Аналитическая модель ускорения ионов «медленным» светом

В.Ф. Ковалёв1,3, Е.А. Говрас2,3, В.Ю. Быченков2,3

1Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия  
2Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, [egovras@lebedev.ru](mailto:egovras@lebedev.ru)  
3Центр фундаментальных и прикладных исследований, ФГУП ВНИИА, Москва, Россия

На протяжении последних десятилетий лазерно-инициированное ускорение ионов является одной из интенсивно развивающихся областей физики высоких плотностей энергии. Активные исследования в данном направлении стимулируются, в частности, тем, что рост максимальной энергии ионов, генерируемых в экспериментах с лазерной плазмой, не так значителен, как у электронов. В качестве возможного механизма, который позволит существенно увеличить максимальную энергию ионов в эксперименте, рассматривается их ускорение полем кильватерной волны. В рамках этого механизма эффективный набор энергии частицей возможен, если она будет захвачена ускоряющим полем, то есть её движение должно быть синхронизовано с распространением лазерного импульса в плазме. Однако при кильватерном ускорении ионов достаточно остро стоит проблема их инжекции в движущееся ускоряющее поле. Являясь более массивными частицами, чем электроны, их предварительное ускорение до характерных групповых скоростей импульса на существующих лазерных установках сильно затруднено.

Возможное решение данной проблемы связывается с использованием в качестве мишеней, облучаемых мощным релятивистским лазерным импульсом, малоплотных сред с околокритической плотностью: различные пены или более однородные среды на основе углеродных нанотрубок. Правильным подбором плотности мишени, порядка порогового значения для релятивистски индуцированной прозрачности, можно добиться прохождения в мишень только части лазерного импульса с интенсивностью, близкой к максимальной. При этом импульс будет иметь достаточно крутой передний фронт, высокую интенсивность, и его начальная групповая скорость будет близка к нулю. При распространении по плазме вблизи переднего края импульса формируется слой разделения заряда между ионами плазмы и пондеромоторно отжатыми электронами. А вследствие малой групповой скорости импульса даже покоящиеся ионы плазмы будут захватываться данной ускоряющей структурой. Если при дальнейшем распространении импульса по плазме, его групповая скорость будет расти, например, вследствие релятивистской самофокусировки, захваченные ионы могут эффективно ускоряться.

На данный момент не существует аналитической теории предложенного механизма ускорения ионов. В настоящей работе мы делаем первые шаги в этом направлении. Для заданного движения лазерного импульса в плазме была построена аналитическая модель, описывающая движение ионов в поле разделения заряда, возникающем на переднем фронте импульса. Были рассмотрены нерелятивистский и релятивистский пределы движения ионов. В рамках нерелятивистского предела были определены условия инжекции частиц в ускоряющее поле и проанализирован начальный этап ускорения. Решение релятивистского уравнения движения, полученное с использованием группового подхода, позволило установить область значений основных управляющих параметров задачи, при которых обеспечивается синхронизация движения ионов и лазерного импульса, приводящая к эффективному набору энергии частицами.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты №№ 13-02-00426\_а, 14-02-31407-мол\_а, 14-29-09244-офи\_м и 15-02-03042\_а).