Национальный исследовательский

ядерный университет «МИФИ»



XIV Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ» ЗНЧ-2019

## УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ДИОДАХ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ И ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ С БЫСТРОНАРАСТАЮЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.Е. ШИКАНОВ, А.А. ИСАЕВ, А.А. ПЛЕХАНОВ

## THE ACCELERATION OF IONS OF A LASER PLASMA IN THE DIODE WITH MAGNETIC INSULATION AND INDUCTION ACCELERATORS WITH A HIGH-SPEED MAGNETIC FIELD

E.D. Vovchenko, K.I. Kozlovskii, A.E. Shikanov, A.A. Isaev, A.A. Plekhanov

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ по соглашению № 14.575.21.0169 (RFMEFI57517X0169).

18 - 22 марта 2019 г.

Импульсные генераторы нейтронов (ИГН) на базе малогабаритных импульсных диодов



#### Физические схемы ИГН

Нейтронные ускорительные трубки с вакуумно-искровым источником дейтронов

Ускорение в IEC-диодах с инерциальным электростатическим удержанием осциллирующих ионов

Прямое ускорение в диодах с лазерно-плазменным источником дейтронов и магнитной изоляцией электронов Применение нейтронно-физических методов в науке и технике

 –разведка геологических объектов и контроль за их разработкой;

-мониторинг трубопроводного транспорта продуктивных углеводородов;

-контроль объектов для обнаружения скрытых опасных веществ и делящихся материалов;

 -разработка технологий противодейсствия терроризму;

-создание новых технологий медицинской диагностики

# Коаксиальный вакуумный диод с лазерно-плазменным анодом





1 – Плазмообразующая мишень (TiD)

- 2 Плазменный анод
- 3 Лазерное излучение
- 4 Цилиндрический катод
- 5 Нейтроннообразующая мишень
- 6 Система магнитной изоляции

– роль внутреннего анода принимает на себя поток лазерной плазмы, распространяющийся в продольном направлении со скоростью  $V_{\parallel} \sim 10^5$  м/с.

– скорость  $V_{\parallel}$  слабо зависит от q и примерно в два раза превышает скорость  $V_{\perp}$ .

– фронт разлетающихся дейтронов существенно опережает фронт сопутствующих ионов металла.

– имеет место эффективное извлечение и ускорение дейтронов в радиальном направлении при наличии ускоряющего напряжения.

## Средний нейтронный поток Q (расчет)





Низкая частота f при большой энергия лазера *W*: 0,25 Дж (1), 0,5 Дж (2), 1,0 Дж (3), 1,5 Дж (4)

U0,KB

 $N_d(W) \approx 2 \cdot 10^{15} s_d W$ 

Для диапазона  $W = (0, 1 \div 1, 5)$  Дж и коэффициенте стехиометрии  $s_d \approx 1 \div 2$ 



Для диапазона  $W = (4 \div 40)$  мДж и коэффициенте стехиометрии  $s_d \approx 1.4$ 



Как средство подавление электронного тока, который возникает в результате ионноэлектронной эмиссии и приводит к быстрому пробою и снижению напряжения



Осциллограммы импульсов тока и напряжения на диодном зазоре



Радиальное извлечение дейтронов из лазерной плазмы

 $N_d$  растет с увеличением энергии W

*N*<sub>d</sub> падает с увеличением индукции *В* 

Критическое значение индукции магнитного поля

 $B_{\kappa p} \approx 0,5$  Тл

$$B_c > \frac{2R_A}{R_K^2 - R_A^2} \sqrt{\frac{m}{e} U\left(2 + \frac{eU}{mc^2}\right)}$$

*R*<sub>A</sub> радиус плазменного анода
 *R*<sub>K</sub> радиус катода
 *U* ускоряющее напряжение

Диоды с магнитной изоляцией электронного тока постоянным магнитом



#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД



- 1- вакуумная камера;
- 2 лазерно-плазменный анод;
- 3 катод из NdFeB магнита;
- 4 импульсный лазер;
- 5 оптическое окно;
- 6 ГИН Аркадьева-Маркса;
- 7 высоковольтный изолятор;
- 8 детектор нейтронов;
- 9 плазмообразующая TiD мишень;
- 10 нейтронообразующая мишень



- 1 вакуумная камера взаимодействия;
- 2 высоковольтный ввод;
- 3 генератор Аркадьева-Маркса

Диоды с магнитной изоляцией электронного тока постоянным магнитом





#### ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- 1 напряжение;
- 2 ток диода;
- 3 лазерный импульс

Ta	Table 1: Summary of Modes			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	
Laser initiation	-	+	+	
Magnetic field	+	+	-	
Voltage	0,9 U	0,8 U	0,5 <i>U</i>	
Discharge current	-	150 A	600 A	



Нейтронный выход в диоде с магнитной изоляцией полем постоянного магнита



Нейтронный выход Q<sub>dd</sub> для реакции D(d, n)<sup>3</sup>Не (эксперимент)

Нейтронный выход Q<sub>dt</sub> для реакции T(d, n)<sup>4</sup>He (расчет)



Синхронизация магнитного поля с ускоряющим напряжением





Генератор Маркса со спиральной геометрией каскадов и лазерным управлением

#### ЛАЗЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Синхронизация трех процессов: – генерация напряжения; – разлет лазерной плазмы; – генерация магнитного поля. Задержки относительно лазерного импульса –  $\tau_{yck} = 200$  нс; –  $\tau_{плаз} = 250-300$  нс; –  $\tau_{маг} = 400$  нс;

$$\tau_{yc\kappa} \leq \tau_{mag} \leq \tau_{mag}$$

напряжение до 400 кВ;
магнитное поле 0,6 Тл;
энергия лазера 0,8 Дж



Запуск одним разрядником с лазерным управлением

1 – анод; 2 – коническая катушка; 3 – катод; 4 – лазер; 5 – генератор Маркса Диоды с импульсной магнитной изоляцией электронного тока



Схема генератора с импульсной магнитной изоляцией



Рис. 1. Схема эксперимента по формированию дейтронного потока: 1 — ГИН (2–30 каскады), 2 — блок зарядки ГИН, 3 — разрядник-обостритель, 4 — пояса Роговского, 5 изолятор, 6 — вакуумная камера, 7 — плазмообразуюшая мишень, 8 — спиральная линия, 9 — ионный коллектор (катод), 10 — оптическое окно, 11 — фокусирующие линзы, 12 — сканирующее устройство, 13 — осциллограф, 14 частично прозрачные зеркала, 15 — ЛУР, 16 — ФЭК, 17 лазер.



Результаты расчета — Q(W) neutrons/pulse

Ядерная	W, mJ			
реакция	80	200	380	750
$T(d, n)^4$ He $D(d, n)^3$ He	$\begin{array}{c}2\cdot10^{10}\\ 1.5\cdot10^8\end{array}$	$\begin{array}{c} 4\cdot10^{10}\\ 3\cdot10^8\end{array}$	$\begin{array}{c} 6\cdot 10^{10} \\ 4\cdot 10^8 \end{array}$	$\frac{8 \cdot 10^{10}}{6 \cdot 10^8}$



«... повышение эффективности ускорения, в том число увеличение энергии, получаемой пучком частиц на единице длины ускорителя (линейного или циклического), является принципиальной задачей, от решения которой зависит будущее ряда научных направлений. Одну из главных надежд в этом отношении можно возлагать на коллективные методы ускорения. Удержание и ускорение частиц в них должно осуществляться электромагнитными полями, создаваемыми совместным (коллективным) действием множества заряженных частиц. В отдельных вариантах в создании и усилении полей участвуют и сами ускоряемые частицы.» (из доклада в президиуме АН СССР, 1972)

Коллективное ускорение в системах с виртуальным катодом



## ОБРАЩЕННЫЙ ДИОД + ЛП



1 – ГИН Маркса; 2 – линия Блюмляйна; 3 – катод; 4 - анод; 5 – лазерная плазма; 6 – трубка дрейфа; 7 – лазер

Шиканов А.Е., Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Шатохин В.Л. Ускорение дейтронов в прямых импульсных электронных потоках для генерации нейтронов / Письма в ЭЧАЯ, 2016. Т13, № 7(205), с. 1571 – 1575. Схема ускорения ионов лазерной плазмы быстронарастающим магнитным полем



Диэлектрическая лазерная мишень (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub>



Nd-лазер:

 $\tau \approx 10$  HC;

λ = 1,06 мкм;

*W*лаз ≤ 0,85 Дж ;

 $q = 5 \cdot 10^{11} \,\mathrm{BT \cdot cm^{-2}}$ 

<u>Магнитное поле</u>: B = 0,6 Тл;  $dB/dt = 2 \cdot 10^7$  Тл/с;

<u>Коническая спираль</u>: длина 3 см, угол 20<sup>0</sup> - 30<sup>0</sup> индуктивность 0,5 мкГн



1. К.И. Козловский, А.Е. Шиканов и др. Модель ускорения лазерной плазмы нестационарными магнитными полями. – Научная сессия МИФИ 2 – 2003, т. 4, М. 2003, Сборник научных трудов, с.65-66.

2. A. Isaev, K. Kozlovskiy, A. Shikanov and E. Vovchenko /Collective acceleration of laser plasma in a nonstationary and nonuniform magnetic field. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 941 (2017) 012016

## Эксперимент по ускорению дейтронов с ГИН Маркса





ГИН: *U* = 300 кВ; *I* =1 кА; *W*гин =35 Дж



сигнал с коллектора без плазмы



25 нс/дел

сигнал с коллектора с плазмой и БМП

Скорость дейтронов: ~10<sup>8</sup> см/с



сигнал с коллектора





250/дел

Эксперимент с импульсным зарядом малоиндуктивной батареи



Диэлектрическая лазерная мишень (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub>



Параметры катушки:

- $d_{\min} = 1,5$  см и  $d_{\max} = 3,5$  см,
- длина 5 см; угол ~10<sup>0</sup>

число витков N = 6,

индуктивность L = 0,65 мкГн.

ГИТ с импульсным зарядом батареи конденсаторов и воздушным обострителем

емкость *С*н = 4.4 нФ напряжение *U* ~ 100 кВ ток в катушке *I* ≤ 10 кА



Емкость *C*<sub>н</sub> имеет 12 секций. Каждая секция — 6 конденсаторов 2,2 нФ, соединенных последовательно.

Эксперимент с импульсным зарядом малоиндуктивной батареи



Диэлектрическая лазерная мишень (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub>



### V~ (0,5−1)·10<sup>8</sup> см/с.

#### Сигнал с коллектора без БМП



500 нс/дел

#### Сигнал с коллектора при ускорении БМП



### 250 нс/дел

## Физическая модель ускорения БМП

Быстронарастающее магнитное поле  $\vec{B}$  индуцирует в сгустке лазерной плазмы вихревой ток  $\vec{j}$ . Азимутальная составляющая этого тока  $j_{\varphi}$  взаимодействует с радиальной составляющей магнитного поля  $B_r$  и создает электромагнитную силу Ампера-Лоренца  $F_z \sim [\vec{j}, \vec{B}]_z = j_{\varphi} \cdot B_r$ , ускоряющую плазму в аксиальном направлении.



- 1 плазмообразующая мишень;
- 2 кольцевой контур с током;
- 3 емкостной накопитель энергии;
- 4 разрядник

$$B_{r,z}(r,z,t) = B_{0r,z}(r,z) \exp\left[-\left(\frac{R}{2L}\right)t\right] \sin\left[(LC)^{-\frac{1}{2}t}\right],$$

Азимутальное вихревое электрическое поле

$$E_{\varphi}(r,z,t) \approx -\left(\frac{r}{2}\right) \frac{d}{dt} [B_z(r,z,t)]$$

Сила  $F_z(r, z, t) = \sigma E_{\varphi}(r, z, t) B_r(r, z, t)$ 

Поле ускорения 
$$f(r,z) = \frac{\left[\sigma E_{\varphi}(r,z,t)B_{r}(r,z,t)\right]}{Mn}$$

## Математическая модель



Поле

Компоненты вектора магнитной индукции

$$B_{0r}(r,z) = \frac{\mu_0}{2\pi r} \left[ E(k) \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} - K(k) \right] \frac{z}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}}$$
$$B_{0z}(r,z) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ E(k) \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} + K(k) \right] \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}}$$

 $\mu_0$  –магнитная постоянная, a – радиус кольцевого витка с током, K(k) и E(k) – полные эллиптические интегралы с аргументом

$$k(r,z) = \sqrt{\frac{4ar}{(a+r)^2 + z^2}}$$

Поле спирали  $\rightarrow$  суперпозиции полей, создаваемых системой из N колец с током I(t)

$$z_i(N) = H(i-1)/(N-1)$$
 (*i* = 1—N номер кольца)  
 $a_i(N) = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min})(i-1)/(N-1).$ 

$$R_{\min} = 0,5$$
 см;  $R_{\max} = 3$  см;  $L = 3$  см





Темп набора энергии дейтрона во времени, усредненной по всему плазменному сгустку

## Эксперимент с ГИТ





Экспериментальный стенд коллективного ускорителя ионов лазерной плазмы

 $2R_1 = 0,7 \div 1,5$  см  $2R_2 = 3 \div 5$  см  $L = 2 \div 4$  см

## Эксперимент с ГИТ





Блок импульсного запуска 1, силовой блок зарядки 2, емкостной накопитель (C<sub>1</sub> = 0,6 мкФ, модель КПИ-100-0,6, 100 кВ, индуктивность 8 нГн) и управляемый малоиндуктивный разрядник 4 образуют генератор импульсного тока (ГИТ)

Однород	цные лазерные мишени из элементов
	с различной атомной массой

#### 1.1. Литий.

Масса атома (иона)  $M = A \cdot 1,66 \times 10^{-27} \text{ кг} = 7 \cdot 1,66 \times 10^{-27} \text{ кг} \approx 11,6 \times 10^{-27} \text{ кг}$ 

Задержка:  $\tau_{cp} = 2,8x250 = 700$  нс,  $\tau_{MUH} = 1,1x250 = 275$  нс.

Скорость:  $v_{cp} = 0.6/(7x10^{-7}) = 8.57x10^5 \text{ м/c};$  $v_{\text{макс}} = 0.6/(2.75x10^{-7}) = 21.8x10^5 \text{ м/c}.$ 

Энергия:

 $E_{\rm cp} = 11,6 \ {\rm x10^{-27}}(8,6{\rm x10^5})^2 \cdot 0,625 \ {\rm x10^{19}}/2 \approx 26,8 \ {\rm x10^3} \ {\rm yB};$ 

 $E_{\text{макс}} = 11,6 \text{ x} 10^{-27} (21,8 \text{ x} 10^5)^2 \cdot 0,625 \text{ x} 10^{19}/2$  $\approx 175,4 \text{ x} 10^3 \text{ эB}$ 



Литий с БМП (250 нс/дел)



Литий без БМП (1000 нс/дел)

Однородные лазерные мишени из элементов с различной атомной массой

#### 1.2. Бериллий.

Масса атома (иона)  $M = 9.1,66 \times 10^{-27} \, \text{кг} \approx 14,9 \, \times 10^{-27} \, \text{кг}$ 

Задержка:  $\tau_{cp} = 1,5 \text{ x} 500 = 750 \text{ нс}, \tau_{\text{мин}} = 0,6 \text{ x} 500 = 300 \text{ нс}.$ 

Скорость:  $v_{cp} = 0.6/(7.5 \times 10^{-7}) \approx 8.0 \times 10^{5} \text{ м/c};$  $v_{\text{макс}} = 0.6/(3 \times 10^{-7}) \approx 20 \times 10^{5} \text{ м/c}.$ 

#### Энергия:

 $E_{\rm cp} = 14.9 \text{ x} 10^{-27} (8.0 \text{ x} 10^5)^2 \cdot 0.625 \text{ x} 10^{19} / 2 \approx 29.8 \text{ x} 10^3 \text{ 3B};$ 

 $E_{\text{макс}} = 14,9 \text{ x} 10^{-27} (20 \text{ x} 10^5)^2 \cdot 0,625 \text{ x} 10^{19} / 2 \approx 186,3 \text{ x} 10^3 \text{ эB}$ 



#### Бериллий с БМП (500 нс/дел)



#### Бериллий без БМП (1000 нс/дел)

Однородные лазерные мишени из элементов с различной атомной массой

### 1.3. Медь.

**Масса атома** (иона) *М* = 64·1,66х10<sup>−27</sup> кг ≈ 106,2 х10<sup>−27</sup> кг

Задержка:  $\tau_{cp} = 3,4x250 = 850$  нс,  $\tau_{MUH} = 1,8x250 = 450$  нс.

Скорость:  $v_{cp} = 0,6/(8,5x10^{-7}) \approx 7x10^5$ м/с;  $v_{makc} = 0,6/(4,5x10^{-7}) \approx 13,3x10^5$  м/с.

## Энергия:

$$\begin{split} E_{\rm cp} &= 106,2 \ {\rm x10^{-27}} (7 {\rm x10^5})^2 \cdot 0,625 \ {\rm x10^{19}}/2 \\ &\approx 162,6 \ {\rm x10^3} \ {\rm yB}; \end{split}$$

 $E_{\text{MAKC}} = 106,2 \text{ x} 10^{-27} (13,3 \text{ x} 10^5)^2 \cdot 0,625$  $\text{x} 10^{19}/2 \approx 587,1 \text{ x} 10^3 \text{ 3B}$ 



Медь с БМП (250 нс/дел)



Медь без БМП (2500 нс/дел)

Однородные лазерные мишени из элементов с различной атомной массой

#### 1.4. Свинец.

Масса атома (иона)  $M = 207 \cdot 1,66 \times 10^{-27} \, \text{kg} \approx 343,6 \, \times 10^{-27} \, \text{kg}$ 

Задержка:  $\tau_{cp} = 1,9x500 = 950$  нс,  $\tau_{MUH} = 1,2x500 = 600$  нс.

Скорость:  $v_{cp} = 0.6/(9.5 \times 10^{-7}) \approx 6.3 \times 10^5 \text{ м/c};$  $v_{\text{макс}} = 0.6/(6 \times 10^{-7}) \approx 10 \times 10^5 \text{ м/c}.$ 

#### Энергия:

 $E_{\rm cp} = 343,6 \ {\rm x10^{-27}}(6,3{\rm x10^5})^2 \cdot 0,625 \ {\rm x10^{19}}/2 \approx 426,2 \ {\rm x10^3} \ {\rm yB};$ 

 $E_{\text{макс}} = 343,6 \text{ x}10^{-27} (10 \text{ x}10^5)^2 \cdot 0,625 \text{ x}10^{19}/2 \approx 1073,8 \text{ x}10^3 \text{ эB}$ 



Свинец с БМП (500 нс/дел)



Свинец без БМП (5000 нс/дел)

## Результаты коллекторных измерений для ионов с различной атомной массой

Атомная масса	Средняя/мин. задержка Т <sub>ср</sub> /т <sub>мин</sub> , нс	Средняя/макс. скорость ионов v <sub>cp</sub> /v <sub>макс</sub> , 10 <sup>5</sup> м/с	Средняя/макс. энергия ионов Е <sub>ср</sub> /Е <sub>макс</sub> , кэВ
Литий, 7	700/275	8,5/22 2 (без БМП)	27/175 1,8 (без БМП)
Бериллий, 9	750/300	8/20 2,5 (без БМП)	30/190 3,5 (без БМП)
Медь, <mark>6</mark> 4	850/450	7/13 0,8 (без БМП)	160/590 2,4 (без БМП)
Свинец, 207	950/600	6,3/10 1,0 (без БМП)	430/1080 15 (без БМП)

Неоднородные лазерные мишени с содержанием дейтерия

## Дейтерированной полиэтилен $(CD_2)n$ Масса дейтрона $M = 2 \cdot 1,66 \times 10^{-27} \, \mathrm{kg} \approx 3,3 \, \mathrm{x} 10^{-27} \, \mathrm{kg}$

Масса атома (иона) углерода  $M = 12 \cdot 1,66 \times 10^{-27} \, \mathrm{kr} \approx 19,9 \, \mathrm{x} 10^{-27} \, \mathrm{kr}$ 

Задержка: дейтрон  $\tau = 1,0x250 = 250$ нс; углерод  $\tau = 1,8x250 = 450$  нс.

Скорость: дейтрон  $v = 0,6/(2,5x10^{-7}) = 24x10^5 \text{ м/c}$ ; углерод  $v = 0,6/(4,5x10^{-7}) = 13,3x10^5 \text{ м/c}$ ;

Энергия дейтрона:  $E = 3,3 \times 10^{-27}$  $(24\times 10^5)^2 \cdot 0,625 \times 10^{19}/2 \approx 59,4 \times 10^3$  эВ Энергия углерода:  $E = 19,9 \times 10^{-27}$  $(13,3\times 10^5)^2 \cdot 0,625 \times 10^{19}/2 \approx 110 \times 10^3$  эВ



(CD<sub>2</sub>)n с БМП (250 нс/дел)



(CD<sub>2</sub>)п без БМП (500 нс/дел)

#### 2. Неоднородные лазерные мишени с содержанием дейтерия

#### Дейтерид титана TiD

Масса дейтрона  $M = 2 \cdot 1,66 \times 10^{-27} \, \mathrm{kg} \approx 3,3 \times 10^{-27} \, \mathrm{kg}$ 

Масса атома (иона) углерода M =  $48 \cdot 1,66 \times 10^{-27}$  кг  $\approx 79,6 \times 10^{-27}$  кг

Задержка: дейтрон  $\tau = 1,0x250 = 250$  нс; титан  $\tau = 3,2x250 = 800$  нс.

Скорость: дейтрон  $v = 0,6/(2,75x10^{-7}) = 24,0x10^5 \text{ м/c};$  титан  $v = 0,6/(8x10^{-7}) = 7,5x10^5 \text{ м/c};$ 

Энергия дейтрона:  $E = 3,3 \times 10^{-27}$ (24,0x10<sup>5</sup>)<sup>2</sup> ·0,625 x10<sup>19</sup>/2  $\approx$  59,4 x10<sup>3</sup> эВ

Энергия титана:  $E = 79,6 \times 10^{-27} (7,5 \times 10^5)^2$  $\cdot 0,625 \times 10^{19}/2 \approx 139,9 \times 10^3$  эВ



TiD с БМП (250 нс/дел)

## Результаты коллекторных измерений для дейтеросодержащих мишеней

Атомная масса	Задержка	Средняя	Средняя
	т, нс	скорость	энергия ионов
		v <sub>ср</sub> , 10 <sup>5</sup> м/с	<i>Е</i> <sub>ср</sub> , кэВ
Дейтерий, 2	250	24	60
		2,5 <mark>(б</mark> ез БМП)	1,0 (без БМП)
Углерод, 12	450	13	110
Дейтерий, 2	250	24	60
		1,0 (без БМП)	0,4 (без БМП)
Титан, 48	800	7,5	140





1. Рассмотрены генераторы нейтронов с лазерно-плазменным источником дейтронов, имеющими ряд преимуществ по сравнению с вакуумно-дуговыми источникам. Показана перспектива этого направления.

2. Проанализирована возможность повышения энергетической эффективности генерации нейтронов за счет подавления электронной проводимости постоянным и импульсным магнитными полями и достижение потоков ~ 10<sup>10</sup>-10<sup>11</sup> н/с на D + T реакции.

3. Рассмотрена схема ускорения ионов лазерной плазмы быстронарастающим магнитным полем и экспериментально определено увеличение скорости лазерно-плазменных сгустков под воздействием быстронарастающего магнитного поля порядка 10<sup>8</sup> Тл/с от величин порядка 10<sup>7</sup> см/с до 10<sup>8</sup> см/с для ряда ионов, от легких (дейтерий, литий) до тяжелых (медь, свинец).

4. При ускорении БМП возможно достижение скорости дейтронов ~100 кэВ, что может быть использовано для создания наносекундных генераторов с выходом до 10<sup>7</sup> D+D нейтронов из мишеней площадью ~ 1 см<sup>2</sup>.



# БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!