

## Термоядерный синтез на встречных пучках

© М.А. Кумахов

Институт рентгеновской оптики,  
125315 Москва, Россия  
e-mail: mkumakhov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 6 марта 2013 г.)

Предложен метод организации встречных пучков дейтерия и трития в круге с наэлектризованными стенками. В таком круге пучки ионов оказываются запертыми в потенциальной яме, высота которой существенно выше энергии сталкивающихся частиц. При этом происходит увеличение фазового объема ионных пучков из-за многократного рассеяния. Сделаны оценки вероятности термоядерных реакций в этих условиях. Сделаны также оценки параметров термоядерного реактора, основанного на этом принципе. Рассмотрен ряд рисков и опасностей, которые ждут исследователей на этом пути.

### Введение

Термоядерный синтез (ТС) привлекает интерес в течение многих лет. Основное направление здесь связано с созданием горячей плазмы в сильных магнитных полях [1].

Серьезные успехи, полученные в этой области в течение последних 60 лет, привели к идее о необходимости создания экспериментального термоядерного реактора на базе международной кооперации (проект ИНТЕР). Другим направлением является использование мощных импульсных лазерных пучков для решения этой задачи [2]. Огромные усилия, которые предпринимаются для решения проблемы ТС, оправданы, так как речь идет о глобальном вызове, поставленном перед человеческой цивилизацией.

### Эффект бесконтактного многомиллионного оборота заряженных частиц в полном наэлектризованном круге

В настоящей работе для решения проблемы ТС предлагается новый подход. Этот подход основан на новом физическом эффекте, который был недавно обнаружен [3,4]. В работе [3] был предложен и обоснован новый механизм бесконтактного поворота заряженных частиц в полном круге, стенки которого наэлектризованы.

Электризация в одном случае может производиться самими частицами, которые вводятся в круг. В другом случае можно использовать внешнее поле для создания индуцированного электрического поля внутри круга.

Эксперименты [4], выполненные в течение последних 3 лет нашей группой, показали что этот эффект существует как для отрицательных частиц (электронов), так и для положительных частиц (ионов).

Эти эксперименты [4] продемонстрировали, что при высоком вакууме  $\sim 10^{-12}$  mmHg, возможно получение килоамперных стабильных токов в круге.

Максимальная плотность частиц ( $n_{ch}$ ) в круге определяется из равенства сил, противоположно действующих на частицу в круге: с одной стороны на частицу действуют кулоновские отталкивающие силы, с другой стороны фокусирующие силы со стороны стенки, при этом максимальная плотность

$$n_{ch} = 2[\pi\epsilon_0 U_p / e]^3 / 2 \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость (так как в дальнейшем предполагается вакуум в круге  $\epsilon_0 = 1$ ),  $e$  — заряд частиц,  $U_p$  — электрическая прочность материала, в стеклах  $U_p \approx 5 \cdot 10^5$  V/cm.

Отсюда видно, что  $n_{ch} = 5 \cdot 10^{15}$  part/cm<sup>3</sup>.

Такая высокая плотность обусловлена высокой электрической прочностью круга и соответственно большим потенциальным барьером. Градиент этого потенциала, сила, которая действует на частицу в круге, не дает им приблизиться к стенке.

Дополнительная сила, которая еще возникает в круге, это центробежная сила

$$F_c = \frac{2E}{R}, \quad (2)$$

где  $E$  — энергия частицы, а  $R$  — радиус круга.

В дальнейшем радиус круга выбирается достаточно большим, так что центробежная сила мало влияет на рассматриваемые проблемы.

### Метод встречных пучков

Нами предлагается организация двух встречных пучков ионов, например, ионов дейтерия с дейтерием, или ионов дейтерия с ионами трития.

В последнем случае при энергии двух ионов  $\sim 100$  keV сечение имеет значение  $5 \cdot 10^{-24}$  cm<sup>2</sup> [2].

В одной реакции выделяется около 17.6 MeV (около 3.5 MeV — ион гелия и около 14.1 MeV — нейтрон).

При близких сближениях ионов, они могут отклоняться на 90°. При этом ионы могут подойти к стенке с этой

энергией. Очевидно, необходимо, чтобы потенциальный барьер был выше 50 keV.

Другой более важный процесс: в основном, и главным образом, имеют место многократные отклонения на далеких расстояниях. Хотя углы отклонения при этом малы, происходит набор поперечной энергии частиц и со временем эта поперечная энергия может превзойти потенциальный барьер (см. ниже).

Предлагаемый метод имеет ряд несомненных достоинств перед методом магнитной изоляции плазмы [1].

Первое принципиальное отличие: у нас нет нейтральной плазмы, т.е. нет электронов, есть только ионы, которые мы получаем из двух ионных ускорителей. Если по каким-либо причинам в круге появятся электроны, они немедленно погибнут на положительно заряженной стенке.

Таким образом, у нас в круге нет плазмы, а есть два одинаково заряженных пучка, которые проникают друг через друга.

Второе достоинство: круг автоматически создает условия, когда частицы многие десятки миллионов раз взаимодействуют друг с другом. Взаимодействие это кулоновское.

Третье достоинство: природа устроена так, что нам удастся реализовать высокую потенциальную яму в круге, в которой можно запереть оба встречных пучка. Высота потенциального барьера крайне важна для реализации ТС.

По-видимому, можно технически реализовать условия, когда величина потенциального барьера будет 250–500 keV и выше, т.е. в 5–10 выше энергии сталкивающихся ионов. Этот последний фактор оказывается решающим в нашей проблеме.

Четвертое достоинство: предлагаемый метод обладает простотой. Конструкция круга — дешевая и легкая.

Перейдем теперь к анализу процессов на встречных пучках.

## Увеличение фазового объема встречных пучков в круге

При анализе взаимодействия двух встречных пучков сделаем следующие допущения:

1. В круге присутствуют в основном только встречные пучки; концентрация газа  $n_2 \ll n_k$ , где  $n_2$  — концентрация газа,  $n_k$  — концентрация встречных пучков, которая определяется током с двух ускорителей. Более точно  $n_2 \sigma_2 \ll n_k 5 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$ , где  $\sigma_2$  — сечение взаимодействия встречных пучков с атомами газа.

2. Пренебрегаем центробежной силой: по сравнению с фокусирующей силой со стороны стенки круга. Это вполне допустимо, так как размер круга, т.е. диаметр реактора, в основном будет определен проблемами теплоотвода, и он получается не очень маленьким (см. ниже).

3. Предполагаем, что при взаимодействии встречных пучков ионов реализуется только упругое взаимодействие, когда неупругих потерь энергии ионов нет.

С учетом этих факторов в первом приближении потенциал взаимодействия ионов с наэлектризованной стенкой можно считать гармоническим

$$U(r) = \frac{U_B r^2}{l^2},$$

где  $U(r)$  — потенциал возбуждения,  $U_B$  — потенциальный барьер стенки,  $r$  — отсчитывается от центра круга,  $l$  — полуширина круга (точнее, вакуумная часть круга, так как круг имеет еще не очень тонкие стенки).

Величина потенциального барьера  $U_B$  равна

$$U_B = eU_p d,$$

где  $e$  — заряд частицы,  $U_p$  — электрическая прочность круга,  $d$  — толщина стенки круга. В зависимости от толщины  $d$  в дальнейшем положим, что  $U_B$  может быть от 250 до 500 keV и даже выше.

Рассмотрим частицу, ион дейтерия, с энергией  $E = 50 \text{ keV}$ , проходящий через облако встречных ионов трития с примерно такой же энергией. Пусть плотность ионов трития (как и ионов дейтерия) равна  $N$ .

В рамках допущенных выше предположений ион дейтерия будет проходить через облако встречных ионов дейтерия, испытывая более чем в 99.9999 случаях многократные небольшие отклонения. Так как эти столкновения являются независимыми и их число много больше 100, то угловое распределение ионов дейтерия будет гауссовым.

При этом среднеквадратичный угол после прохождения пути  $X$  будет равен

$$\theta^2 = 2\pi N \left( \frac{e^2}{E_0} \right) \ln[210]X. \quad (3)$$

Наряду с этим главным процессом будет иметь место крайне редкое событие, когда ион дейтерия отклонится на угол  $\theta = 90^\circ$ . Определим критическое расстояние  $r_{cr}$ , при котором это произойдет. Для кулоновского потенциала это расстояние приближенно можно определить из формулы

$$\theta = \frac{e^2 \sqrt{\pi}}{E_0 \rho} \frac{1}{2}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — прицельный параметр между ионом дейтерия и трития. При  $\theta = 90^\circ$  и  $E = 50 \text{ keV}$ ,  $\rho = r \approx 1.7 \cdot 10^{-12} \text{ cm}$ .

В то же время расстояние  $r_e$ , при котором произойдет термоядерная реакция определяется из формулы

$$r_e = \left( \frac{5 \cdot 10^{-24}}{\pi} \right)^{1/2} = 1.25 \cdot 10^{-12} \text{ cm}.$$

Как видим, эти расстояния весьма близки. Оценим вероятность термоядерной реакции,  $W_T$ :

$$W_T = N \sigma_T X, \quad (5)$$

где  $\sigma_T = 5 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ , было принято для примера, что  $N = 10^{16} \text{ 1/cm}^2$ .

При  $W_T = 1$  имеем реакцию. Это произойдет при длине

$$X = \frac{1}{N\sigma_T} = \frac{1}{10^{16} \cdot 10^{-24}} = \frac{10^8}{5} = 2 \cdot 10^7 \text{ cm.}$$

Итак, ион дейтерия должен пройти путь в  $2 \cdot 10^7$  см, чтобы с вероятностью единицы произошла реакция синтеза. Ион дейтерия с  $E_0 = 50$  keV имеет скорость

$$V_D = 0.976 \cdot 10^6 \sqrt{E_0} = 2.2 \cdot 10^8 \text{ cm/s.}$$

Соответственно ион дейтерия пройдет путь в  $2 \cdot 10^7$  см за время

$$t_1 = \frac{2 \cdot 10^7}{2.2 \cdot 10^8} = 0.9 \cdot 10^{-1} \text{ s.}$$

Однако за это время (или на длине  $2 \cdot 10^7$  см) произойдет существенное угловое расширение пучка из-за многократного рассеяния. При этом возрастает поперечная энергия частиц и они все ближе приближаются к краю потенциального барьера, за которым они уже выпадают из игры.

## Оценка параметров термоядерного реактора

Размеры реактора будут зависеть от возможности съема тепла от стенок круга. Стенка круга в данном случае играет роль первой стенки ТР.

Мы не будем вдаваться в многочисленные технические и технологические проблемы первой стенки.

Рассмотрим ситуацию, когда при величине потенциального барьера  $\sim 300$  keV (что вполне достижимо) реактор выдает мощность в 100 MW. Очевидно, что ионы гелия в основном будут нагревать стенки (их толщина около 1 см), а нейтроны будут уходить дальше — на blanket. Так как ионы несут около 20% энергии, то 20 MW энергии будут выделяться на стенках круга. Будем для оценок считать, что можно обеспечить теплосъем на уровне  $1 \text{ MW/m}^2$ . Это означает, что внешняя площадь круга должна быть близка к  $20 \text{ m}^2$ . Если взять внутренний диаметр круга, по которому течет ток ионов дейтерия и трития, равный 0.2 м, а внешний диаметр 0.22 м, то круг должен иметь большой диаметр около 8 м, чтобы снять 20 MW при принятых предположениях.

В дальнейшем примем, что ионы дейтерия проходят путь, равный  $3.1 \cdot 10^8$  см, за 1 с и при этом из-за многократного рассеяния их поперечная энергия достигает 300 keV. Для принятых размеров реактора объем вакуумной части круга достигает  $8 \cdot 10^5 \text{ cm}^3$  и для этого объема получаем плотность тока дейтерия (и соответственно ионов трития), равным  $2.13 \cdot 10^{14} \text{ 1/cm}^3$ , а общее количество частиц в круге, равным  $17 \cdot 10^{19}$  частиц, т. е.  $28.3 \text{ A}$ .

$U, \text{ keV}$	$X, \text{ cm}$	$\omega$	$\eta$	MW
25	$1.55 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	2.8	8
100	$6.2 \cdot 10^7$	$6.4 \cdot 10^{-2}$	11.2	32
300	$1.86 \cdot 10^8$	$1.9 \cdot 10^{-2}$	33.6	96
500	$3.1 \cdot 10^8$	$3.2 \cdot 10^{-2}$	56.3	160
1000	$6.2 \cdot 10^8$	$6.4 \cdot 10^{-1}$		320
1520	$9.4 \cdot 10^8$	1	176	500

Вероятность для частицы на длине  $X$  термоядерного взаимодействия оценивается по простой формуле

$$\omega = \frac{X}{X_{\text{cr}}},$$

где

$$X_{\text{cr}} = \frac{1}{2.13 \cdot 10^{14} \cdot 10^{-24}} = 9.1 \cdot 10^8 \text{ cm.}$$

Ясно, что при  $X = X_{\text{cr}}$  вероятность реакции считается равной единице. КПД реактора  $\eta$  рассчитывался по формуле

$$\eta = \frac{17.6 \text{ MeV}}{0.1 \text{ MeV}} \omega.$$

Ясно, что это упрощенная оценка, так как считается, что на израсходованную энергию 0.1 MeV с вероятностью  $\omega$  получаем 17.6 MeV, т. е. эта оценка реально недооценивает ряд потерь энергии, которые происходят в стенке реактора и при преобразовании энергии частиц в энергию, которая затем реально будет использована.

В таблице даны расчеты  $\omega$ ,  $\eta$  и мощности реактора в мегаватт. Как видно, при значении потенциального барьера, равном 300 keV, мощность ТР достигает 96 MW. Ее можно увеличить, увеличивая потенциальный барьер, но при этом необходимо увеличивать размеры реактора.

Таблица рассчитана для энергии дейтерия  $E_0 = 100$  keV (энергия ионов трития при этом невелика, несколько килоэлектронвольт).

## Проблемы и риски

В предлагаемом варианте ТР имеется ряд серьезных проблем и рисков, на некоторые из которых хотелось бы обратить внимание.

Температура стенки круга не должна превышать  $400\text{--}500^\circ\text{C}$ . Это необходимо, чтобы индуцированный заряд стабильно сохранялся. Поэтому важно использовать современные эффективные системы отвода тепла.

Ионы гелия и нейтроны, попадающие на стенку, приводят к возникновению вторичной эмиссии ионов и электронов. Электроны не представляют опасности, так как они оседают на стенке. Но ионы представляют крайне большую опасность, так как возникновение большого количества ионов в круге приведет к тому, что резко упадет вероятность термоядерных процессов. Поэтому необходимо воспрепятствовать этому.

Характерная энергия распыляемых ионов невелика, в районе нескольких десятков электронвольт. Поэтому необходимо создать на внутренней стороне стенки небольшой потенциальный барьер, в районе от сотен eV до 1–2 keV, чтобы воспрепятствовать входу распыленных ионов в вакуумный канал.

Одним из возможных вариантов является использование тонкой металлической сетки с соответствующим потенциалом. Такая сетка, с одной стороны, решает задачу защиты канала от распыленных ионов, а с другой стороны, практически не оказывает влияние на индуцированный потенциальный барьер с высотой в несколько сотен килоэлектронвольт.

Есть еще одна опасность, о которой необходимо сказать. Когда в круг, рассмотренный выше, с объемом  $\sim 10^6 \text{ cm}^3$  инжектируется, например, пучок ионов дейтерия с током  $\sim 30 \text{ A}$ , то в круге с диаметром 8 м при скорости ионов  $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$  возникает ток  $\sim 10^7 \text{ A}$ .

При таких больших токах возникает разрывающая сила, которая направлена наружу круга. Оценки показывают, что напряжения на разрыв при этом превышают 100 МПа, что недопустимо для многих материалов (например, для стекол это напряжение составляет всего несколько десятков мегапаскалей). Это означает, что при работе реактора необходимо осуществить пуск ионов дейтерия и трития одновременно. При этом возникающие магнитные поля и соответственно и сил будут компенсированы. Есть еще большое количество задач, связанных с правильным выбором материала круга и т. д.

Все это требует дальнейшего экспериментального и теоретического исследования.

## О некоторых применениях предлагаемого реактора

Если ограничиться более скромными задачами, чем реализация ТС с высоким КПД  $\gg 1$ , то возможно при меньших инжектируемых токах и соответственно меньшем выходе термоядерной энергии и соответственно меньшем выходе термоядерной энергии использование предлагаемого метода для решения ряда прикладных задач. Это связано с тем, что при этом возможно создание сравнительно дешевого интенсивного источника термоядерных нейтронов. В настоящее время ведутся серьезные работы по созданию коммерческого реактора на быстрых нейтронах (БР).

БР должен замкнуть ядерный топливный цикл, должен быть безопасен и т. д., что, по-видимому, возможно, если удастся не очень дорого решить проблемы теплоотвода.

Рассматриваемый вариант ТР на встречных пучках, если удастся решить ряд технологических и инженерных проблем, также может быть использован для решения подобных задач.

При меньших потоках термоядерных нейтронов  $\sim 10^{18} \text{ 1/s}$ , когда инжектируемые токи будут составлять несколько Ампер, возможно решение задачи борозахватной нейтронной терапии. При этом на одном ТР

можно разместить более десятка станций для лечения пациентов. Имеется большое количество других применений.

## Заключение

Для того чтобы убедиться в правильности предложенной концепции, необходимо провести ряд экспериментов на встречных пучках на небольших токах инъекции, порядка десятка миллиампер. Такой эксперимент можно провести на уже существующей технологии кругов, созданной в нашей группе. Этот эксперимент даст ответ на ряд принципиальных вопросов.

## Список литературы

- [1] Лукьянов С.Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: Наука, 1975.
- [2] Хетлер М., Кристенсен М. Введение в управляемый термоядерный синтез. М.: Мир, 1980.
- [3] Кумахов М.А. Пат. РФ № 2011122945. 08.06.2011. РСТ/RU2012/000418, WO 2012/169932 A2.
- [4] Кумахов М.А., Тегаев Р.И. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 6. С. 147–150.