

РЕШЕНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПРОБЛЕМЫ И ПРОБЛЕМ СИНТЕЗА ЯДЕР МОЖЕТ БЫТЬ ДРУГИМ.¹

В.М. Иоффе

E-mail: alkornsk@mail.ru

I. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени проблема создания рентабельной термоядерной электростанции далека от своего решения. Более того, развиваемые сегодня пути решения этой задачи на основе инерциального (инерционного) термоядерного синтеза [1] выбраны не совсем удачно, причем не только с точки зрения сложности получения плазмы, отвечающей критерию Лоусона. Такие методы, как лазерный разогрев твердотельной мишени из смеси дейтерия и трития или разогрев ее пучком ионов или использование инерционного Z-пинч эффекта, с планируемой заменой всей токопроводящей системы внутри реактора, после каждого микровзрыва, хотя и способны обеспечить одиночную термоядерную вспышку трудно использовать для создания промышленной электростанции. Очевидно, что частота повторения термоядерных микровзрывов в реакторе, пропорциональная выделяемой мощности, должна быть достаточно большой. К примеру для электростанции мощностью порядка одного ГВт частота повторения микровзрывов должна составлять десятки Герц. В таких условиях затруднительно обеспечить фокусировку лазерного или ионного излучения большого числа источников в заданную точку реактора и предварительное помещение в эту точку мишени с учетом того, что за сотые доли секунды до этого в реакторе произошел микровзрыв эквивалентный взрыву десятков кг тротила. В настоящее время нет ответа на вопрос за какое минимальное время технически можно обеспечить замену мишени в реакторе и совершенно не ясно часы это минуты или секунды. Например, в лазерном NIF проекте [2] сегодня замена мишени происходит за сутки. Ждет своего решения задача преодоления деградации оптических элементов под воздействием ионизирующего излучения. В свою очередь не вызывает сомнений практическая невозможность обеспечения за доли секунды замены разрушенной микровзрывом токонесущей системы внутри реактора на новую при использовании инерционного Z-пинч эффекта. Вряд ли известное правило шаха и осла в этих случаях осмысленно применяется. Скорее люди надеются, что самые трудные технические проблемы, до которых на их этапе им почти нет дела, решат если не они то другие в дальнейшем по ходу работы на следующей стадии большого пути, до которой еще очень далеко. Пока безрезультатные попытки получения энергии из удерживаемой магнитным полем плазмы, требующие немалых средств, труда и времени, скорее развеивают, чем питают надежды на создание в обозримом будущем рентабельной термоядерной станции. Если на основе прежних идей двигаться к цели, то, не исключено очередное неопределенно долгое и неритмичное выделение и освоение средств без практического выхода, постепенное уменьшение вливаний, старение и деградация исполнителей и запись тематики в более безнадежную. Давайте рассмотрим другой путь.

II. МЕТОД УСКОРЕНИЯ МАКРОЧАСТИЦ

Проблема инерционного термоядерного синтеза связана с необходимостью быстрого нагрева определенного объема плотного вещества за короткое время. Идея инерционного термоядерного синтеза заключается в том, чтобы накопить энергию, а потом почти мгновенно преобразовать ее в тепло в небольшой миллиграммовой dt-капсуле (смеси дейтерия и трития в твердотельном (замороженном) состоянии). Можно поступить иначе, накапливая в виде кинетической энергии в самой dt-капсуле, путем ее ускорения. Ускорять капсулу надо до скоростей порядка 10^6 метров в секунду, что приблизительно соответствует оптимальной температуре термоядерной реакции порядка 10-20 кэВ, если эту энергию преобразовать в тепло в результате удара о мишень, помещенную внутри реактора, или о другую ускоренную в dt капсулу, при встречном движении капсул. При этом, что немаловажно, появляется возможность

¹ Вопросы высоковероятного столкновения отдельных атомных ядер см. на 10 стр.

доставки топлива в полностью не остывший от предыдущего микровзрыва реактор. Очевидно, что термоядерного поджига можно добиться также при бомбардировке dt мишени ускоренным твердым телом. Вопрос стоит только в том, каким образом осуществить необходимое ускорение макрочастиц и выполнить необходимые для этого ускоряющие (относительно недорогие) устройства приемлемых для изготовления размеров? Хотя идея ускорения твердотельных макрочастиц с целью решения термоядерной проблемы не нова и произведена оценка возможностей использования для этих целей различных механизмов ускорения [3], до недавних пор не было найдено приемлемых технических решений. Расчеты показывали, что необходимые размеры ускорителей макрочастиц огромны (порядка и более 100 км). Задачей данной работы является показать то, что технические решения термоядерной проблемы при относительно небольших размерах ускорителей в принципе существуют. И эти решения в основном при помощи технологий тонких пленок могут быть реализованы.

Для пояснения возможного механизма ускорения обратимся к рис. 1, на котором изображен источник тока величиной I замкнутый через полосу (скользящий контакт), расположенную на поверхности двух параллельных токонесящих шин, находящихся на расстоянии d друг от друга. Причем полоска выполнена перпендикулярно по отношению к шинам, а часть поверхности шин, контактирующая с полоской, лежит в одной для определенности горизонтальной плоскости. Магнитное поле B (точнее магнитная индукция) направлено по вертикали нормально к плоскости поверхности полоски. На переключку (полоску) действует сила $F=BI d$, которой если пренебречь силой трения и силой сопротивления воздуха, соответствует ускорение $a=BI d/m$ и скорость $V=(BI d/m)t$, векторы которых направлены вдоль токонесящих шин, где t - время ускорения, m - масса полоски.

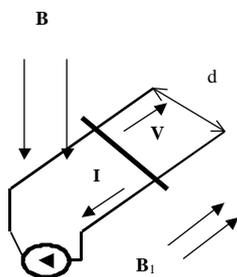


Рис. 1. Контактное ускорение

Длина токопроводящих полосок при этом равна:

$$L=1/2 (mV^2)/(Ibd) \quad (1).$$

Например, при $B= 10$ Тл, $V=10^6$ м/с, $I=10^5$ А, $m=10^{-6}$ кг, $d=2.5 \cdot 10^{-3}$ м, получим $L=200$ м, $t=4 \cdot 10^{-4}$ с. Как видно размеры ускорительной системы вполне приемлемы для практической реализации. Создание импульсного источника тока в 10^5 А не относится к неразрешимым техническим проблемам. В различных физических экспериментах применяются импульсные источники токов, величина тока в которых на порядки больше. Создание магнитного поля 10 Тл также вполне реализуемо. Исключить трение скользящего контакта о воздух можно, поместив всю систему в вакуум, Исключить или уменьшить до необходимой величины трение скользящего контакта о рельсы можно путем введения дополнительного магнитного B_1 поля, направленного по направлению движения скользящего контакта (см фиг.1). В этом случае появляется сила действующая на полоску, направленная вертикально вверх, что позволяет компенсировать вес полоски и тем самым уменьшать силу трения, которая пропорциональна весу полоски. Исключить трение скользящего контакта о рельсы можно также путем вертикального или почти вертикального расположения шин - рельс, при необходимости для легкого прижима скользящего контакта к рельсам можно использовать дополнительное магнитное поле. Поскольку ток большой величины может сжечь крошечную переключку, имеет смысл токоведущие шины-рельсы и переключку изготавливать из сверхпроводящего материала. Полагая, что I_c - критическая плотность тока материала сверхпроводниковой переключки, ρ - плотность, S - площадь сечения, $m=\rho Sd$, а через шины и переключку течет ток $I=I_c S$ из (1), получим минимальные размеры ускоряющей системы:

$$L=L_{\min}=\frac{1}{2}(\rho V^2)/(I_s B) \quad (2).$$

При температурах жидкого гелия ($T=4.2$ К) для сплава Nb-Ti при $\rho=6.5 \cdot 10^3$ кг/м³, $V=10^6$ м/с, $I_s=5 \cdot 10^5$ А/см², при внешних полях 5Тл ($B=5$ Тл) получим для $L_{\min}=1.3 \cdot 10^5$ м. Примерно такой же минимальный размер ускорительной системы получается при $B=6$ Тл для Nb₃Sn. Данные о критических плотностях токов этих материалов в магнитных полях взяты из [4]. Скользящий контакт-перемычку можно использовать, как транспортное средство доставки термоядерного топлива в реактор при $L > L_{\min}$.

Поскольку контактный метод ускорения макрочастиц имеет очевидные недостатки, имеет смысл использовать другой простой способ ускорения макрочастиц, построив аналог линейного резонансного ускорителя заряженных частиц. Сверхпроводник, предварительно снабженный магнитным моментом, можно ускорить в пространственно неоднородном магнитном поле. Ускоряющая система такого ускорителя выполнена из множества соленоидов - аналогов пролетных или дрейфовых трубок, имеющих общую ось Z. Причем четные соленоиды запитываются переменным током в противоположной фазе с нечетными. Пусть сверхпроводник с циркулирующим в нем током расположен между двумя ускоряющими соленоидами. Причем в заднем соленоиде ток течет в противоположном направлении по отношению к току сверхпроводника, а в переднем соленоиде циркулирует в одном с ним направлении. Сверхпроводник отталкивается от заднего соленоида и притягивается к переднему. Как только сверхпроводник проскакивает по инерции передний соленоид, направление поля в соленоиде меняется на противоположное. И процесс ускорения повторяется. Ускоряющая система может быть реализована иначе. Когда во всех соленоидах, находящихся сзади от ускоряемого тела ток течет в противоположном направлении по сравнению с соленоидами, размещенными впереди ускоряемого тела, или когда ток подается только на соседние соленоиды, между которыми находится ускоряемое тело. Пусть ускоряемое тело выбрано в виде цилиндра. Для цилиндра диаметром d и высотой h и плотностью ρ при расстоянии между ускоряющими цилиндрами D и плотности тока I_s магнитный момент равен $M = 1/3 \pi I_s h (d/2)^3$, при $m = \pi \rho h d^2/4$ сила $F = M dB/dZ \approx 2B M/D$, которой соответствует ускорение $a \approx 2B M/Dm = 1/3 BI_s d / (D \rho)$, где B - средняя за время ускорения величина индукции магнитного поля ускоряющих соленоидов. Для кольца диаметром d получим $a \approx 1/2 BI_s d / (D \rho)$. Для полоски ускоряющейся по рельсам величина ускорения в свою очередь равна $a = BId/m = BI_s/\rho$. Поскольку приблизительно половину времени безконтактная макрочастица не ускоряется, при одинаковой величине ускорения макрочастиц размеры бесконтактного ускорителя будут больше, чем при контактном ускорении. Для уменьшения размеров ускорителя имеет смысл увеличивать частоту переменного тока по мере ускорения частицы или использовать большое число источников тока, работающих на разных частотах. Вместо соленоидов могут быть применены СВЧ резонаторы, точнее их преимущественно индуктивные части.

III. ГЛАВНАЯ ПРОБЛЕМА: КАК УМЕНЬШИТЬ РАЗМЕРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ НА ПОРЯДКИ

То есть, размеры ускорителей пропорциональны $\rho/(BI_s)$. Из чего следует простое и не новое утверждение, что для практического решения термоядерной проблемы необходимы сверхпроводящие материалы, способные пропускать большие сверхпроводящие плотности тока при больших магнитных полях, причем величины плотностей токов или/и магнитных полей должны многократно превосходить соответствующие величины сегодня существующих сверхпроводников. Поскольку уже с давних пор лучшими сверхпроводниками являются сплавы ниобия, а прогресс в создании новых сверхпроводников совершенно невозможно прогнозировать, проблема кажется практически неразрешимой. Однако, необходимые материалы вполне возможно создать, если учесть что в ускоряемой макрочастице может содержаться незначительное количество сверхпроводящего материала:

1. Известно, что в пленках устойчивая сверхпроводимость наблюдается в полях параллельных поверхности пленки по величине в сотни раз превышающих критическое поле для массивного сверхпроводника того же материала. Например, у свинцовой пленки толщиной 20 \AA сверхпроводимость сохраняется при полях в 40 Тл. Известно, что теоретические величины критических токов для пленок сверхпроводника хорошо согласуются с их измеряемыми значениями. Причем, результаты теории Лондонов незначительно (менее чем вдвое) различаются от результатов более точных теорий. См., например, [5]. Каковы критические токи

в тонких пленках сверхпроводника при воздействии магнитных полей? Уравнение Лондонов для определения поля внутри тонкой пластины сверхпроводника в одномерном случае есть: $\lambda^2 d^2B/dx^2 = B$. Здесь λ есть глубина проникновения магнитного поля в массивном сверхпроводнике, B есть индукция магнитного поля. Если $B(a) = B(-a) = B_f$, то решение уравнения есть $B = B_f \operatorname{ch}(x/\lambda) / \operatorname{ch}(a/\lambda)$. Этот случай описывает распределение поля в тонкой пленке сверхпроводника с толщиной $2a$, помещенной в магнитное поле. Если краевые условия выглядят: $B(a) = B_f$, $B(0) = B_f / \operatorname{ch}(a/\lambda)$, то упомянутое решение отражает распределение поля в сверхпроводящей пленке с током с толщиной равной a , помещенной в магнитное поле. Заметим, что изменение величины магнитного поля обусловлено током в пленке: $\Delta B = 2B_f = \mu_0 I_s a = B_f - B_f / \operatorname{ch}(a/\lambda)$. Когда $\lambda \gg a$ максимальное (критическое) поле равно $B_f = 6^{1/2} B_c \lambda / a$ (это известное соотношение получено Ландау и Гинзбургом еще в 1950 году). Далее получим для величины плотности критического тока: $I_s = (6^{1/2}/2) B_c / (\mu_0 \lambda) \approx B_c / (\mu_0 \lambda)$. Здесь B_c – величина критической магнитной индукции в массивном сверхпроводнике. Для $\lambda = 5 \cdot 10^{-8}$ м, $a = 5 \cdot 10^{-10}$ м, $B_c = 0.1$ Тл получим $I_s \approx 2 \cdot 10^{12}$ А/м², $B_f = 24$ Тл. Используемые при расчете параметры приблизительно соответствуют таким материалам, как Nb, V, Pb, La, Ta, и величина произведения $I_s B$ для пленок Nb или V толщиной порядка 5 - 10 ангстрем приблизительно в 10^3 раз превосходит соответствующую величину для сплава Nb-Ti. Если бы пленки обладали достаточной механической прочностью, то мы имели бы уменьшение размеров ускорителей по крайней мере в 10^3 раз. Из пленок необходимо сделать механически прочное сооружение. То есть можно представить структуру, содержащую множество сверхпроводящих пленок между которыми выполнены слои из не сверхпроводящего материала. Если масса структуры превосходит суммарную массу сверхпроводящих пленок в N раз ($N < 10^3$), то размеры ускорителей можно уменьшить приблизительно в $(10^4 \text{ или } 10^3) / N$ раз по сравнению с ускорителями при ускорении частиц той же массы из Nb-Ti. Для бесконтактно ускоряемых макрочастиц слои и пленки формируются на боковой поверхности цилиндра. Например, цилиндр может быть выполнен из легкоплавкого материала, который заменяется после удаления частично или полностью смесью дейтерия и трития. Для справки: расчетный минимальный линейный размер dt-капсулы без учета сжатия составляет порядка 1-2 мм. Следует учитывать, что суммарная толщина сверхпроводящих пленок не должна превышать величину порядка $10\lambda^2/a$, поскольку, величина критической плотности тока в противном случае уменьшается. В самом деле, пусть протекание тока в пленке приводит к возникновению поля на ее поверхности по величине порядка $0.5 B_c a/\lambda$, что соответствует плотности тока в пленке несколько меньше критической. Если имеются n одинаковых параллельных пленок, по каждой из которых течет такой ток, то магнитное поле возрастает в n раз (на поверхности крайних пленок). Из условия равенства величины магнитного поля его критической величине $B_f = 0.5 n a/\lambda B_c = 6^{1/2} \lambda/a B_c$ получим максимальную суммарную толщину пленок $S = 2na = 96^{1/2} \lambda^2/a \approx 10\lambda^2/a$, при числе пленок $n = 24^{1/2} (\lambda/a)^2$. Для $\lambda = 5 \cdot 10^{-8}$ м, $a = 5 \cdot 10^{-10}$ м получим $S = 50$ микрон, $n = 50000$. Сравнительно большая расчетная величина S – неплохая гарантия возможности создания прочных тонкопленочных структур (нетрудно видеть, что S/a может достигать величин порядка 10^5). Минимальные размеры ускорителя при контактном ускорении получим из (2):

$$L_{\min} = \frac{1}{2} (\rho V^2) / (I_s B) = \frac{1}{2} (\rho V^2) / (6^{1/2} B_c^2 / a \mu_0) \quad (3).$$

Если $B_c = 0.1$ Тл, $V = 10^6$ м/с, $\rho = 10^4$ кг/м³, $a = 5 \cdot 10^{-10}$ м, то $L_{\min} \approx 100$ м. При этом минимальные размеры ускорителя без контактов в разы больше. Следует отметить, что структуры из сверхпроводящих и нормальных слоев работоспособны только при определенной ориентации их относительно магнитного поля (в качестве проводов применение этих материалов имеет серьезные ограничения, в отличие от создания ускоряемых макрочастиц)

2. Как известно, магнитное поле может уничтожить сверхпроводимость или другими словами разрушать куперовские пары электронов в сверхпроводниках, что является ограничением по созданию источников сильных магнитных полей. У ионных сверхпроводников нет куперовских пар и их аналогов - объектов для разрушения при всевозможных механизмах взаимодействия этих носителей заряда с другими частицами или квазичастицами в твердом теле. В качестве носителей заряда используются однозарядные ионы изотопа лития, являющиеся бозонами. Расчетная величина температуры Бозе-конденсации ионов изотопа лития из-за малости величины их эффективной массы может

превышать величину порядка 10^4 К [6,7]. Если, к примеру, у реально созданных ионных сверхпроводников величина температуры Бозе-конденсации ионов изотопа лития окажется всего лишь выше 10 градусов Кельвина, то концентрация сверхпроводящих ионов изотопа лития при температурах жидкого гелия будет на порядки превышать плотность куперовских пар в традиционных сверхпроводниках в тех же условиях. Поскольку куперовские пары образуются лишь небольшой частью электронов, которые имеют энергию вблизи энергии Ферми, тогда как в ионных сверхпроводниках при сравнительно небольшом превышении температуры Бозе конденсации над температурой среды в основном состоянии оказывается число бозонов, сопоставимое по порядку величины с их общим числом. Поэтому есть надежда, что проблему может решить создание ионных сверхпроводников, которые могут быть использованы в качестве части макрочастицы для ее бесконтактного ускорения, поскольку макрочастице в этом случае можно придать чрезвычайно большой магнитный момент. Ионные сверхпроводники можно применить также при изготовлении источников больших переменных магнитных полей, необходимых для бесконтактного ускорения макрочастиц. В [6] предложено использовать МВЕ технологию для создания ионных сверхпроводников. Ионные сверхпроводники могут быть выполнены предположительно в виде тонких пленок сжимаемых, более толстыми несверхпроводящими слоями. Некоторые дополнения к изложенному можно найти в [7,8]

Минимальная толщина пленок, видимо, не может превышать постоянную кристаллической решетки материала из которого она выполнена. Величины плотности (ρ) и постоянные кристаллической решетки материалов (a), пригодных для формирования макрочастиц и расчетные длины ускорителей приведены ниже в таблице.

ТАБЛИЦА Некоторые параметры материалов для ускоряемых макрочастиц

Материал	$a(\text{Å})$	ρ (кг/м ³)	$B_c(\text{Тл})$	$P_c(\text{ГПа})$	L_{\min} (м)
Pb	4.95	$11.34 \cdot 10^3$	0.08	$7 \cdot 10^{-2}$	212
Nb	3.3	$8.58 \cdot 10^3$	0.2	1.1	19
V	3.03	$5.96 \cdot 10^3$	0.142	0.6	24
In	3.25	$7.29 \cdot 10^3$	0.0293		720
Al	4.05	$2.7 \cdot 10^3$	0.0105		2600
DT-смесь (T=4.2 К)		$0.22 \cdot 10^3$		$5 \cdot 10^{-4}$	
Кристалл SiC		$3.21 \cdot 10^3$		21-37	
Кристалл Al ₂ O ₃		$3.960 \cdot 10^3$		28-42	

Здесь минимальная длина ускорителя L_{\min} следует из (3), P_c - предел прочности материала. Из за сравнительно большой величины B_c наиболее перспективными материалами для создания сверхпроводящих пленок являются ниобий или ванадий. Поскольку для сверхпроводящих рельс критическая плотность тока много меньше, чем в сверхпроводящей пленке, контакт между рельсами и макрочастицей следует выполнить на достаточно большой площади. Это обстоятельство в основном определяет геометрическую форму ускоряемой макрочастицы (точнее скользящего контакта, оптимальная форма сечения которого равнобедренная трапеция). Смотри рис.2.

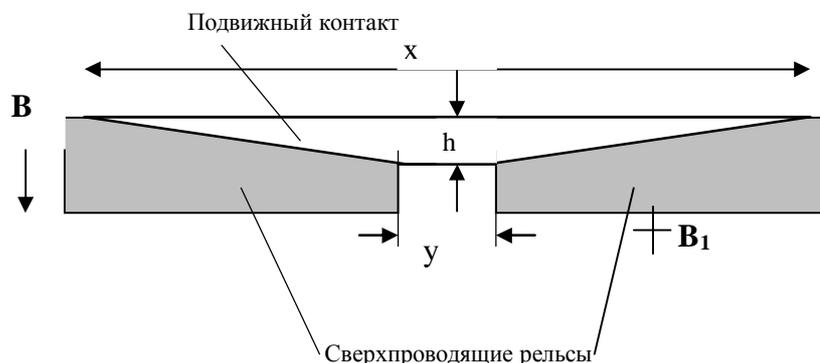


Рис. 2. Пример ускорителя, когда критическая плотность тока в подвижном контакте много больше критической плотности тока в рельсах.

Причем длина меньшей из сторон трапеции (y) равна расстоянию между рельсами. Расстояние между параллельными сторонами трапеции равно h . Кроме того $x \gg y$, $x \gg h$, где x - длина основания трапеции. Плотность тока в скользящем контакте - больше чем плотность тока в шинах приблизительно в $\frac{1}{2} x/h$ раз. Плотность тока приблизительно одинакова в любом вертикальном сечении подвижного контакта. Конструкция позволяет при минимальном весе подвижного контакта относительно контактов с другими геометрическими формами обеспечить сохранение сверхпроводимости в ускоряющей системе. Это, пожалуй, также наиболее легко изготавливаемая форма, позволяющая исключить съезжание подвижного контакта с рельс. Кроме того, необходимо при движении макрочастицы обеспечить сохранение площади контакта макрочастицы с рельсами. По этой причине контактный метод ускорения макрочастиц на практике будет осуществить непросто. Чтобы избежать разрушения dt -капсулы при ускорении, нужно сформировать ее внутри подложки [3]. Предел прочности dt -капсулы определен величиной давления в $5 \cdot 10^4$ ГПа. Предел прочности подавляющего числа твердотельных материалов на порядки больше. При контактном ускорении макрочастица очевидно содержит один или группу подвижных контактов, на поверхности которых закреплена подложка, причем внутри подложки размещена смесь дейтерия и трития. При бомбардировке dt капсулы ускоренным твердым телом вместо подложки и dt -смеси можно использовать твердое тело с массой превосходящей массу dt мишени в несколько раз (порядка 10-20 миллиграмм). При изготовлении макрочастиц для контактного ускорения для создания слоев и пленок применимы планарные технологии. Хотя нет ясности о возможности применения стандартных безвакуумных технологий к созданию необходимых структур включающих в себя пленки из свинца, ванадия, тантала, лантана или ниобия. Для создания бесконтактных макрочастиц см. рис.3.1- 3.4, пригодных для ускорения в ускорителях, имеющих небольшие размеры необходимо создать технологии формирования тонких пленок на цилиндрической поверхности. Скорее всего, речь идет о модернизации MBE и CVD технологий. Например, технология атомно слоевого осаждения (Atomic Layer Deposition (ALD) - частный случай CVD технологии) позволяет уже сегодня формировать монослойные слои на площадях в десятки квадратных метров на поверхностях любой геометрической формы [9]. Кроме того, необходимо автоматическим способом сформировать макрочастицу из составляющих, например, из легкой и прочной подложки, dt -капсулы, и структуры, состоящей из различных слоев. Желательно, чтобы масса подложки была как можно меньше и существенно не превышала массу dt -капсулы. Заметим, что для создания ионных сверхпроводников требуются гетероструктуры, также содержащие тонкие пленки специально подобранных составов. Технологически непросто изготовить ускоряемую макрочастицу в особенности для бесконтактного ускорения. Лимитирующий фактор – разрушающее давление, оказываемое dt смесью на подложку при ускорении макрочастицы. Произведем некоторые оценки. Если, например, макрочастица ускоряется в километровом ускорителе, то величина давления dt -капсулы на подложку приблизительно равна 0.5 ГПа. В самом деле, рассмотрим кубическую dt -капсулу, контактирующую с подложкой в 5 из 6 плоскостей, имеющую массу $m=2 \cdot 10^{-6}$ кг, линейный размер стороны $l=2$ мм (это характерные размер и масса для dt -капсулы). Действительно когда $m=2 \cdot 10^{-6}$ кг, $S=l^2=4$ мм², $L=10^3$ м, $V=10^6$ м/сек, $t=L/V=10^{-3}$ сек, $a=V/t$, $P=ma/S$, откуда $P=0.5 \cdot 10^9$ Па. Это давление больше предела прочности многих твердотельных материалов. Поскольку давление, оказываемое на капсулу много больше ее предела прочности ($P=mV^2/(L^2)$), термоядерное топливо ведет себя подобно жидкости и на противоположные грани подложки действует сила величиной $\sim mV^2/L$, растягивая подложку. Пусть l_s есть толщина подложки, $l=2$ мм, $m=2$ миллиграмма. Следовательно, минимальная толщина подложки (l_s) определена приблизительно равенством $mV^2/L=P_s l_s$. Здесь P_s есть предел прочности материала, из которого выполнена подложка. Минимальная масса подложки (m_s) определяется приближенным равенством $m_s=5 \rho l^2 l_s$. Здесь ρ есть плотность подложки. Нетрудно посчитать, что для самых прочных материалов ($P_s \sim 25-30 \cdot 10^9$ Па, для кристаллов Al_2O_3 или SiC) минимальная толщина подложки равна приблизительно 40 микрон, а минимальная масса приблизительно равна 2.5-3 миллиграмма при длине ускорителя 1000 м ($L=1000$ м). Уменьшение длины ускорителя приводит к необходимости увеличения массы подложки и следовательно к ненужному увеличению энергетических затрат, необходимых для ускорения более тяжелой макрочастицы. Для увеличения КПД можно использовать возможность увеличения массы dt -смеси, например, вследствие увеличения диаметра цилиндрической dt -

капсулы. Если этого не делать, то для сравнительно коротких ускорителей может оказаться более приемлемым вариант бомбардировки dt- капсулы ускоренным твердым телом.

Вторым лимитирующим фактором является длительное время формирования большого числа сверхпроводящих пленок и несверхпроводящих слоев ($n > 10^4$). Очевидно нужно создать простые и экономичные технологии, способные производить макрочастицы с необходимой скоростью (более 10 макрочастиц/сек). Более простых технологических решений термоядерной проблемы, может быть, следует ожидать вследствие создания ионных сверхпроводников, поскольку применимы планарные технологии, позволяющие сравнительно просто одновременно изготавливать большое число макрочастиц. См. рис.3.5-3.6.

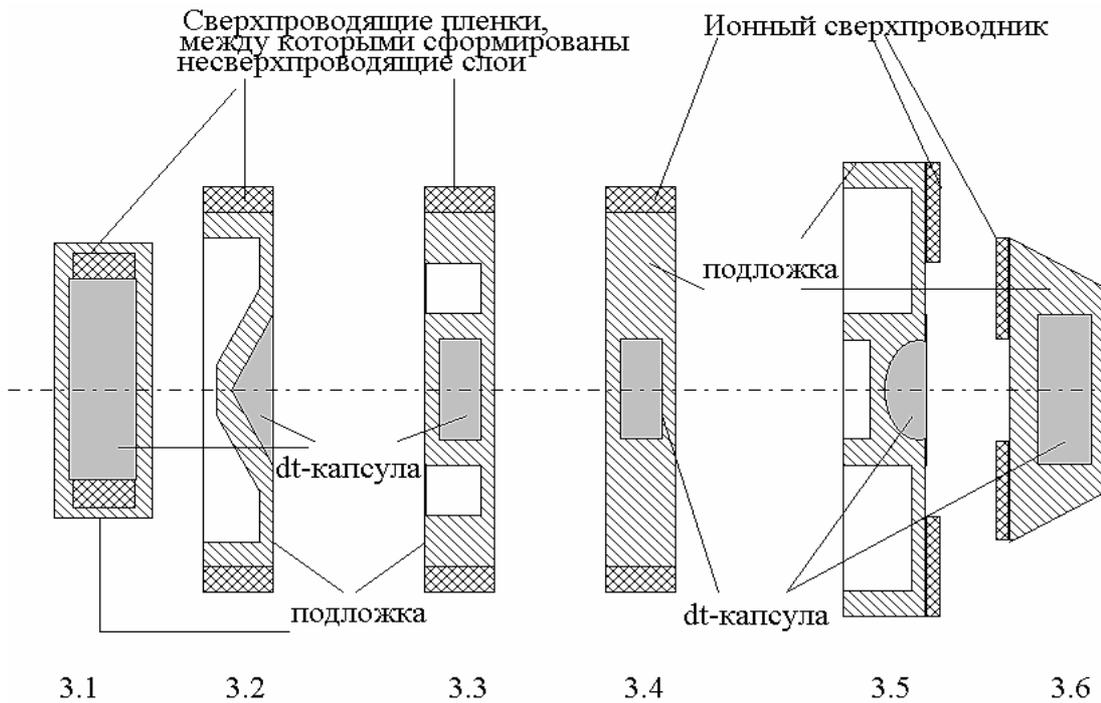


Рис.3. Некоторые конструкции бесконтактных с цилиндрической симметрией макрочастиц.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно ли сегодня изготовить необходимые структуры для макрочастиц? Скорее всего, для формирования пленок предпочтительно использовать CVD технологию. В качестве сверхпроводящих пленок предпочтительно использовать Nb, V, La, Ta, или Pb. К сожалению, мне неизвестно о формировании очень тонких пленок из этих материалов промышленными (безвакуумными) методами, но это не значит, что это невозможно сделать. Например, известны примеры использования CVD технологий для формирования пленок сплава $NbSn_3$, а пленки чистого ниобия формировать даже проще. Вероятно, нужно подобрать соответствующие материалы, подходящие для равномерного осаждения на них ниобия и наоборот. У пленок алюминия и индия критическая температура существенно превышает соответствующие критические температуры этих массивных материалов и температуру жидкого гелия (4.2 K)[10]. Поэтому алюминий и индий могут быть использованы в качестве тонких сверхпроводящих пленок. Технология (ALD) изготовления таких пленок и изолирующих слоев известна [9]. Наиболее простое техническое решение заключается в обстреле ускоренным твердым телом термоядерной мишени, помещенной в реактор. В этом случае нет необходимости в создании немассивной и прочной оболочки для термоядерного топлива (подложки). Хотя осуществление этой версии требует дополнительных мощностей. При изготовлении макрочастицы с термоядерной смесью проблема заключается в необходимости делать прочной максимально облегченную подложку (контейнер для термоядерной смеси). Чем большую

длину имеет ускоритель, тем меньше может быть масса подложки. Поэтому использование ускорителя, имеющего длину несколько километров, может оказаться более приемлемым, чем использование сравнительно небольших ускорителей. Таким образом, для очевидного прогресса в создании термоядерной электростанции нужно совершенствовать технологии для создания структур с чередованием очень тонких сверхпроводящих пленок с несверхпроводящими слоями и создавать дешевые и технологичные сверхпрочные изолирующие материалы, необходимые для подложек. Это задачи для нанотехнологов. Именно их надо решать. В обозначенных направлениях, возможно, сегодня мог быть больший прогресс, если бы нанотехнологии развивались не сами по себе, что по не малой части и происходит, а рассматривались как одно из средств для решения прикладных задач.

Теперь потребность в термоядерной энергии для нужд практики не стала меньше, чем пол века назад. Нынешние физики, правда, заметно отличаются от представителей великого поколения физиков 40-50 годов, стоявших у истоков термоядерной проблемы. И вопрос уже состоит в том, что мы хотим больше - решить проблему, или долго решать ее, осваивая не без пользы для себя немалые средства? Иногда правда бывает, что для достижения результата полезно взглянуть на старые проблемы свежим взглядом. И всегда неплохо было бы хорошенько подумать над проблемой в целом до осуществления практических шагов. Чтобы иметь возможность сравнить предлагаемый метод осуществления УТС с другими методами я приведу один пример. Опираясь на 20 летний опыт в работах по лазерному термоядерному синтезу (проекты Шива и Нова), в США в середине 90-х годов приступили к строительству лазеров на неодиме для проекта NIF (Национальная установка для зажигания), рассчитанных на достижение термоядерной вспышки [2]. Точнее, согласно численным расчетам ожидалось, что в экспериментах (в режиме однократных импульсов) будут достигнуты коэффициенты усиления, по отношению к энергии лазера, равные 5-7 при полном кпд в доли процента. Выходная энергия лазерного импульса будет составлять ~ 1,8 МДж и будет достигнута за счет последовательного усиления импульса задающего генератора (~ 0, 1 Дж) в 192 параллельных каналах. Стоимость проекта вначале оценивалась приблизительно в 4 миллиарда \$ США, запуск при полной энергии ожидался в 2007-2008 гг, произошел в 2010. Почти через 40 лет от начала работ была произведена термоядерная вспышка, но до практического получения энергии еще очень далеко. Этот пример иллюстрирует сложность пути пройденного и предстоящего к созданию термоядерной электростанции. Читатель сам, по мнению автора, способен оценить целесообразность движения к решению термоядерной проблемы путем, изложенным в настоящей работе или продолжения движения по старой дороге².

Автор выражает благодарности Кореневу А.Г., Старцеву А.И., Цюю Г.С., без помощи которых появление данной работы было бы затруднительно, также Макухе В.К, Прилуцкой М.М., и рано ушедшему от нас Чикичеву С.И. (р.1951- ум.2010).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики / Под ред. Б.Ю. Шаркова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.стр. 1-264.
2. Hogan W.J., Moses E.L, Warner B.E. et al. The National Ignition Facility // Nuclear Fusion. 2001. V. 41, № 5. p. 567.
3. Монзон В.М., Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза, УФН,1981,т.134, №4,стр. 611-637

² Электростанция мощностью в 1 ГВт производит в год электроэнергию и тепло приблизительно на миллиард \$. Определим срок окупаемости электростанции в 10 лет. В этом случае, не беря во внимание расходы на эксплуатацию, получим, что стоимость электростанции не должна превышать величину ~ 10 миллиардов \$. Планируемая стоимость реактора на основе инерционного термоядерного синтеза мощностью 1 ГВт около 1 миллиарда \$. Это много меньше прогнозируемой стоимости лазерного или ионного драйвера [1] для этого реактора. В нашем же случае стоимость электростанции состоит в основном из стоимости реактора и стоимости ускорителя макрочастиц (ускоритель длиной 1 километр может стоить приблизительно до 300 миллионов \$). То есть в перспективе речь может идти о термоядерной станции стоимостью 1-3 миллиарда \$.

4. Черноплеков Н.А. Состояние работ по сильноточной прикладной сверхпроводимости. УФН., 2002, т.172, №6 стр.716-722
5. Тинкхам М. Введение в сверхпроводимость. М: Атомиздат, 1980. стр.130-134.
6. Ioffe V. M. Does high-temperature ionic superconductivity exist? International Journal of Modern Physics, B, 2009, V. 23, No. 4, pp. 597-613.
7. www.v-ioffe.ru
8. Ioffe V. M. An alternative approach to solving thermonuclear synthesis problem., International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument and Engineering (APEIE-2010), V2, pp. 91-94, Novosibirsk.
9. Путконен М., Тузовский В., Новые применения атомно слоевого осаждения (АСО), Наноиндустрия, 5, 2010, стр 18-21
10. Физические константы, справочник, М: Энергоатомиздат, 1991, стр 449 /под ред. Григорьева И.С. и Мейлихова Е.З.

Ядерный синтез можно осуществить иначе

В. М. Иоффе

E-mail: alkornsk@mail.ru

Аннотация – Поскольку при обстреле мишени ускоренными атомными ядрами вероятность ядерных реакций мала, следует применить другой способ реализации ядерных реакций, модернизируя упомянутый обстрел. В частности двухатомные ионы можно применить для синтеза ядер и производства ядерной энергии. Двухатомный ион ускоряют в электрическом поле и создают условия для различного для каждого из ядер упомянутого иона торможения в среде. Вследствие чего два ядра предварительно возбужденного или предварительно разбитого на ион и атом двухатомного иона сталкиваются между собой внутри или за границами специальной мишени.

Ключевые слова – Ядерный синтез, молекулярный ион, двухатомный ион, ядерная реакция.

I. ВВЕДЕНИЕ

С ДАВНИХ ПОР ТЕРМОЯДЕРНАЯ проблема (создание рентабельной термоядерной электростанции) решается, но все еще не ясно когда будет решена. Сил, ресурсов и времени на решение этой задачи затрачено и тратится, пожалуй, больше чем на решение любой другой технической проблемы, причем для практического воплощения выбирают много лет известные и не очень экономичные варианты. Что неплохо для спокойной и уверенной жизни тех сотрудников, которым наиболее подходят по возможности знакомые и максимально растянутые по срокам и ценам работы и исследования. Но может быть все же, энергию синтеза ядер можно получить без нагрева плазмы до гигантских температур? Давайте рассмотрим и этот вариант.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При обычном обстреле мишени ускоренными атомными ядрами можно рассчитывать только на случайное и крайне маловероятное столкновение упомянутых ядер с ядрами мишени. Для увеличения вероятности синтеза ядер или повышения вероятности реализации других ядерных реакций нужно видоизменить обстрел.

III. ТЕОРИЯ

Ядерный синтез связан с необходимостью преодоления сил электрического отталкивания между ядрами. Для легких ядер для этого необходима энергия менее или порядка ед. МэВ. При ядерном синтезе двух ядер выделяется энергия от нескольких единиц до десятков МэВ. Однако, при непосредственной попытке попасть одним ядром в другое (например, при обстреле ядрами твердотельной мишени) можно убедиться, что вероятность ядерной реакции ничтожно мала. Энергия ускоренного ядра тратится в основном на возбуждение и ионизацию атомов. Расчеты показывают, что из за малых ядерных сечений рассеяния о получении энергии в этом случае не может быть и речи. Поскольку при обычном обстреле можно рассчитывать только на случайное столкновение ядер, для увеличения вероятности синтеза ядер или повышения вероятности реализации других ядерных реакций следует видоизменить обстрел. Проиллюстрируем это наглядным примером. Хорошо известно, что при выстреле попасть в мишень, имеющую размер пули почти невозможно. Если же зарядить старинное ружье или пушку двумя пулями (ядрами, см. Рис. 1), и выстрелить в стену из глины, то пули обязательно столкнутся, поскольку первая пуля тормозится, пробивая дырку в глине, а вторая пуля движется по расширенному первой пулей пути внутри глиняной мишени почти без сопротивления.

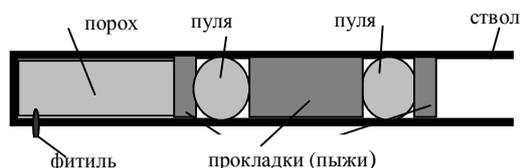


Рис. 1. При выстреле из ружья, заряженного двумя пулями, в мишень одна пуля непременно попадет в другую, даже при нецельном выстреле.

Рассмотрим двухатомную молекулу, ядра которой мы желаем столкнуть внутри мишени или за ее пределами, по аналогии модернизируя способ обстрела. Если ускорить молекулу в направлении вдоль ее оси (прямой линии, соединяющей центры ядер), и направить молекулу на специально подготовленную мишень, то при некоторых дополнительных условиях вероятность столкновения ядер молекулы может оказаться достаточной для получения энергии. Напомним, что при помещении молекулы в электрическое или магнитное поле электрический или магнитный момент молекулы (наведенный или собственный) стремится ориентировать ее ось вдоль поля. Если температура молекул (или, смотри далее, двухатомных ионов) ниже температуры замораживания вращательных степеней свободы, то ориентация в принципе может быть идеальной даже для газа. Молекулу можно ускорить до необходимых энергий в пространственно неоднородном поле в направлении вдоль градиента поля. Правда, элементарные оценки показывают, что на практике это неосуществимо из-за неприемлемо больших для изготовления размеров ускорителей. Двухатомные ионы, то есть ионы, содержащие два атомных ядра (двухатомные ионы не всегда эквивалентны молекулярным ионам, поскольку могут и не образовать двухатомную молекулу) можно ускорять в электрическом поле. Из-за смещения электронной оболочки у двухатомного иона в электрическом поле также возникает вращающий момент, разворачивающий ось иона вдоль поля. То есть поле ориентирует и ускоряет ион, и поскольку речь идет об энергиях не более ед. МэВ размеры ускорителей сравнительно небольшие.

Замечание 1: хотя понятие траектории имеет ограниченный характер, оно может быть с уверенностью использовано при рассмотрении двух взаимодействующих частиц с зарядами e_1 и e_2 при относительной скорости v при выполнении следующего неравенства [1]: $S=2|e_1e_2/(v\hbar)| \gg 1$. Здесь \hbar постоянная Планка, деленная на 2π . При относительных скоростях менее 10^9 см/с даже для легких ядер $S > 1$.

Замечание 2: Если бы у нас имелось абсолютно твердое тело или мы смогли бы изготовить какой-то его аналог, то поставленная задача получения энергии синтеза ядер очевидно решалась бы вследствие использования этого сверхпрочного материала в качестве мишени для бомбардировки ускоренным двухатомным ионом. Пока, правда, не видно, как это осуществить на практике и нужно поискать другие возможности.

Еще со времен Бора и Резерфорда был хорошо известен факт, что треки α -частиц за исключением самых концов - прямые линии. Это соответствует тому, что почти вся потеря энергии заряженных частиц обусловлена электронными неупругими столкновениями, вероятность которых на порядки ($\sim 10^8$) превышает вероятность упругого рассеяния, которое искривляет траектории [1]. При неупругом рассеянии положительно заряженная частица, двигаясь в среде, ионизирует часть ее атомов. Электроны, притягиваясь к частице, скапливаются преимущественно сзади частицы, тормозя ее своим полем [1,2]. Если в среде движутся две положительно заряженные частицы по одной прямой в одном направлении на расстоянии друг от друга существенно превышающем размер атома, то возникающая повышенная концентрация электронов между частицами, тормозит первую частицу, ускоряя вторую. То есть даже для одинаковых частиц может реализоваться ситуация эквивалентная, ранее рассмотренному выстрелу из ружья двумя пулями. Вырисовывается следующая перспектива по синтезу ядер.

1. Следует отделить электронную оболочку от ядер ускоренного двухатомного иона, раздвинуть ядра на необходимое расстояние (например, вследствие кулоновского отталкивания ядер) для последующего осуществления различного для каждого из ядер торможения в среде. Расстояние между ядрами и параметры среды должны быть таковы, что при сближении ядер на дистанцию порядка размера атома в среде или за ее пределами разность в скоростях ядер соответствовала бы величине кулоновского барьера между ядрами. И все это нужно сделать без искривления траекторий ядер, или чтобы искривления были одинаковыми для обоих ядер.

2. Либо поскольку заряженная частица тормозится в мишени значительно сильнее атома, можно, разбив ускоренный двухатомный ион на атом и ядро без изменения направления движения ядер, и придав дополнительное ускорение ядру, раздвинуть ядра на необходимое для дальнейшего столкновения в мишени или за ее пределами расстояние.

Либо двухатомный ион следует преобразовать в другой ион и атом без изменения направления движения ядер и придав дополнительное ускорение новому иону, раздвинуть ядра иона и атома на необходимое для дальнейшего столкновения в мишени или за ее пределами расстояние.

Решение задач движения заряженных частиц в среде не может быть точным и требует серьезных упрощений, так как невозможно решить квантово-механическую задачу как минимум нескольких десятков тысяч тел, участвующих в рассеянии. Если $V \gg V_a V_e$, (здесь V - скорость ускоренных ядер, V_e - орбитальная скорость электронов среды, V_a - тепловая скорость атомов среды), то для энергии заряженной частицы E при неупругом рассеянии справедлива формула Бора, уточненная Бете, которая при $V \ll C$ выглядит:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n Z^2 e^4}{mV^2} \ln \frac{4Em}{MI} \quad (1)$$

Здесь E – энергия, M -масса, Ze – заряд заряженной частицы, e - элементарный заряд, m - масса электрона, n - плотность электронов среды, I - средний ионизационный потенциал атомов среды ($I \sim 15$ эВ для водорода, $I \sim 810$ эВ для урана). Пробеги частиц пропорционален M/Z^2 . Формула может быть получена вследствие применения метода Борна, смотри например [3], так и полуклассическим методом [4]. Решая (1) несложно рассчитать скорости частиц их пробеги, тормозные способности сред, толщину мишеней, при прохождении которых разность в скоростях ядер с одинаковой начальной скоростью и с различными величинами M/Z^2 соответствовала бы величине кулоновского барьера между ядрами. Правда практической пользы в этом немного, поскольку в интересующем нас диапазоне энергий частиц (~ 1 МэВ и меньше) формула Бора дает результаты лишь по порядку величины соответствующие экспериментальным данным, табулированным в различных справочниках, смотри, например [5]. Заметим, что (1) следует из формулы (2), которая выводится при допущении о симметричном относительно траектории заряженной частицы распределении атомов среды

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2pne^4Z^2}{V^2m} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \quad (2)$$

Здесь b_{\max} и b_{\min} – максимальный и минимальный прицельные параметры.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Двухатомный ион в принципе можно разбить на составляющие его части, если поместить в сильное электрическое поле, направление которого совпадает с траекторией движения двухатомного иона. Для уменьшения величины электрического поля ион следует перевести в возбужденное состояние. Воздействие поля может обеспечить нужное расстояние между ионом и атомом (или ядром и атомом) – бывшими частями двухатомного иона. Рис.2 иллюстрирует схематично часть устройства для выполнения вышеописанных альтернатив.

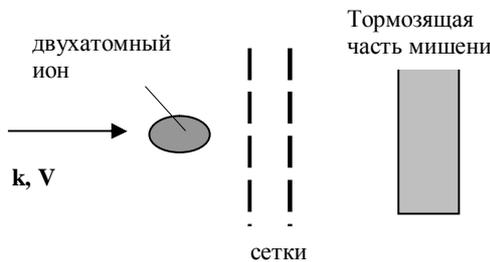


Рис 2. двухатомный ион возбуждается фотоном, импульс, которого \mathbf{k} и скорость иона \mathbf{V} коллинеарные векторы.

Отделить электронную оболочку прочно связанную с двухатомным ионом, возможно, только уменьшив энергию связи, переведя ион в возбужденное состояние. Попав в область с большой величиной поля (между сетками, рис. 2), возбужденный ион разрывается на составляющие. В пространстве между одной из сеток и тормозящей частью мишени ядра или положительно заряженный ион и ядро разлетаются на расстояние порядка длины пробега этих частиц в среде мишени. Частицы, испытывая различное торможение в мишени, сталкиваются между собой за пределами мишени. Вместо сеток можно применить тонкую пленку (желательно из материала с большой величиной диэлектрической проницаемости- ϵ). Энергия связи возбужденного иона с электроном уменьшается в пленке приблизительно в ϵ раз. Если энергия связи ядра(иона) и атома в двухатомном ионе мала, то применив подобное устройство можно обойтись без возбуждения двухатомного иона.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Потерю энергии каждой из частиц в среде можно оценить по справочникам или на худой конец измерить. Из за сложности задачи без ответа остается основной вопрос - насколько отличаются траектории частиц некогда составляющих двухатомный ион. Считается, что поперечный разброс связан с ядерным рассеянием, которым в нашем случае можно пренебречь и с статистическим разбросом параметров среды. Однако при движении частиц по одной прямой можно предположить, что обе частицы взаимодействуют с одними и теми же атомами, вследствие чего и вторая причина для разброса минимизирована. Но прямолинейное движение заряженной частицы возможно лишь при симметричном размещении атомов среды или свободных носителей заряда относительно траектории движения частицы. На практике условие симметрии не реализуемо для твердотельной мишени, поскольку даже когда мишень - идеальный кристалл любые технические устройства не могут ни с какой точностью

обеспечить движение заряженных частиц внутри мишени на одинаковом расстоянии от кристаллографических осей. И это обстоятельство наталкивает на мысль об использовании электронного газа вакуумных диодов с осевой симметрией (термических или фотодиодов) в качестве одной из искусственных мишеней для торможения заряженных частиц, когда частицы двигаются по оси. Для читателей, знакомых с выводом формулы (2) очевидно, что если n -концентрация электронов, в вакуумной камере диода, то формула (2), работает с любыми наперед заданными прицельными параметрами, определяемыми геометрией диода, если рассматривать электронный газ, как систему невзаимодействующих частиц.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Время от времени полезно возвращаться к старым темам, если взглянуть на них по новому.

Автор выражает благодарность Кореневу А.Г., Старцеву А.И., Цюю Г.С. и Макухе В.К. за поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бор Н., Прохождение атомных частиц через вещество, М, ИЛ, 1950, 1–150 с.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Электродинамика сплошных сред, Москва, Наука, 1982, 538-553 с.
- [3] Бете Г., Квантовая механика, Москва, Мир, 1965, 211-222с.
- [4] Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С., Основы экспериментальных методов ядерной физики, М., Атомиздат, 1977, 31-35с.
- [5] Немец О.Ф., Гофман Ю.В., Справочник по ядерной физике, Киев, Наукова думка, 1975, 79-217 с.