

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭФФЕКТА УСКОРЕНИЯ ДЕЙТОНОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ МАГНИТОЗВУКОВЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ

Г.Н.Дудкин, А.А.Луканин, Б.А.Нечаев, А.В.Пешков, В.А.Рыжков

*Научно-исследовательский институт ядерной физики
Томского политехнического университета*

634050, Томск

Поступила в редакцию 28 апреля 1992 г.

В статье сообщается об экспериментальном обнаружении эффекта ускорения дейтонов при столкновении под фиксированным углом двух квазиперпендикулярных магнитозвуковых ударных волн. Проанализированы возможные процессы инжекции ионов в режим ускорения вдоль магнитного поля.

Проблемы генерации быстрых протонов и тяжелых ионов в космосе ¹, актуальность задачи по повышению темпа ускорения частиц в лабораторных устройствах стимулируют поиск нетрадиционных методов ускорения с помощью возбуждения различного типа волн в плазме ⁵.

В нашей работе ³, на основе свойств магнитозвуковых бесстолкновительных ударных волн ⁴ (БУВ), была предложена идея ускорения положительно заряженных ионов "бегущим" электрическим полем, создаваемым двумя сталкивающимися БУВ, вектор напряженности которого направлен вдоль магнитного поля (рис.1). Предполагается, что ускоряемая частица за счет изменения угла столкновения θ , будет покоиться в системе координат связанной с областью столкновения волн и двигаться в лабораторной системе со скоростью $V \simeq \frac{V_F}{\sin \theta}$ под действием поля $E_Z = 2E_0 \sin \theta (Z \parallel H_0)$. В такой схеме нет ограничения на величину ρH (ρ - ларморовский радиус ускоряемого иона, H - величина магнитного поля) в отличие от других механизмов ускорения ионов на фронте магнитозвуковой БУВ, когда ускоряемая частица движется перпендикулярно H .

В эксперименте проведенном в керамической камере ($\varnothing = 18$ см, длина $L = 150$ см), два высокоскоростных потока дейтериевой плазмы, создаваемые при мощном ($P \leq 200$ МВт) разряде в скрещенных $\vec{E} \times \vec{H}$ полях, двигаясь навстречу друг другу поперек магнитного поля ($H_0 \sim 2 \cdot 10^4$ Гс), возбуждали в фоновой плазме магнитозвуковые возмущения ^{5,6} с протяженным ($\parallel H_0$) фронтом (≤ 10 см). Две пары плоских электродов располагались под углом $\sim 6^\circ$ к силовым линиям магнитного поля. С учетом геометрии магнитного поля угол столкновения двух магнитозвуковых БУВ составлял по расчетам $\theta \simeq 12^\circ$.

При возмущении одной квазиперпендикулярной магнитозвуковой БУВ в дейтериевой плазме ($n_0 \approx 10^{14}$ см⁻³, $T_0 \simeq 2$ эВ, альфвеновское число Маха $M_A \approx 1,2$, начальная величина $H_0 \approx 10^4$ Гс) составляющая поля E_Z , измеренная ориентированными вдоль магнитного поля плавающими зондами, близка к нулю. В дрейфовой трубе (соосной с разрядной камерой и имеющей ведущее магнитное поле) на пролетной базе ~ 50 см наблюдались сгустки быстрых частиц имеющих скорость $> V_F$, после которых регистрировался поток медленных частиц со сплошным спектром (рис.2а). Потенциал волны φ (измеренный зондами ориентированными перпендикулярно H_0) и скачок магнитного поля имели характерную структуру с префронтом.

В случае столкновения двух волн, вдоль магнитного поля регистрировалось "бегущее" электрическое поле квазиволны (области столкновения), потенци-

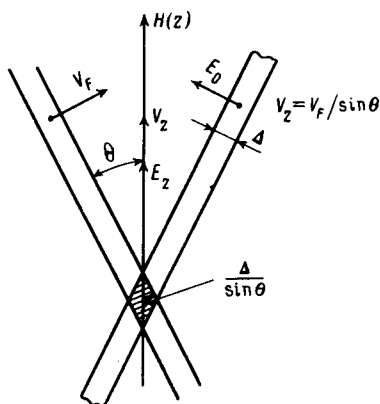


Рис.1. Схема эксперимента

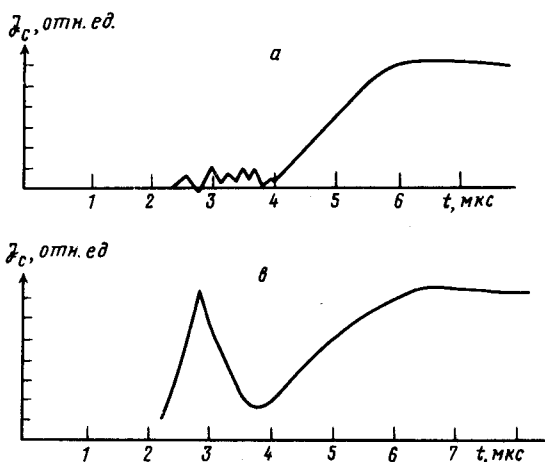


Рис.2. Временная развертка тока коллектора

ал которого $\varphi_Z > 2E_0\Delta \sin\theta$ (Δ – ширина фронта) и лежал в диапазоне $\varphi_0 < \varphi_2 \leq 2\varphi_0$, при этом оконечный коллектор фиксировал коррелированный с появлением поля E_2 импульс тока быстрых дейтонов (рис.2б), имеющих скорость большую, чем при возбуждении одной волны.

Дальнейшие исследования были направлены на измерения энергии ускоренных дейтонов методом наведенной активности. С этой целью в конце дрейфовой трубы, на расстоянии 1,5 м от разрядной камеры, была установлена мишень из нитрида бора в виде диска диаметром 29 мм и толщиной 1 мм. В середине диска размещался металлический коллектор с помощью которого измерялись токовые характеристики ускоренного пучка. Два NaI-спектрометра, включенные в схему совпадений, регистрировали γ -кванты при аннигиляции β^+ -частиц в материале мишени от реакции $^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$ ($^{15}\text{O} \rightarrow \beta^+$, $\tau_{1/2} = 123$ с). Идентификация реакции осуществлялась по измерению кривой распада ^{15}O . Эффективность регистрации β^+ -частиц спектрометром γ - γ -совпадений измерялась с помощью калиброванного источника ^{22}Na . Определение энергии ускоренных дейтонов осуществлялось сравнением выхода реакции $^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$ измеренного установкой с энергетической зависимостью относительного выхода этой же реакции, полученной на тандемном ускорителе Ван-де-Граафа ⁷ и найдена равной $12 \pm 0,5$ МэВ. Полное число прошедших через мишень дейтонов составило $\sim 5 \cdot 10^{10}$ частиц. Ошибка в определении энергии обусловлена неточным знанием некоторых характеристик установки (например, степени нейтрализации пучка дейтонов).

Расчеты показывают, что для достижения энергии полученной в эксперименте при столкновении двух магнитозвуковых БУВ под фиксированным углом $\theta \sim 12^\circ$, необходимо, чтобы начальная энергия (энергия инжекции) частиц движущихся в направлении вектора ускорения ($\parallel H_0$) составляла $\epsilon_0 \geq 1,6m_d V_F^2$ (для условий нашего эксперимента, когда $V_F \sim 10^8$ см/с, необходима $\epsilon_0 \simeq 60$ кэВ). Тогда на базе ускорения < 10 см ионы дейтерия могут ускориться до $\epsilon_{max} \geq 18m_d V_F^2$ (~ 1 МэВ), если ширина области занятой ускоряющим электрическим полем $\simeq \Delta/\sin\theta$, где $\Delta \simeq \frac{c}{\omega_{ep}\sqrt{2(M-1)}}$, ω_{ep} – электронная плазменная частота ⁴. Источником частиц с необходимой начальной энергией ϵ_0 может служить каждая из сталкивающихся волн, поскольку в работе ⁸ экс-

периментально показана возможность ускорения ($\perp H_0$) частиц на фронте БУВ до энергии $\leq 2m_i V_F^2$. При последующем упругом рассеянии на неоднородностях магнитного поля, масштаб которых сравним с ларморовским радиусом ускоренных частиц, возможен их захват в режим ускорения вдоль магнитного поля. Наличие в эксперименте в структуре БУВ так называемого предфронта, который обычно связывают с давлением быстрых частиц, ускоренных на фронте БУВ^{9,10}, а также регистрация быстрых частиц движущихся вдоль магнитного поля при возбуждении одной волны, по-видимому подтверждают вклад такого механизма инжекции частиц с необходимой начальной энергией. В заключение отметим, что оценки предельных возможностей механизма ускорения при столкновении двух магнитозвуковых БУВ характеризуются величиной темпа ускорения до ~ 1 ГэВ/м.

-
1. М. Лонгейр, *Астрофизика высоких энергий* М.: Мир, 1984 (*High energy astrophysics*, 1981, Cambridge University Press Cambridge London New York New Rochelle Melbourne Sydney).
 2. N.A. Ebrahim, *Phys. in Canada* **45**, 178 (1989).
 3. В.П. Григорьев, Г.Н. Дудкин, Б.А. Нечаев и др., Тезисы докладов 12-го всесоюзного семинара по линейным ускорителям. Харьков, 134 (1991).
 4. Y. Ohsava, *Phys. Fluids*, **29**, 3 (1986).
 5. В.А. Вшивков, Г.И. Дудникова, Ю.П. Захаров, А.М. Оришич. *Физика космической и лабораторной плазмы*, Новосибирск, 135 (1989).
 6. Б.А. Нечаев, А.В. Пешков, *ФП* **15**, 765 (1989).
 7. H. Vera Ruiz, A.P. Wolf, *Radiochemical Acta* **24**, 65 (1977).
 8. А.Т. Алтынцев, Г.Н. Кичигин, И.В. Лебедев, И.А. Строкин, *ЖЭТФ* **96**, 574 (1989).
 9. Е.Г. Бережко, Г.Ф. Крымский, *УФН* **154**, 49 (1988).
 10. Е.Г. Бережко, В.К. Елшин и др., *Физика космической и лабораторной плазмы*. Новосибирск 41 (1989).