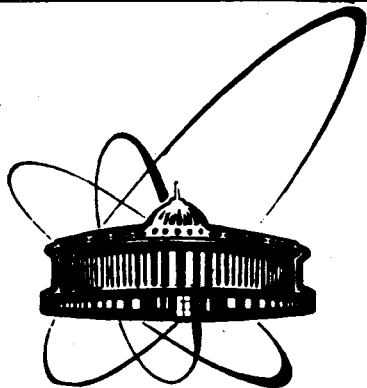


89-83



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Б 817

P2-89-83

А. Г. Бонч-Осмоловский

О ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХСИЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

Направлено в журнал "Physics Letters A"

1989

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных препятствий в генерации сверхсильных электрических полей в сильноточных релятивистских электронных пучках, в частности, при резонансном доплеровском взаимодействии пучка и волны^{1,2/}, является захват электронов полем волны и нарушение при этом гидродинамического характера взаимодействия. При выравнивании средней скорости электронов и фазовой скорости волны рост поля прекращается, происходит переход в нелинейный режим с изменением как фазовой скорости волны, так и скорости электронов, пучок переходит в кинетическую стадию, характерную для черенковского взаимодействия. Это обстоятельство приводит к ограничению максимальных электрических полей в РЭП (релятивистских электронных пучках с большим током) величиной порядка 200-300 кВ/см.

В данной работе на основе анализа этих физических трудностей резонансного доплеровского взаимодействия предлагается принцип встречного движения релятивистского электронного пучка и E -волны, фазовая скорость которой также близка к c . При этом ограничения на рост поля, связанные с захватом электронов волной, в существенной степени снимаются, и максимальное электрическое поле может в принципе достигать значений, на несколько порядков величины больших тех, которые характерны для попутного движения пучка и волны /резонанс с медленной и быстрой ленгмюровскими, например, модами пучка/.

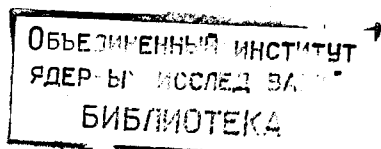
2. КИНЕМАТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ПУЧКА С ВСТРЕЧНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ /E-ВОЛНОЙ/

В основу рассмотрения положим гидродинамическое описание электронного пучка и его взаимодействия с продольной электромагнитной волной, развитое в предыдущих работах^{1,2/}.

В общем случае любого взаимного направления скоростей электронов \vec{v}_e и фазовой скорости волны \vec{v} интеграл уравнений движения электронов имеет вид:

$$\gamma'_e + \phi = \text{Const} = \gamma'_0,$$

/1/



причем $E \equiv E_z = -\frac{mc^2 \omega}{ev} \frac{d\phi}{d\psi}$, $\psi = -\omega t + kz$; ω, k - частота и

волновой вектор волны $|k \equiv k_z|$, $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, γ'_0 - начальное значение γ'_e .

В формуле /1/ γ'_e - релятивистский фактор электронов в системе отсчета, движущейся с фазовой скоростью волны, в дальнейшем для краткости СПВ /система покоя волны/. Вследствие закона преобразования энергии-импульса имеем

$$\gamma'_e = \gamma \gamma_e (1 - \beta \beta_e), \quad \beta = v/c, \quad \beta_e = v_e/c \quad /2/$$

и для скорости

$$\beta'_e = \frac{\beta_e - \beta}{1 - \beta \beta_e} \quad /3/$$

Из формулы /1/ видно, что по мере роста потенциала волны ϕ может наступить момент, когда пучок в СПВ остановится, т.е. произойдет захват электронов волной. Это значение обозначим ϕ_s :

$$\phi_s = \gamma'_0 - 1. \quad /4/$$

Значение ϕ_s ограничивает рост поля волны и максимальное электрическое поле, генерируемое в РЭП, поскольку для попутного движения $|\vec{v}_e \uparrow \vec{v}|$ величина γ'_0 не очень велика /например, для быстрой волны при $\beta \sim 1$, $\beta > \beta_e$, $\gamma'_0 \approx \gamma \gamma_e (1 - \beta_e)$ и $E_M \sim \gamma_e (1 - \beta_e)/$.

Иное положение будет для встречного движения пучка и волны $|\vec{v}_e \uparrow \downarrow \vec{v}|$, когда

$$\beta \equiv \beta_z = -|\beta|. \quad /5/$$

Из формулы обратного преобразования скорости $\beta_e = \frac{\beta'_e - |\beta|}{1 + |\beta| \beta'_e}$

видно, что при $\beta'_e = |\beta|$, $\beta_e = 0$, $\gamma'_e = \gamma$, т.е. пучок останавливается в лабораторной системе координат, что соответствует значению потенциала поля волны

$$\phi_{ост} = \gamma'_0 - \gamma \approx \gamma(2\gamma_0 - 1). \quad /6/$$

По мере дальнейшего роста поля волны в условиях доплеровского резонанса^{1/} при значении потенциала

$$\phi_s = \gamma \gamma_0 (1 + |\beta| \beta_0) - 1 \quad /7/$$

происходит захват электронов волной. При релятивизме пучка и волны в лабораторной системе отсчета при встречном движении имеем

$$\gamma'_0 \approx 2\gamma \gamma_0 \gg 1. \quad /8/$$

Формула /8/ - аналог известного эффекта " γ^2 " в ударном ускорении В.И.Векслера и в методе встречных пучков; все они имеют одну и ту же кинематическую природу.

Таким образом, релятивистский фактор электронов в СПВ может быть весьма велик, гораздо больше, чем для попутного движения. Переход к принципу встречного движения пучка и волны позволяет отодвинуть *далеко вверх по полю захват электронов волной* и тем самым сохранить даже при очень сильных полях квазилинейность процесса резонансного доплеровского взаимодействия пучка и волны, гидродинамическое его описание, быстрое нарастание поля при резонансе и т.д. Тем самым в принципе открывается возможность достижения очень больших электрических полей в РЭП.

3. ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО ПОЛЯ ВОЛНЫ

В связи с квазилинейным характером процесса взаимодействия пучка с волной при условии

$$\phi \leq 0,5 \phi_s^*, \quad /9/$$

оценку максимального поля волны можно провести, используя предположение о гармоничности /монохроматичности/ волны

$$\phi \sim |\phi| e^{i(-\omega t + kz)}$$

Используя связь между E и ϕ , а также формулы /8/ и /9/, получаем

$$|E|_{\max} \leq \frac{2\pi mc^2}{e\lambda} \gamma_0, \quad \lambda = \frac{2\pi v}{\omega}. \quad /10/$$

* Заметим, что на квазилинейной стадии $|\phi \leq 0,5 \phi_s|$ не достигается и значение поля $\phi_{ост}$, мало отличающееся от ϕ_s при $\gamma_0^2 \gg 1$. Вопрос о точном выполнении условия /9/ есть вопрос скорее экспериментальный /в том числе и с точки зрения специального вывода системы из резонанса при достижении /9//, нежели теоретический. Нелинейная теория^{1/} позволяет и превысить порог /9/.

В качестве иллюстрации возьмем

$$\gamma_0 = 10, \lambda = 3 \text{ см.}$$

Тогда имеем:

$$E_{\text{макс}} = 10^7 \text{ В/см.} \quad /11/$$

С помощью несложного анализа уравнения Максвелла $\text{div} \vec{E} = 4\pi\rho = \frac{4\pi J_e}{\pi a^2 v_e}$ можно показать, что для получения такого поля необхо-

дим ток электронного пучка порядка 100 кА $|J_e \approx 40 \text{ кА}|$, т.е. $n_e \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Одним из важнейших вопросов в связи с рассмотренным принципом встречного движения пучка и волны при доплеровском резонансном взаимодействии является энергетика этого взаимодействия, т.е. обмен энергией между пролетными электронами и E-волной.

Анализ, который мы здесь не приводим /это предмет специальной работы/, показывает, что с учетом нелинейных эффектов в рамках условия /9/ пучок обменивается энергией с волной. При этом релятивистский фактор движения электронов меняется слабо $|\Delta\gamma_e/\gamma_e \ll 1|$, а передаваемая мощность может достигать сотен мегаватт и более.

Рассмотренный процесс может представить интерес для эффективного ускорения заряженных частиц до сверхвысоких энергий, а также для генерации электромагнитного излучения большой мощности в сантиметровом диапазоне.

В заключение автор выражает глубокую благодарность К.А. Решетниковой за обсуждения и конструктивные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бонч-Осмоловский А.Г., Решетникова К.А. ЖТФ, 1986, т.56, вып.9, с.1664.
2. Бонч-Осмоловский А.Г., Решетникова К.А. Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высокой энергии, Новосибирск, Наука, 1987, т.1, с.190; ОИЯИ, Р9-86-586, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 февраля 1989 года.