



**В.И. Векслер:
коллективное ускорение
ионов.**

Э.А. Перельштейн, ОИЯИ, 2007.

СОДЕРЖАНИЕ.



- **Введение.**
- **Коллективное ускорение ионов электронными кольцами.**
- **Коллективное ускорение ионов в природе, технике:**
- **1) коллективное ускорение ионов в сильноточных диодах;**
- **2) коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом;**
- **3) Лазерное коллективное ускорение ионов в плазме (LWA – Laser Wakefield Accelerator).**
- **4) Плазменный ускоритель на кильватерной волне (PWA – Plasma Wakefield Accelerator).**
- **Заключение.**

1958 г. Сентябрь Т. LXFI, вып. 1
УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УСКОРЕНИЯ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ .

В. И. Векслер

- “В течение последних лет экспериментальная физика достигла необычайных успехов в задаче искусственного получения частиц с энергиями во много миллиардов электрон-вольт.....”
- (ПРИНЦИП АВТОФАЗИРОВКИ)
- “Искусственное получение пучков протонов и электронов огромной энергии дало возможность исследовать и открыть ряд явлений, имеющих принципиальное значение для физики атомного ядра и естествознания в целом. **Возникла новая, пожалуй, наиболее перспективная область современной ядерной физики—физика частиц высоких энергий.** Темпы развития этой новой области необычайны.”

Международная конференция по мирному использованию
атомной энергии, Женева, 1955.

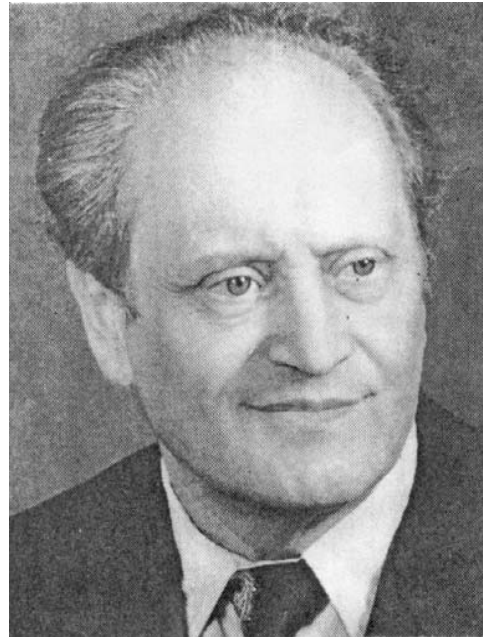


Основатели коллективных методов ускорения частиц.

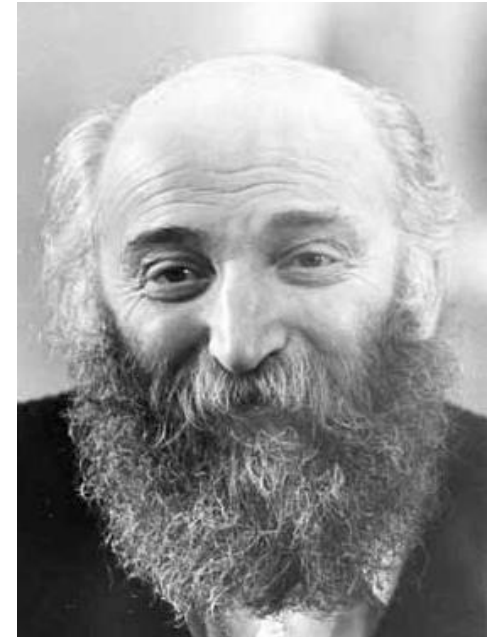


В. И. Векслер, 50-е годы

В.И. Векслер
1907-1966



Я.Б. Файнберг
1918-2005



Г.И. Будкер
1918-1977



Я.Б. Файнберг. В.И. Векслер и новые методы ускорения.

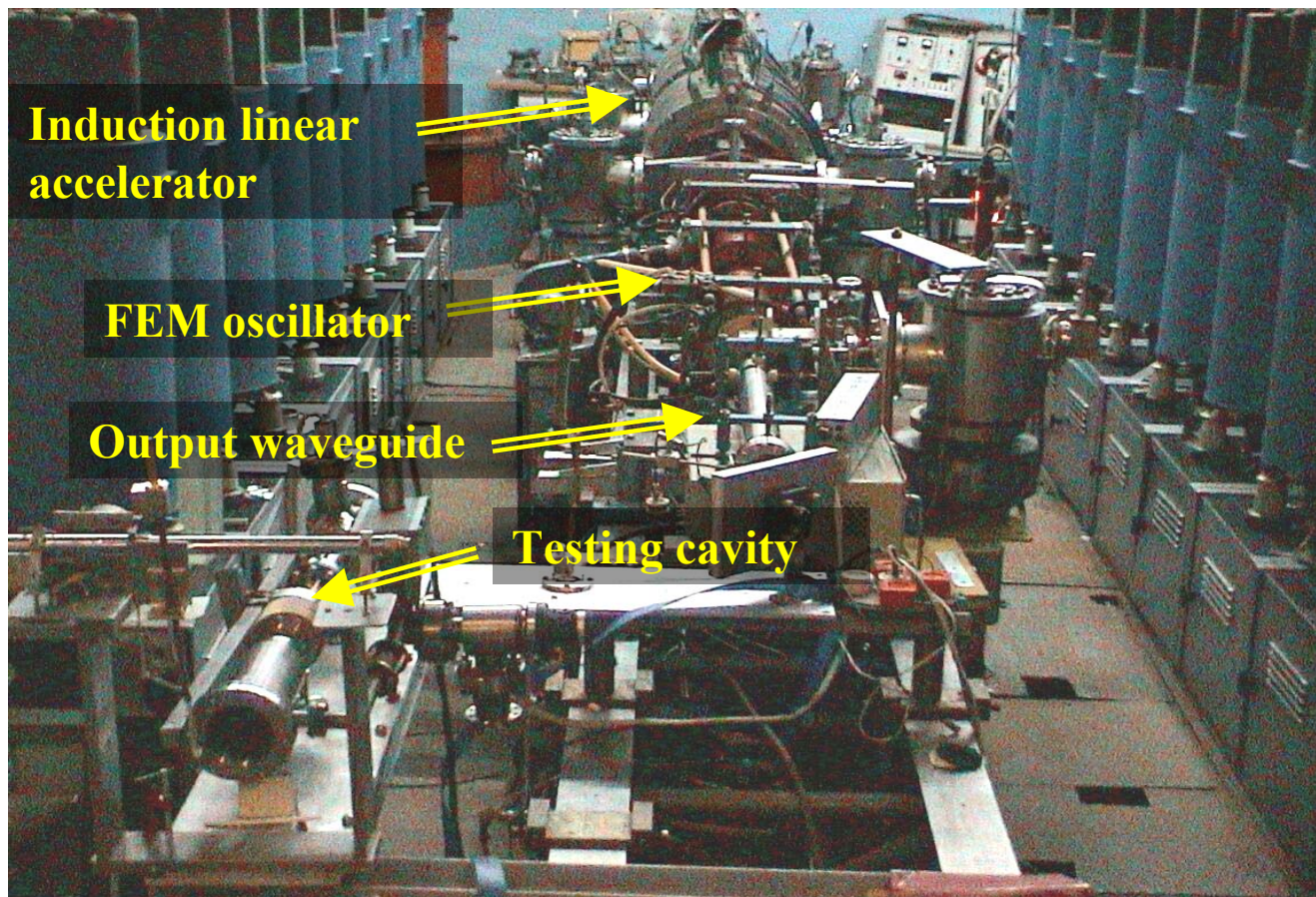
Доклад на семинаре, посвященном 95 летию со дня рождения

В.И. Векслера (Дубна, 2002 г.)

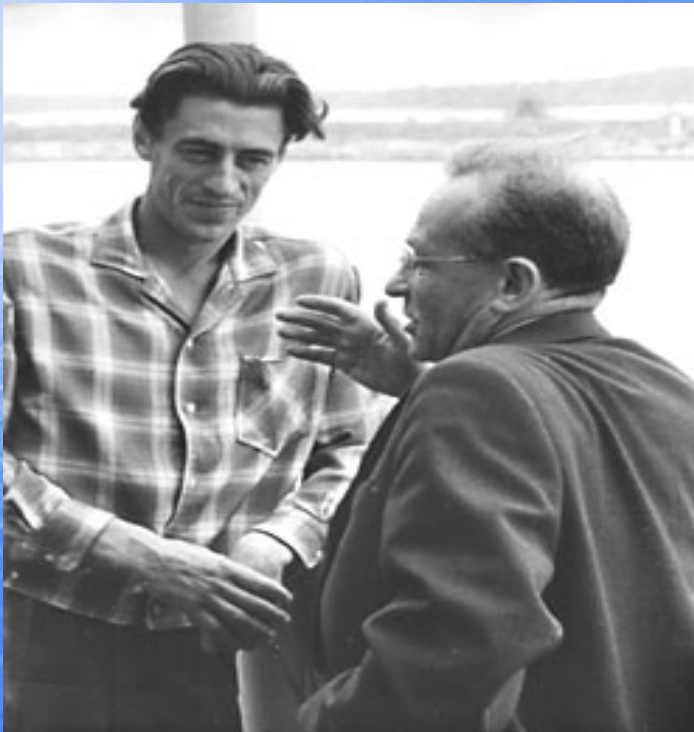
Работы по новым методам ускорения, доложенные на первой международной конференции в Женеве (ЦЕРН) в 1956 г. В. И. Векслером (когерентные методы ускорения), А. М. Будкером (по фокусировке ускоряемых частиц с помощью автостабилизированного релятивистского электронного пучка с учетом сильного влияния процессов излучения) и автора этого доклада (об ускорении с помощью волн плотности заряда, возбуждаемых в плазме или нескомпенсированных пучках заряженных частиц), вызвали большой интерес и серьезную дискуссию.

Напомним, что особенность коллективных методов заключается в том, что ускоряющие и фокусирующие поля не создаются сторонними источниками (например, СВЧ-генераторами), а образуются зарядами и токами среды, в которой происходит ускорение (например, в плазме или сильноточных релятивистских пучках электронов — СРЭП). Таким образом, необычность коллективных методов заключается в том, что в них определяющую роль играют коллективные процессы, происходящие в системах, содержащих большое число кулоновски взаимодействующих частиц, отличающихся большей сложностью, чем традиционные ускорители, и поэтому требующих значительно большее время для проверки и осуществления. В таких системах особую роль приобретают вопросы управления дисперсионными свойствами и многочисленными неустойчивостями.

Когерентные методы ускорения : ускорение движущейся средой, ударное ускорение, ускорение квазинейтральной плазмы СВЧ волной...
ЛСЭ ОИЯИ на базе ЛИУ – 3000.

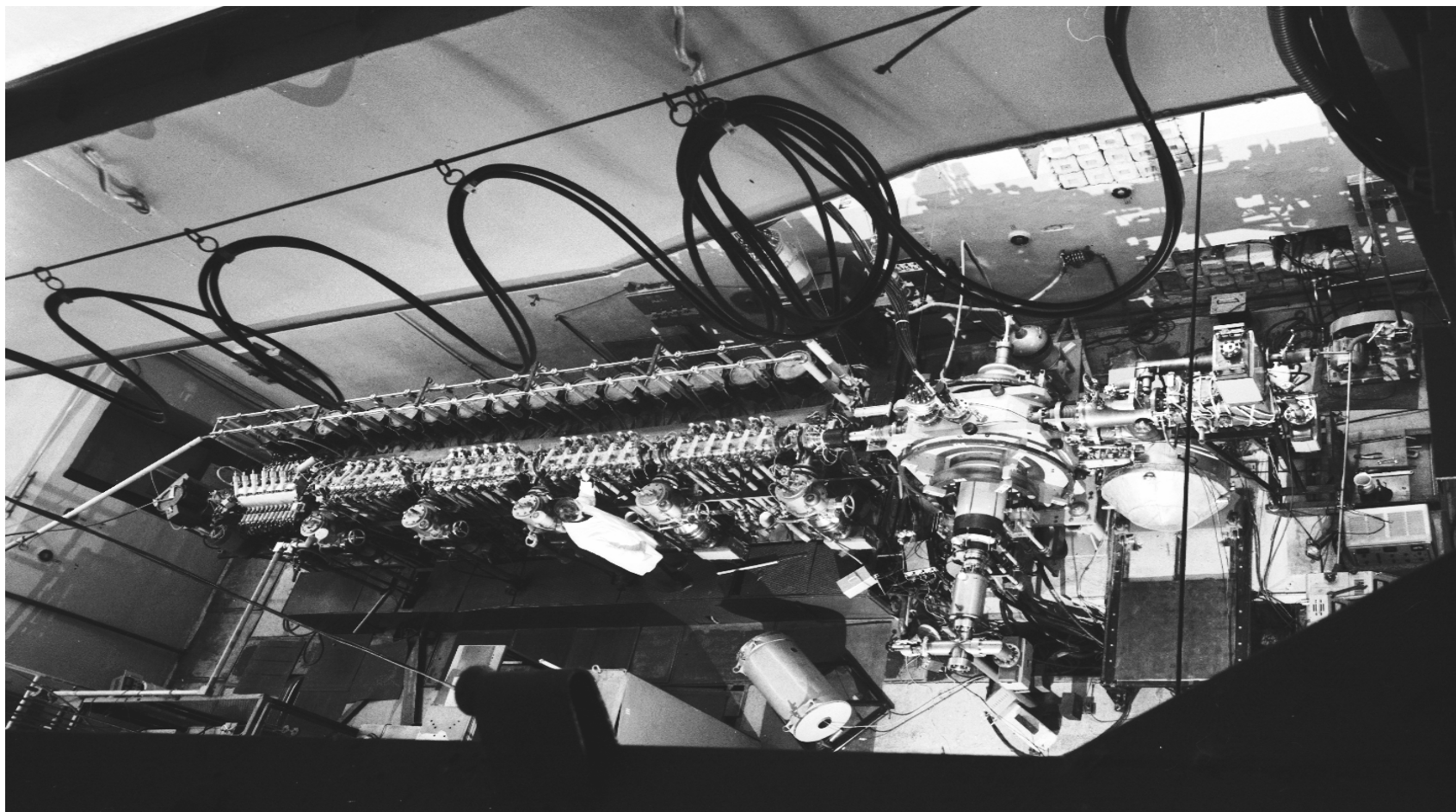


•Изобретение Векслера – Саранцева – АДГЕЗАТОР (адиабатический генератор заряженных тороидов).

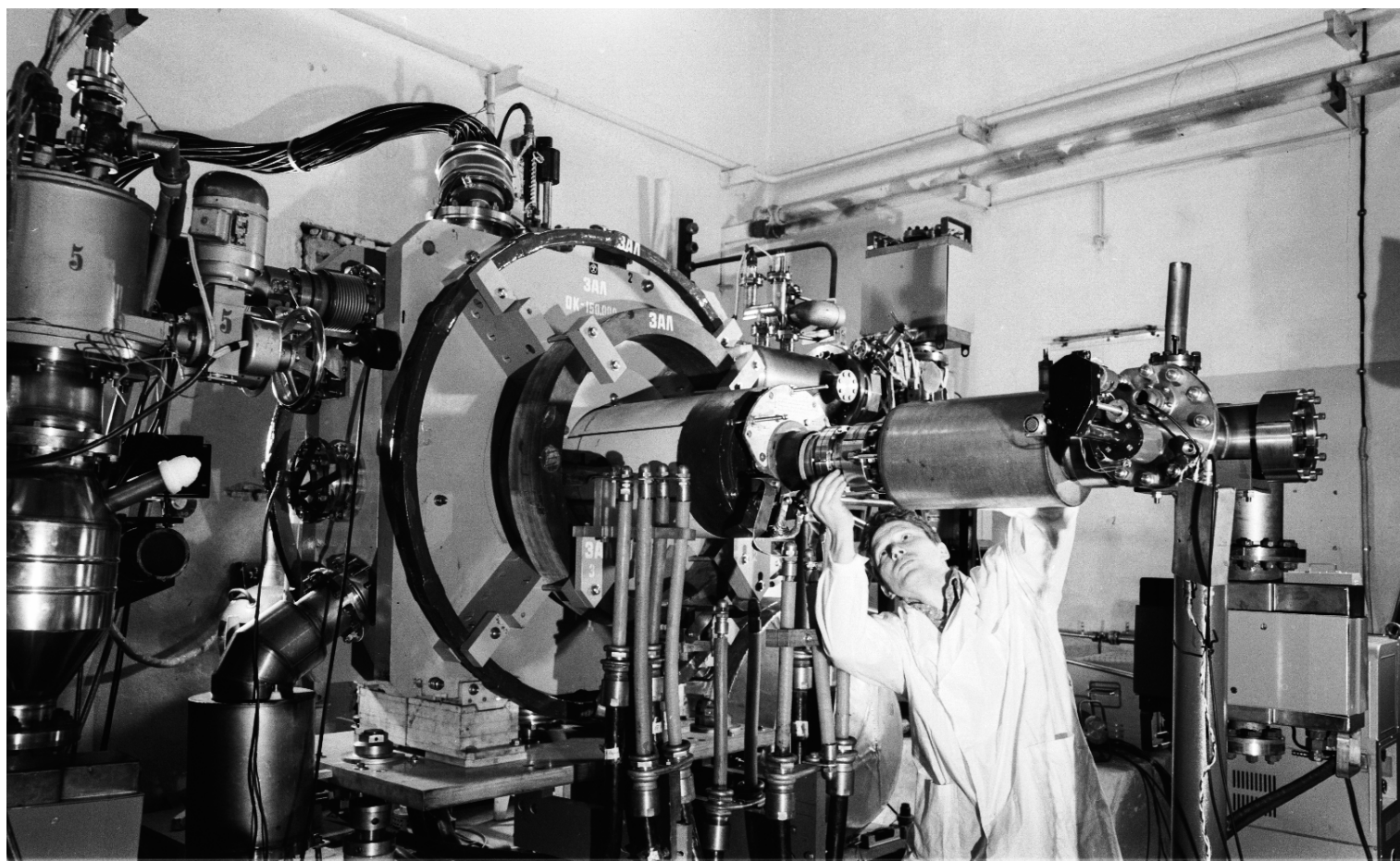


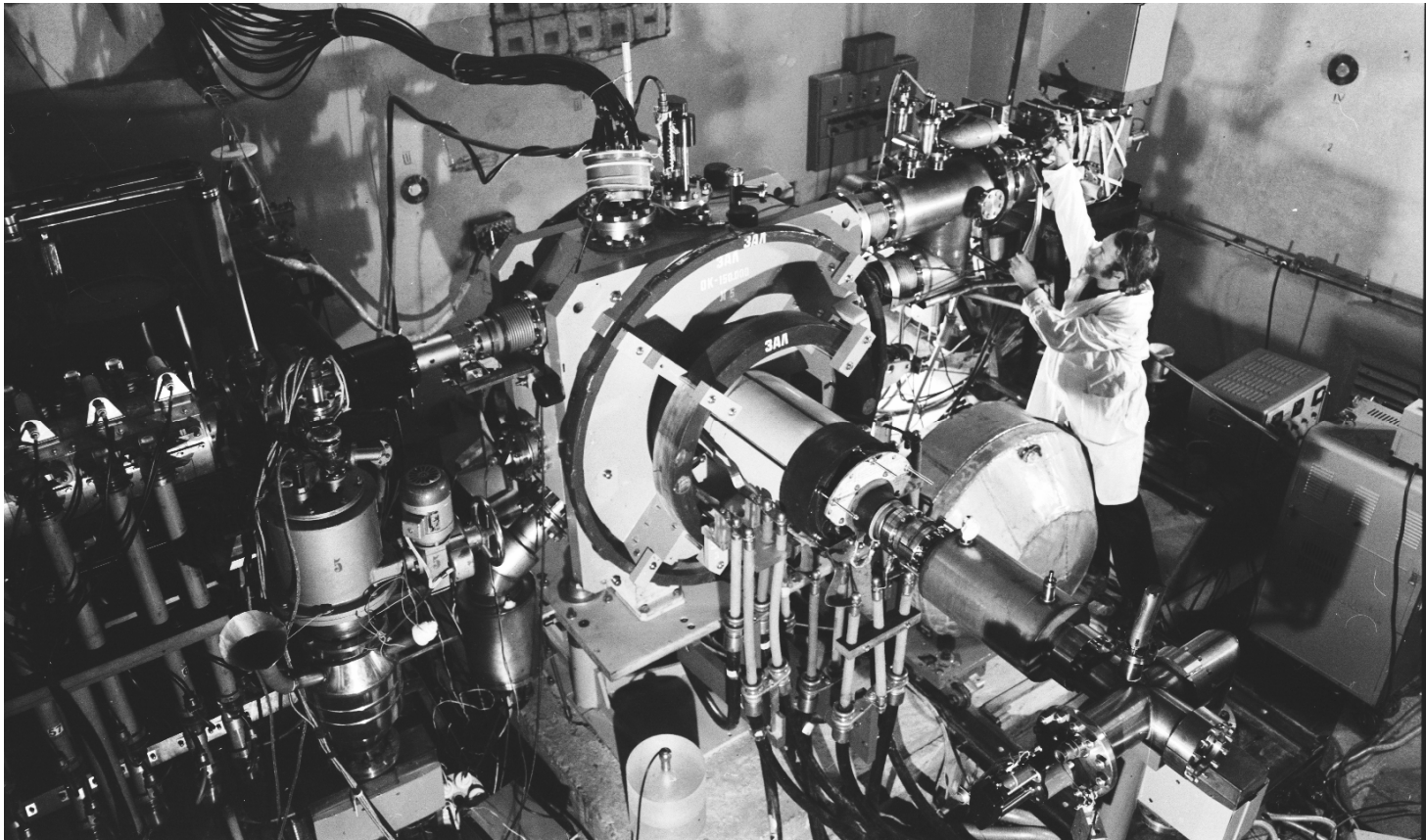
- "1. Способ создания заряженного сгустка частиц кольцевой формы, отличающийся тем, что, с целью повышения устойчивости сгустка, его формируют путем инъекции электронного пучка в слабофокусирующее быстронарастающее во времени магнитное поле с последующей инъекцией в кольцо медленных ионов. 2. Способ по п.1, отличающийся тем, что плотность зарядов в сгустке и его характерные размеры изменяют путем изменения относительной энергии электронов и напряженности магнитного поля во времени".

КОЛЛЕКТИВНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ (КУТИ).

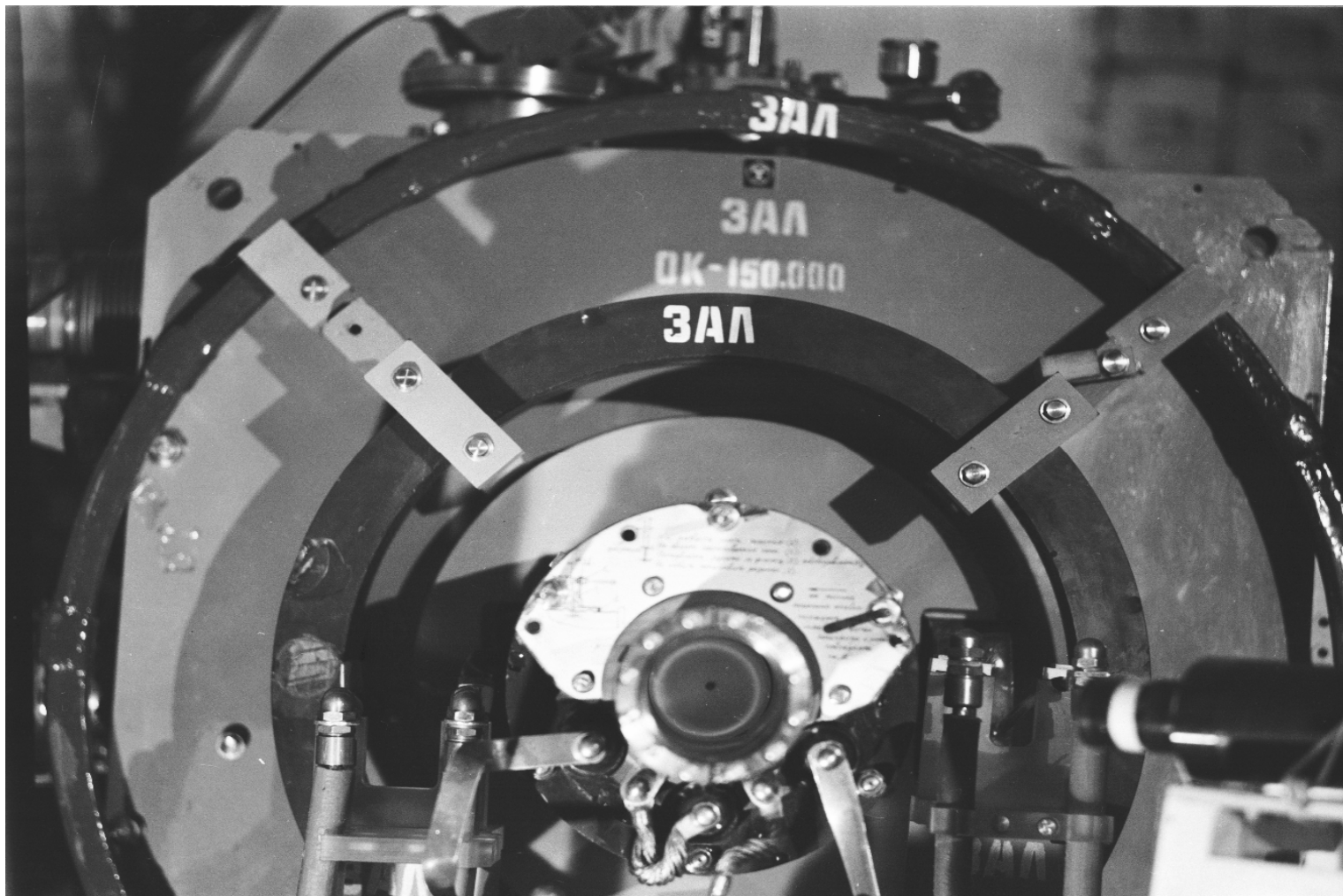


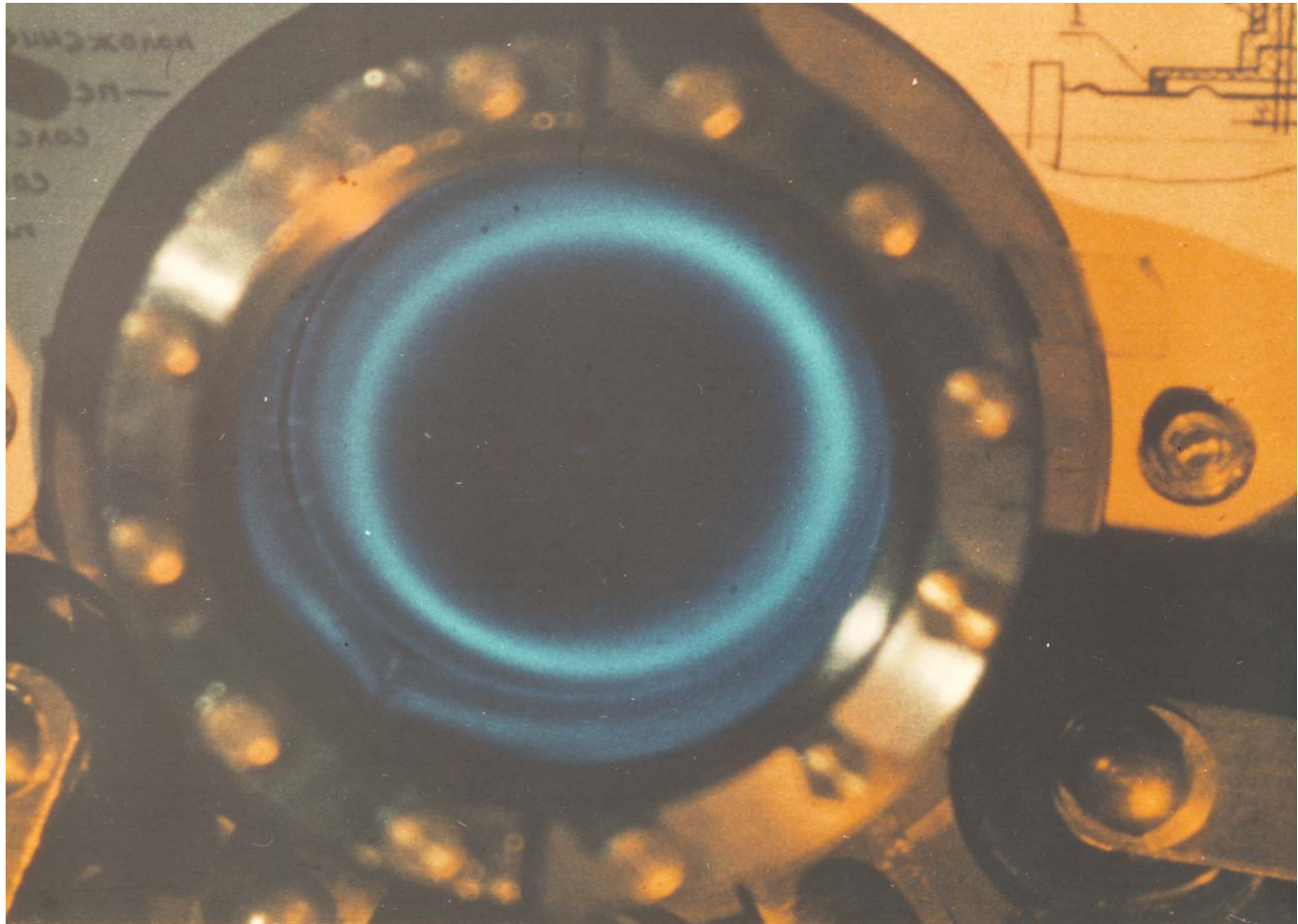
АДГЕЗАТОР КУТИ.





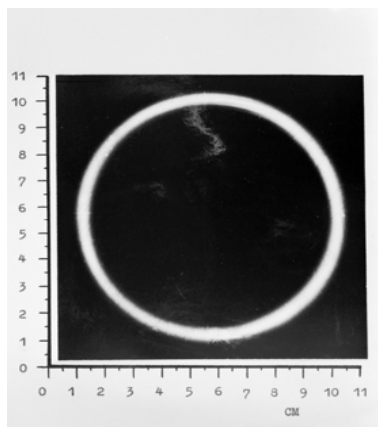
ОТПЕЧАТОК КОЛЬЦА, ВЫВЕДЕННОГО ИЗ КУТИ.



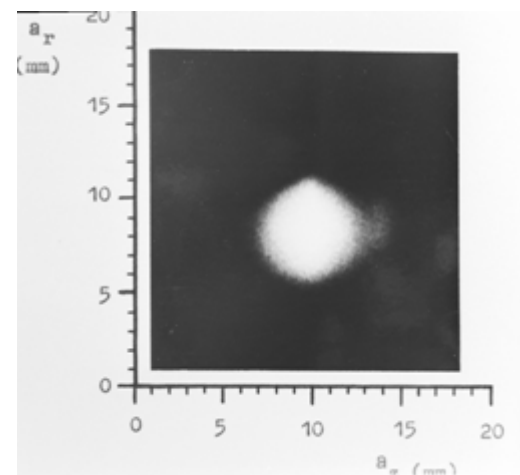


ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЕЦ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ, КОЛЛЕКТИВНОЕ УСКОРЕНИЕ ИОНОВ АЗОТА (ДУБНА, 1977).

- ЧИСЛО ЭЛЕКТРОНОВ В КОЛЬЦЕ – 10^{13} .
- РАДИУС КОЛЬЦА – 3 – 4 см.
- ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОНОВ – 20 МэВ.



- ПОЛУРАЗМЕРЫ СЕЧЕНИЯ КОЛЬЦА – 0.2 см.



- ЧИСЛО ИОНОВ АЗОТА В КОЛЬЦЕ – $5 \cdot 10^{11}$.
- ТЕМП УСКОРЕНИЯ ИОНОВ – 4 МэВ/нуклон.

- ЭНЕРГИЯ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ – 1.5 – 2 МэВ/нуклон.

COLLECTIVE ACCELERATION OF PROTONS AND HELIUM IONS IN THE GARCHING ERA. U. Schumacher et. al., Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Fed. Rep. of Germany, 1975.

- ЧИСЛО ЭЛЕКТРОНОВ В КОЛЬЦЕ $\approx 10^{12}$.
- РАДИУС КОЛЬЦА – 2.5 см.
- ПОЛУРАЗМЕР СЕЧЕНИЯ – 0.5 см.
- ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОНОВ – 15 МэВ.
- ЧИСЛО ИОНОВ В КОЛЬЦЕ – $\approx 10^8$.
- ТЕМП УСКОРЕНИЯ ИОНОВ – 4 МэВ/нуклон.
- ЭНЕРГИЯ ИОНОВ: ВОДОРОДА – 200 КэВ,
- ГЕЛИЯ – 400 КэВ.

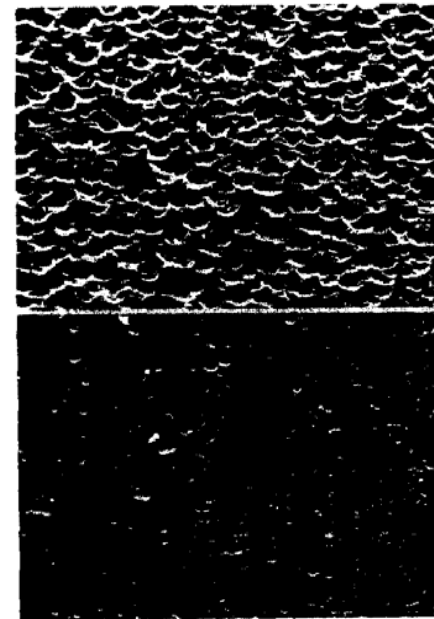


Fig.5 Electron scanning microscope photograph of a foil area bombarded with collectively accelerated He ions (top), and that of a foil area hit by an unloaded electron ring (bottom) for comparison

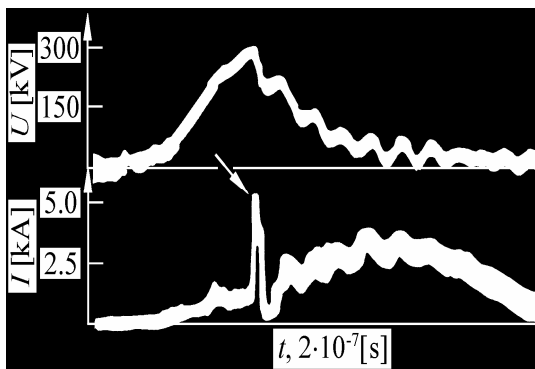
Комиссия DOE (США), 1983

Из личного архива В.П. Саранцева (<http://www.sarancev.ru/win/sci.html>).

- “В 1983 году группа ведущих ученых США по заданию комиссии по энергетике, заинтересованной в
- коллективных ускорителях в связи со своими задачами, изучила состояние дел и вынесла свои
- заключения. Для того, чтобы меня не обвинили в субъективности, я приведу здесь основные выводы
- экспертов:
- 1. Почти все известные концепции коллективных ускорителей достаточно хорошо обоснованы. Большое
- число экспериментальных и теоретических работ выполнено по проблеме ускорения с электронными
- кольцами, гораздо больше, чем по любому другому коллективному методу ускорения. Правильность
- принципа доказана экспериментально, так что это направление находится на более высокой ступени, чем
- другие ускорители. Метод имеет ограничения, но они хорошо изучены. Такой ускоритель полезно
- применить для тяжелых ионов, и его преимуществом является высокая цикличность. Предложения по
- использованию этого метода заслуживают самого серьезного внимания.
- 2. Существует множество непосредственных предложений, представляющих интерес для комиссии по
- энергетике, которым адекватны коллективные ускорители, имеющие преимущества в сравнении с
- традиционными. Применение какой-либо концепции коллективного ускорителя в физике высоких
- энергий не является первоочередной областью применения. Тем не менее, существует много других
- применений ускорителей: в качестве инжекторов ускорителей высоких энергий, в промышленности,
- медицине, технике. Мы полагаем, что возможности коллективного ускорителя оправдывают их изучение.
- 3. Стимулирование смежных областей физики.
- 4. Необходимо соответствующим организациям рассмотреть предложения по созданию
- крупномасштабных прототипов ускорителей.
- 5. Требуется значительная финансовая поддержка порядка 5 млн долларов в год. Затруднения в
- поддержке работ по коллективным ускорителям серьезно тормозили развитие в этой области
- исследований. Существовала даже некоторая, вероятно, подсознательная тенденция концентрировать
- внимание на ближайших задачах, чтобы получить поддержку.
- 6. В других странах, особенно в СССР, ведется активная работа по коллективным ускорителям. Работы в
- США находятся на одном уровне или несколько опережают известные нам работы за границей.
- 7. Кроме существенной финансовой поддержки, исследования по коллективному методу должны
- интенсифицироваться усилением связей и координацией работ отдельных исследовательских групп.”

Неуправляемое коллективное ускорение ионов в природе, технике....

A.A. Plyutto, *J.E.T.Ph.*, 39, 1589, (1960), E.D. Korop and A.A. Plyutto. *J. T. Ph.*, 40, 2534 (1970)



E.D. Korop. *Zh. Tekh. Fiz.*, 46, 2187(1976)

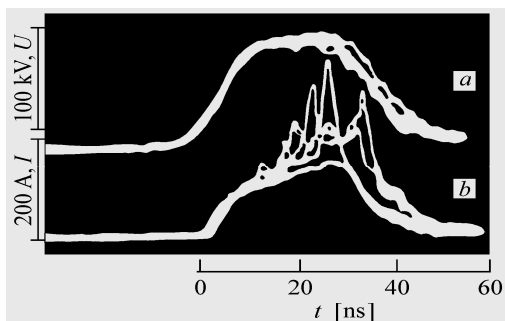
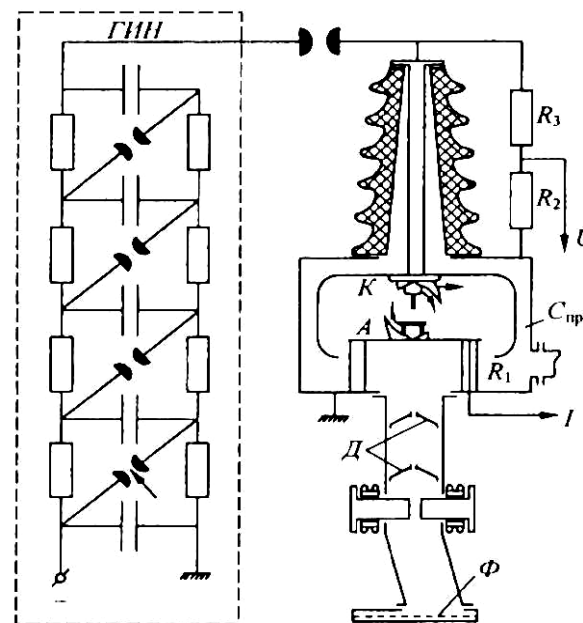
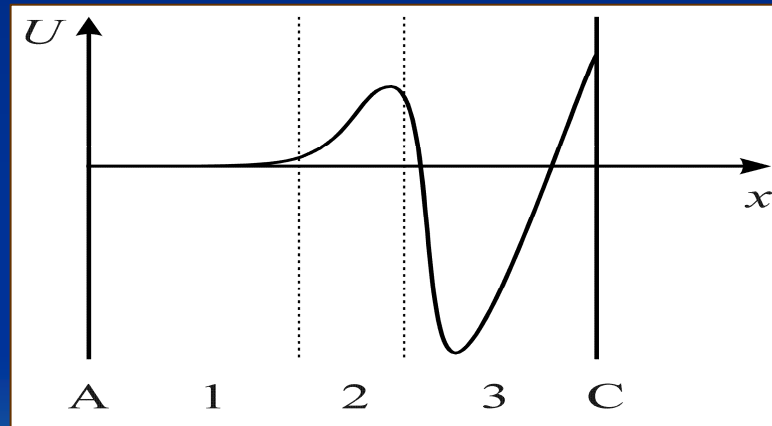


Схема экспериментальной установки КП (1970)

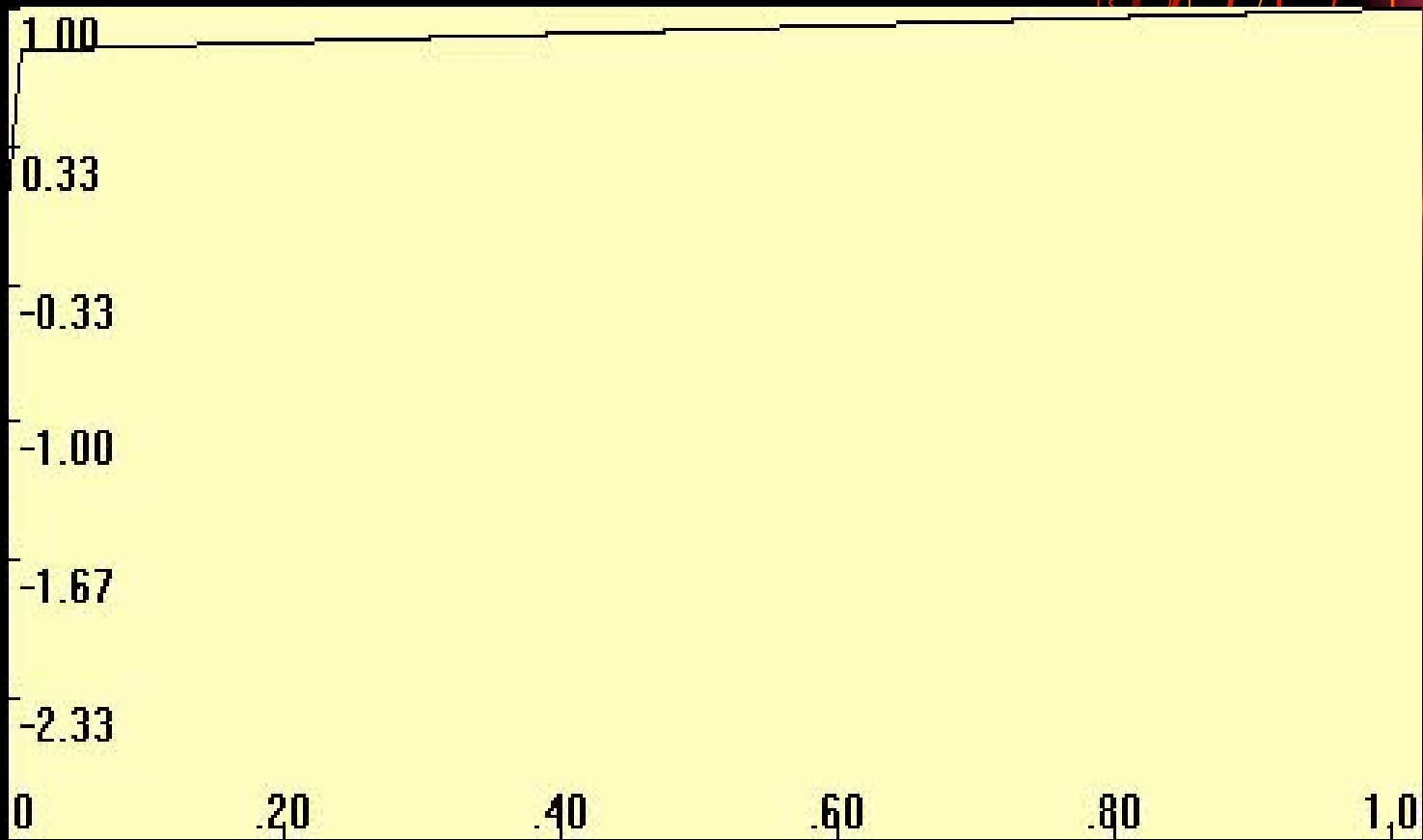


The plasma flare current abruptly increases at bursts. As a result, a current with a high electron energy, which exceeds the limiting current, is injected into the gap between the flare front and the anode, and a potential well is formed.



Potential distribution in a vacuum diode with EEE at deep nonstationary potential well formation:

1 – cathode flare plasma; 2 – charging plasma at flare front;
3 – deep nonstationary potential well. A – cathode, C – anode.



Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом

А.Е. Дубинов, И.Ю. Корнилова, В.Д. Селемир

Излагается современное состояние исследований и разработок в области физики и техники коллективного ускорения ионов в системах с виртуальным катодом (ВК). Рассматриваются три основных метода ускорения и устройства на их основе: отражательные триоды и их модификации, газонаполненные виркаторы и вакуумные виркаторы с диодом Люса. Приводятся экспериментальные результаты и описываются основные физические модели, объясняющие эти результаты. Рассматриваются также новые методы ускорения ионов, осуществление которых связано с образованием и исчезновением ВК. Сравняются все методы коллективного ускорения ионов и указываются возможные пути дальнейшего развития этой перспективной научной области.

PACS number: 41.75.Ak

Содержание

1. Введение (1225).
2. Коллективное ускорение ионов в диодных отражательных системах (1226).
 - 2.1. Диодные ОС, их классификация.
 - 2.2. Сравнительный анализ симметричных и асимметричных ОС.
 - 2.3. Методы получения анодной плазмы, состав ионных пучков.
 - 2.4. Применение ОС.
3. Коллективное ускорение ионов сильноточным РЭП в нейтральном газе (1231).
 - 3.1. Основные результаты экспериментальных работ.
 - 3.2. Теоретические модели и расчеты, их сопоставление с экспериментальными данными.
 - 3.3. Способы синхронизации движения фронта ВК и ускоряемых ионов.
4. Коллективное ускорение ионов в диоде Люса с изолированным анодом (1237).
 - 4.1. Основные результаты экспериментальных работ, концепции механизма ускорения.
 - 4.2. Модификации диода Люса.
5. Другие методы коллективного ускорения ионов в системах с ВК (1240).
 - 5.1. Коллективное ускорение ионов в искровом вакуумном разряде.
 - 5.2. Коллективное ускорение ионов в режиме бегущей границы распределенного ВК.
6. Заключение (1244).

1. Введение

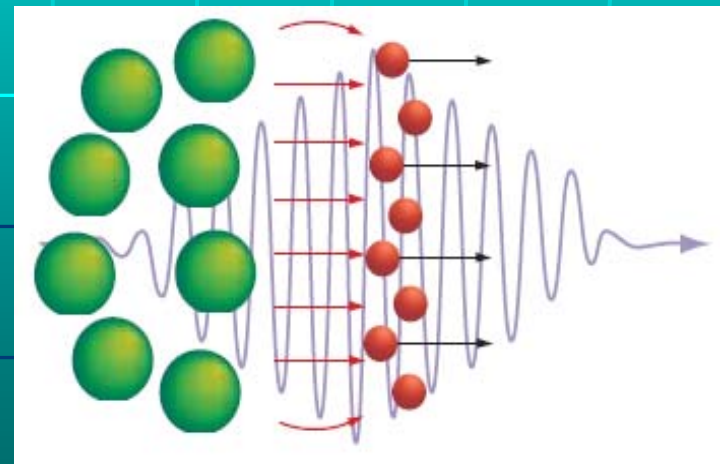
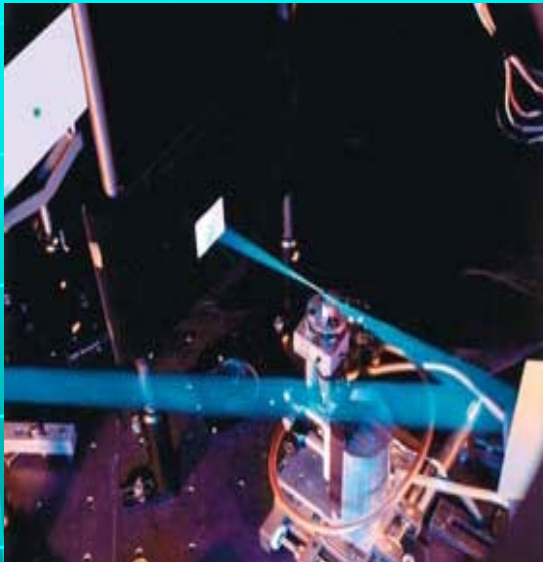
Предмет настоящего обзора — рассмотрение и анализ физики и техники коллективного ускорения ионов в системах на основе сильноточных электронных пучков с виртуальным катодом (ВК).

К разработке методов коллективного ускорения ионов приступили более 40 лет назад. Характерная особенность данных методов заключается в том, что в них основную роль играет взаимодействие ускоряемых частиц с самосогласованными коллективными полями пространственного заряда или токами, обусловленными совокупностью электронов плазмы, релятивистских пучков, колец, ступков и других образований. Преобладание коллективных процессов в ускоряющих системах, основанных на подобных методах, существенно повышает максимальные напряженности ускоряющих полей (до $\sim 10^6$ В см⁻¹) и предельные токи ускоряемых частиц (до ~ 1 МА), что позволяет генерировать сильноточные ионные пучки мощностью до ~ 1 ТВт. Перспективность использования таких пучков очевидна, область применения очень широка — управляемый термоядерный синтез [1, 2], создание мощных импульсных нейтронных источников [3], получение мощных лазеров [4] и др.

Новый метод ускорения ионов (2000 г.), (лазерное коллективное ускорение частиц).

- Три группы исследователей (из Ливермора, Мичиганского университета и из Лаборатории им. Резерфорда) независимо предложили новый способ получения мощных пучков ионов путем облучения ультракороткими лазерными импульсами микроскопических частичек твердого вещества. В будущем этот метод может стать альтернативой громоздким и дорогостоящим циклотронам. Процесс ускорения включает несколько стадий. Сначала под действием электрического поля лазерного света ускоряются и покидают поверхность вещества электроны. Между облаком электронов и веществом возникает мощное электростатическое поле, подобное полю в конденсаторе. Под действием этого поля и происходит ускорение ионов. **Ливерморский эксперимент** выполнялся с использованием самого мощного в мире лазера. В этом эксперименте **удалось достичь энергий протонов до 50 МэВ. В Мичиганском эксперименте энергия протонов на порядок меньше**, но установка имеет компактные размеры и пригодна для практических применений, например, в медицине. **В Лаборатории им. Резерфорда кроме ускорения протонов до энергии около 17 МэВ также получены ускоренные до энергии 420 МэВ ионы свинца.**

КОЛЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ. Gérard A. Mourou and Donald Umstadter, 2002

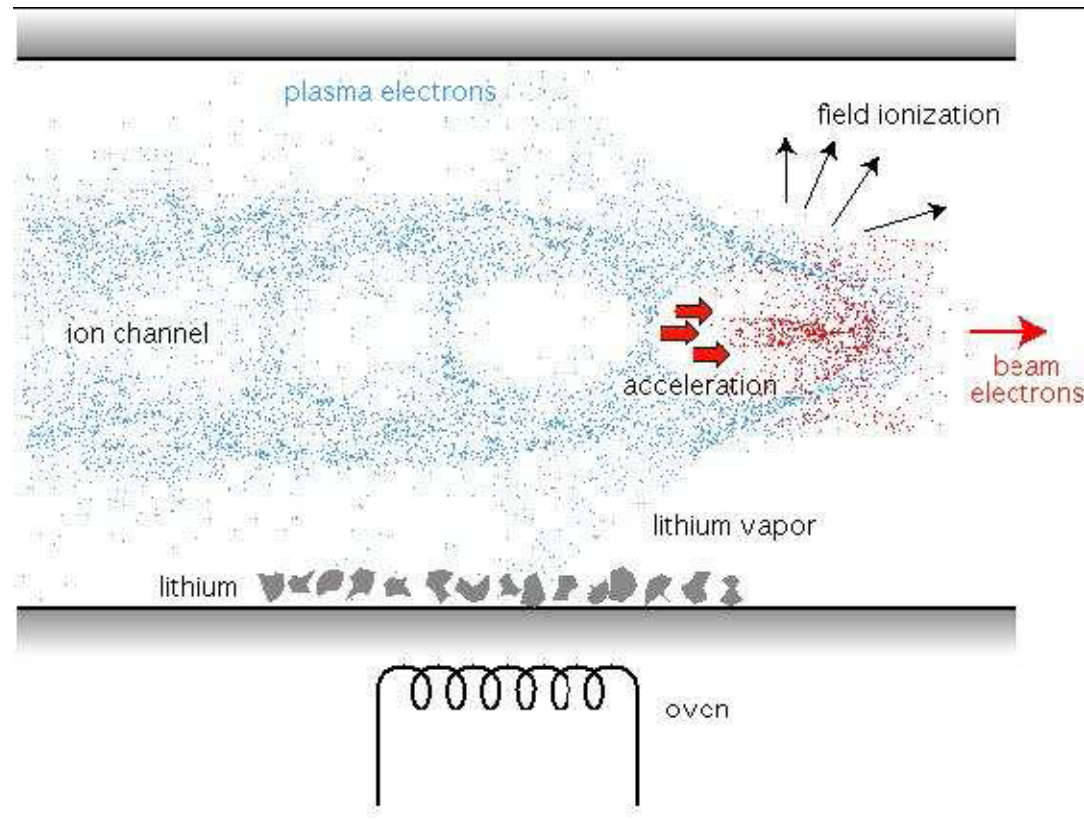


- ULTRAHIGH-INTENSITY LASER PULSE (*added in blue*) focused on a helium gas jet by a parabolic mirror accelerates electrons from the gas to 60 million electron volts in one millimeter. A fluorescent screen (*upper left*) detects the high-energy electron beam.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПУЧКОВОГО КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРЕНИЯ В ПЛАЗМЕ (wakefield acceleration).

Mark J. Hogan, et.al., SLAC-PUB-12164

October 2006



Экспериментальная установка плазменного ускорителя на кильватерной волне (PWA).
Neil Kirby et.al., SLAC, October 2006.

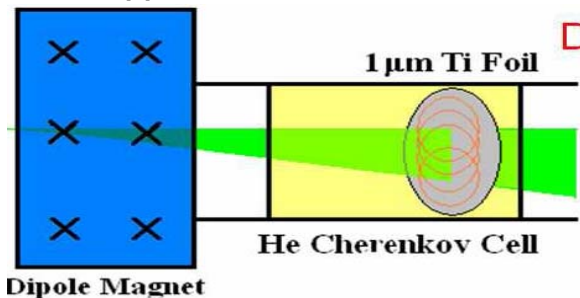


Plasma Oven

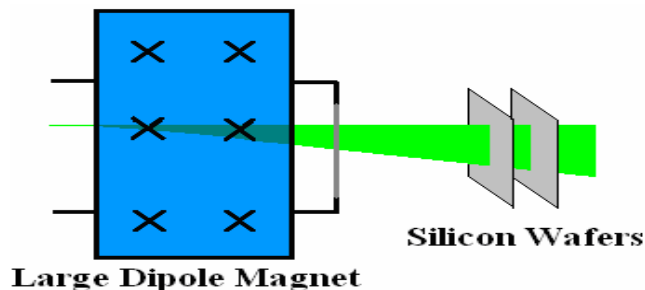
PWA (SLAC, 2007) - РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА.

Черенковский спектрометр элетронов низких энергий (от 60 МэВ до 10 ГэВ) .

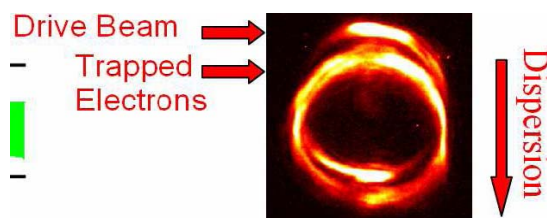
- Использовался до длин литиевого испарителя до 30.5 см.



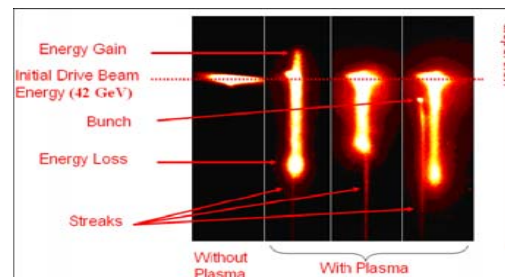
- Черенковский спектрометр элетронов высоких энергий (больше 2 ГэВ). Длина литиевого испарителя – 85 см.



Энергия налетающих электронов – 28.5 ГэВ. Средняя энергия ускоренных электронов плазмы - 7.6 ГэВ (30.5 см).



Энергия налетающих электронов - 42 ГэВ. Максимальная энергия ускоренных электронов плазмы - 30 ГэВ (85см).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ.



- **1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ СГУСТКАМИ ЭЛЕКТРОНОВ И ВОЛНАМИ В ПЛАЗМЕ ПОКАЗАЛИ ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И ПРИГОДНОСТЬ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БОЛЬШИХ УСКОРЯЮЩИХ ПОЛЕЙ.**
- **2. В ЭКСПЕРИМЕНТАХ В ДУБНЕ И ГАРШИНГЕ ПОЛУЧЕНЫ КОЛЛЕКТИВНО УСКОРЕННЫЕ ИОНЫ ВОДОРОДА, ГЕЛИЯ И АЗОТА С ТЕМПОМ УСКОРЕНИЯ ОКОЛО $4 \text{ МэВ/НУКЛОН} \cdot \text{М}$.**
- **3. НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРЕНИЯ ОБЪЯСНЕНЫ МНОГИЕ НАБЛЮДЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ ИОНОВ В ПРИРОДЕ.**
- **4. В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ЛАЗЕРНОМУ КОЛЛЕКТИВНОМУ УСКОРЕНИЮ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ ПОЛУЧЕНЫ УСКОРЯЮЩИЕ ПОЛЯ ОКОЛО 1 ГэВ/М И УСКОРЕННЫЕ ИОНЫ С ЭНЕРГИЕЙ В ДЕСЯТКИ МэВ .**
- **5. В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ПУЧКОВОМУ КОЛЛЕКТИВНОМУ УСКОРЕНИЮ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ (SLAC) ПОЛУЧЕНЫ УСКОРЯЮЩИЕ ПОЛЯ ПОРЯДКА 10 ГэВ/М НА ДЛИНЕ ОКОЛО 1 М И УСКОРЕННЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ С ЭНЕРГИЕЙ ДЕСЯТКИ ГэВ .**
- **6. НЕОБХОДИМЫ ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ ПО СОЗДАНИЮ КОНТРОЛИРУЕМОГО КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРЕНИЯ ИОНОВ.**

Благодарности

- Приношу свои извинения за неполноту списка работ, вошедших в этот краткий обзор.
- Я благодарен В.Д. Кекелидзе за приглашение сделать этот доклад на сегодняшнем юбилейном совещании памяти В.И. Векслера.
- Я благодарю Б.М. Старченко, Ю.А. Туманова, И.Ю. Щербакову (ОИЯИ) и В.И. Карася (ХФТИ) за любезно предоставленные мне ценные фотодокументы, использованные в этом обзоре.