.

В развитых странах при лечении онкологических заболеваний применяется комплексно три подхода: хирургический, радиотерапия и химиотерапия.

Механизм радиационного поражения клетки может быть кратко описан, следующим образом. Облучение молекул ДНК приводит к тому, что клетка не способна к воспроизводству. Однако гибель клетки не наступает мгновенно, так как энергия излучения полученная мала, по сравнению с нужной для разрушения. Как известно, ДНК человека имеет две спирали, чтобы клетка прекратила существовать их надо разрушить. Больные клетки более уязвимы, так как в результате частого деления, они чаще находятся в фазе с одной спиралью ДНК, на разрыв которой приходится меньшее количество энергии, нежели на разрыв двух спиралей ДНК. Поражение молекулы ДНК происходит непосредственно при столкновении быстрых ионов с ядрами.

Всем известны опасные последствия радиотерапии – вторичный рак или осложнения, возникающие из-за облучения здоровых тканей [2-4]. Применение протонов (ионов) в лучевой терапии обладает рядом

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова факультет ВМК ejane@cs.msu.ru, inov@cs.msu.ru

выигрышных свойств. Протоны, обладающие энергией несколько сотен мегаэлектрон вольт, теряют свою энергию в основном при взаимодействии с электронами. Таким образом, проходя через ткани, протоны теряют свою энергию плавно, этим самым объясняется резкий пик (Брэгговский максимум) в распределении доставляемой ионами дозы. Рассеяние ионного пучка на атомных электронах мало, что также уменьшает облучение соседних тканей. Следовательно, мы можем избежать нежелательного облучения здоровых тканей за опухолью [5].

Более тяжелые ионы, например ионы углерода, благодаря меньшему рассеиванию, обладают большей эффективностью по сравнению с рентгеновскими лучами и протонами. Вследствие большего электрического заряда ионы углерода, проходя через вещество, обеспечивают более «плотное покрытие» и это приводит к разрывам в ДНК клетке, что в свою очередь приводит к невозможности восстановления раковых клеток. Однако, следует отметить, что для того чтобы «разогнать» и направить тяжелые ионы, нужны специальные установки, которые требуют достаточно больших финансовых вложений. Сейчас в мире работают около полусотни центров адронной терапии.

В настоящее время в мире проводятся разработки по созданию компактных медицинских ускорителей, с использованием сверхпроводящих циклотронов, компактных циклотронов. Существуют и другие направления развития медицинских ускорителей, основанные на синхроциклотроне, ускорителей с переменным магнитным полем и ускорителем с диэлектрическими стенками [6,7].

В статьях [8-14] предложено использование для транспортировки ионов лазерный ускоритель. Лазерный ускоритель обладает компактными размерами и удобством управления параметрами ионного пучка. Кроме того есть возможность выбора источника ионов. Для того, чтобы начать применять компактный лазерный ускоритель в терапевтических целях, он должен давать стабильного качества пучок и ускоренные ионы должны отвечать заявленным требованиям.

В настоящее время опубликовано большое количество работ, посвященных математическому моделированию ускорения ионов в применении к адронной терапии, где предложены методы повышения качества ионных пучков [8,15,16], а также существует ряд экспериментальных – исследовательских работ по этой теме [17].

Существует несколько механизмов ускорения ионов в лазерной плазме. То, что ионы могут генерироваться при взаимодействии лазерного излучения с различными мишенями, известно с 1960-х годов. В данный момент максимальная энергия ионов, ускоренных с использованием тонких твердотельных мишеней и фемтосекундных лазеров, порядка 80 МэВ для протонов и 83 МэВ на нуклон, в случае ядер углерода.

При исследовании процессов ускорения ионов широко используется численное моделирование с помощью компьютерных кодов, основанных на методе частиц в ячейке. Компьютерное моделирование, обладает неограниченными возможностями диагностики процессов, позволяющими выбрать нужные параметры лазерного импульса и мишени, чтобы получить нужные условия для ускорения протонов и ионов [18-21].

Самым простым механизмом для ускорения ионов в процессе взаимодействия лазерного излучения с мишенью является кулоновский взрыв. В чистом виде кулоновский взрыв моделируется при взаимодействии излучения и кластера [22-24]. В последнем разделе этой статьи будет продемонстрирован один вариант вычислительного эксперимента ускорения ионов при кластерной мишени.

Второе направление развития релятивистской оптики, которому хотелось бы уделить внимание, это создание компактного ускорителя.

Для решения многочисленных задач фундаментального и прикладного характера требуются источники электромагнитного излучения с длиной волны, лежащей в широкой области – от радиодиапазона до рентгеновского и гамма-диапазон. На данный момент наиболее мощное рентгеновское излучение генерируется в источниках синхротронного излучения при движении ультрарелятивистских электронов в магнитном поле. Лазеры на свободных электронах нового поколения способны воспроизводить пучки рентгеновских квантов с яркостью в несколько порядков превышающих яркость рентгеновского излучения синхротронных источников. На каждой ступени развития ускорителей заряженных частиц нам становятся доступны установки с более высокими параметрами. Однако это повышает стоимость и размер установки. Естественно, возникает вопрос о способе создания более компактного ускорителя [25].

В середине прошлого века Я.Б. Файнберг, А.М. Будкер и В.И.Векслер предложили несколько вариантов ускорения заряженных частиц в плазме, основанных на электрических полях. Векслер рассматривал ускорение частиц, используя радиационное давление сильной электромагнитной волны на электронный сгусток.

При воздействии волны на мишень достаточно больших размеров сила перестает зависеть от заряда и становится равной произведению радиационного давления на облучаемую площадь. В релятивистском пределе энергии ионов этот процесс ускорения частиц приобретает черты взаимодействия электромагнитной волны с убегающим релятивистским зеркалом - энергия отраженной волны намного меньше энергии падающей волны, часть энергии преобразуется в энергию частиц [8].

Прогресс в развитии лазерных технологий привел к созданию установок с интенсивностью лазерных импульсов, обеспечивающей релятивистский режим взаимодействия с веществом и условия для создания компактных ускорителей заряженных частиц, разработки источника жесткого электромагнитного излучения. Обсуждение результатов многочисленных исследований по этой теме можно найти в обзорах [26-29].

В типичных условиях при взаимодействии мощной электромагнитной волны с плазмой формируются движущиеся с релятивистской скоростью тонкие слои (неоднородности), которые могут рассматриваться как релятивистские зеркала. Взаимодействие с ними другого электромагнитного излучения может быть рассмотрено как процесс отражения от релятивистского зеркала, в результате которого происходит изменение частоты и амплитуды отраженной волны.

Для разработки этих направлений европейским сообществом был создан международный проект ELI- Extreme Light Infrastructure. [30]. Основной целью проекта является решение фундаментальных и прикладных задач в области лазерной физики высоких энергий и, в частности, изучение поведения вещества в экстремальных световых полях. Проект представляет научную инфраструктуру, созданную коллаборацией из 13 европейских стран. Объекты инфраструктуры расположены в Румынии, Чехии и Венгрии.

Каждое подразделение проекта направлено на решение определенных научных задач. Задача аттосекундного центра (созданный в Венгрии) – получение сверхкоротких аттосекундных световых импульсов. Результаты исследований будут направлены на разработку инноваций в области материаловедения и биологии. Ядерный центр расположен в Румынии. Научно-исследовательская работа центра сконцентрирована на исследованиях в области фундаментальной ядерной физики и астрофизики.

В Чехии создан Лазерный центр. Именно здесь планируется получение рекордного значения мощности лазера. Исследования направлены на создание ускорителя заряженных частиц. Эти исследования направлены не только на прикладные задачи, они помогут в изучении поведения вещества под действием сильного электромагнитного излучения. Создание во второй половине 1980-х годов технологии усиления чирпированных импульсов (Chirped Pulse Amplification CPA [3], On 2 October 2018, Mourou and Strickland were awarded the Nobel Prize in Physics, along with for their joint work on chirped pulse amplification) и ее дальнейшее развитие привело к созданию петаваттных лазерных установок. В рамках проектов ELI и XCELS (Exawatt Center for Extreme light Studies) планируется запустить

сверхмощные лазеры, генерирующие фемтосекундные импульсы с интенсивностью порядка 10^{26} Вт см⁻² или выше. Однако, пока идет строительство данных установок, проводятся вычислительные эксперименты с амплитудами, соответствующими данным мощностям.

В следующей главе данной статьи мы представим результаты численного моделирования взаимодействия сверхмощного лазерного излучения с кластерной плазмой. Данные расчеты были проведены с помощью параллельного релятивистского двумерного PIC – кода. (Расчеты проводились на суперкомпьютере IBM Blue Gene\LP, расположенном на факультете ВМК им. М.В. Ломоносова). Данный режим представляет собой многообещающий и уникальный инструмент для исследования в лазерной физике.

Взаимодействие лазерного излучения с кластерной плазмой

При небольших значениях интенсивности лазерного излучения в качестве основного режима ускорения ионов рассматривается кулоновский взрыв. В условиях кулоновского взрыва электроны выталкиваются из кластера давлением сильного электромагнитного излучения. В результате образуется облако положительно заряженных ионов, которые ускоряются за счет кулоновского отталкивания одноименных зарядов. Энергия быстрых ионов пропорциональна электростатическому потенциалу положительно заряженного облака. Для кластеров относительно малого размера и высоких интенсивностей лазерного импульса ионы и электроны выталкиваются вперед давлением электромагнитной волны.

На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования взаимодействия сверхсильного лазерного импульса с кластером. Размер расчетной области равен $70\lambda \times 70\lambda$ с сеткой 20 ячеек на длину волны λ . Рассматривалось 10^4 квазичастиц в расчетной области. Кластер с диаметром 5λ в начальный момент времени расположен при $x=30\lambda$. Рассматривалась полностью ионизованная водородная плазма, отношение массы иона к массе электрона равно 1836. Электронная плотность соответствует отношению $\omega_{pe}/\omega = 7$.

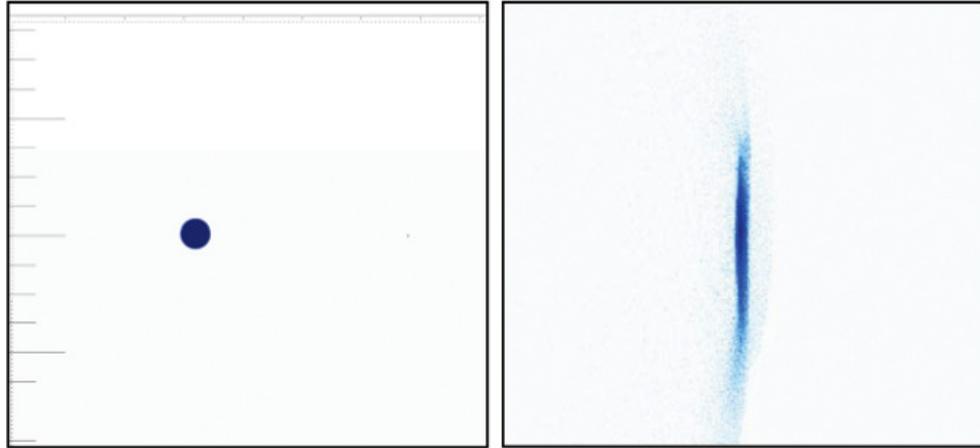


Рис.1. Распределение плотности ионов в $t=0$ (a) и $t=467$ (b).

Импульс с циркулярной поляризацией возбуждается в вакууме на левой границе расчетной области. Рассматривается лазерный импульс гауссовской формы с безразмерной амплитудой (обезразмеривание проводилось на длину волны импульса) лазерного импульса равной $a=316$. Кластер в этом случае подвергается сильному сжатию в продольном направлении и расширяется в поперечном направлении, получается, что лазерный импульс взаимодействует с тонким плотным плазменным слоем. На рисунках 2 и 3 представлены фазовая плоскость распределения ионов и энергетический спектр ионов.

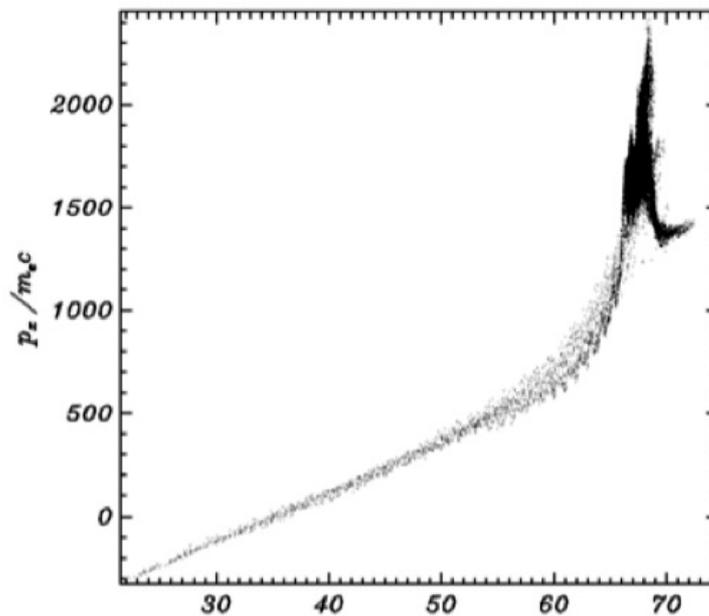


Рис. 2. Фазовая плоскость распределения ионов $t=125$.

Энергетический спектр ионов имеет узкое распределение с шириной около 10%. Ионы с наибольшей энергией локализованы внутри

«оболочки» (рисунок 2). Следует отметить, что при взаимодействии линейно поляризованного электромагнитного импульса с кластером, ионы приобретают энергию того же порядка, что и в случае с циркулярной поляризацией.

Данный численный эксперимент показывает новый механизм ускорения ионов.

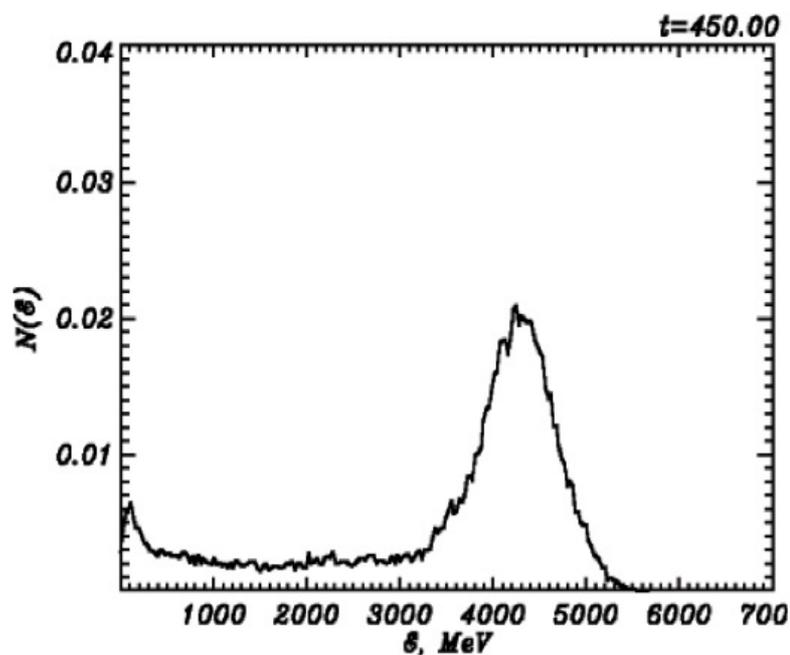


Рис. 3. Энергетический спектр ионов в $t=450$.

Заключение

Создание сверхмощных лазеров приведет к появлению новых приложений и областей исследований и откроет новые горизонты лабораторной астрофизики, управляемого термоядерного синтеза, биологии, медицины и фундаментальной медицины. Однако, следует учесть, что развитие данных технологий требует значительных инвестиций, происходит отбор задач и направлений, на основе их востребованности. Научные группы, работающие над развитием лазерных методов ускорения заряженных частиц, формулируют данную задачу как центральную.

Авторы выражают благодарность за обсуждения и полезные дискуссии С.В. Буланову, Т.Ж. Есиркепову, А.М. Федотову.

Литература

1. *Ечкина Е.Ю., Иновенков И.Н., Есиркепов Т.Ж.* О зависимости энергии ионов от параметров лазерного импульса и мишени в

- радиационно-доминантном режиме ускорения.//Физика плазмы №36(1), 2010, с. 17-32.
2. *Brakely E.A., Kronenberg A* Radiat. Res. 1998, т.150 S126.
 3. *Durante M. Cucinotta F.A.* Rev. Mod. Phys. 2011, т.83.
 4. *Kobayashi Y.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 2003, 210.
 5. *Schrtdt D. Elsasser T. Schulz-Ertner D.* Rev. Mod. Phys. 2010, т.82.
 6. *Caporaso G.J.* Phys. Med. 2008, т.24.
 7. *Shippers J.M.* Acta Oncol. 2011, т.50.
 8. *Буланов С.В.Хорошков В.С.* Физика плазмы 2002, т.28, 493.
 9. *Tajima T.* J.Jpn. Soc. Therap. Oncol 1989, т.9, 83.
 10. *Ma C-M* Med. Phys. 2001, т.28, 868.
 11. *Bulanov S.V.* Phys. Lett. 2002, т.299, 240.
 12. *Fourkal E.* Med. Phys. 2002, т.29, 2788.
 13. *Malka V.* Med. Phys. 2004, т. 31, 1587.
 14. *Tajima T.* Rev. Accel.Sci. Technol. 2009, 2, 201.
 15. *Esirkeпов T.Zh.* Phys. Rev. Lett. 2002, т.89, 175003.
 16. *Буланов С.В.* Физика плазмы 2002, т.28, 1059
 17. *Schwoerer H.* Nature 2006, т.439.
 18. *Bulanov S.S., Esarey et al.* Helium-3 and helium-4 acceleration by high power laser pulses for hadron therapy, Phys. Rev. ST Accel. Beam 2015 т.18
 19. *Sharma, Ashutosh and Kamperidis, Christos* Scientific Reports 2019 9
 20. *Magnusson, J. and Gonoskov, A. and Marklund, M. and Esirkeпов, T. Zh. and Koga, J. K. and Kondo, K. and Kando, M. and Bulanov, S. V. and Korn, G. and Bulanov, S. S.* Laser-Particle Collider for Multi-GeV Photon Production, Phys. Rev. Lett., 2019 т.122 (25), 254801
 21. *Буланов С.В. и др.* Лазерное ускорение ионов для адронной терапии. УФН, 2014, т. 184, №2.
 22. *Murakami M. Basko M.M.* Phys. Plasmas 2006, т.13
 23. *Krainov V.P. Smirnov N* Phys. Rep. 2002, т. 370
 24. *Echkina E. et al.* Laser Phys. 2009 т.19, 228.
 25. *Буланов С.В. и др.* Релятивистские зеркала в плазме – новые результаты и перспективы. УФН, 2013, т. 183, №5.
 26. *Strickland D. Mourou G.*//Opt.Comm., 1985, т 56 219
 27. *Mourou G.A., Tajima T, Bulanov S.V.*//Rev.Mod. Phys. 2006, т.78, 309.
 28. *Masaki Kando, T. Esirkeпов, J. Koga, S. Bulanov* Coherent, Short-pulse X –ray Generation via Relativistic Fluing Morrors. Review. Quantum Beam Science 2019.
 29. *S. Bulanov, T. Esirkeпов M. Kondo* Pelativistic mirrors in laser plasmas (analytical methods) Plasma Sources Science and Technology 2016, 25(5)
 30. <https://eli-laser.eu/>