

# Прошлое, настоящее и будущее открытых плазменных ловушек

---

**А.А.Иванов**

Научная сессия ИЯФ

2018



# План изложения

---

- Основные этапы развития открытых ловушек для удержания плазмы
- Современное состояние исследований ловушек с магнитными пробками и их роль в исследованиях по УТС
- Чем должно отличаться следующее поколение систем с магнитными пробками?
- Проект ГДМЛ и поддерживающие эксперименты
- Заключение

# РАБОТЫ Г.И.БУДКЕРА, ПОСВЯЩЕННЫЕ ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УТС

---

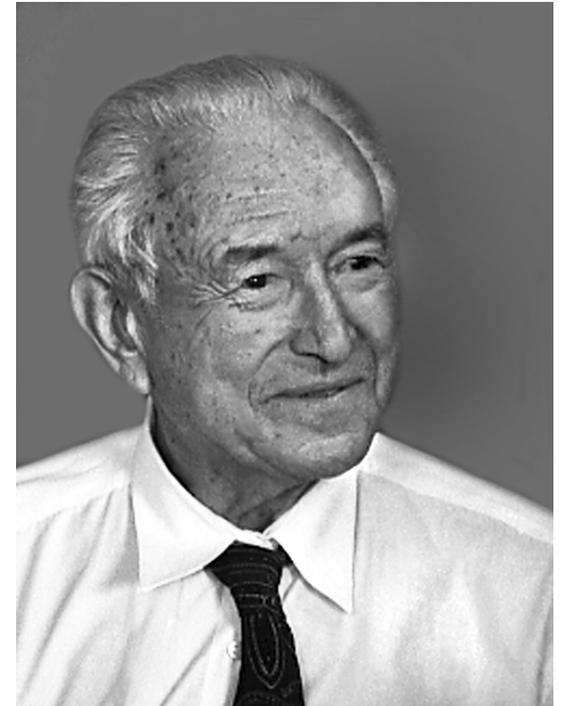
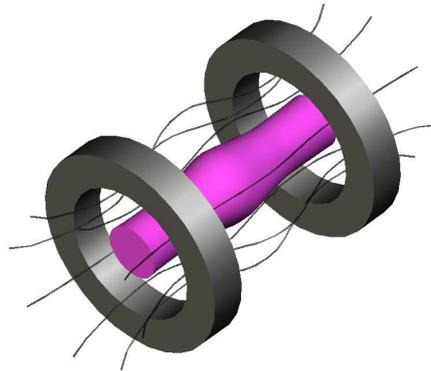
1. Вопросы, связанные с дрейфом частиц в тороидальном магнитном термоядерном реакторе.
2. Бетатронный метод разогрева плазмы до высоких температур.
3. Некоторые вопросы, связанные с пространственной устойчивостью кольцевого тока в плазме.
4. Электрический пробой в газе при наличии сильного внешнего магнитного поля, переменного во времени.
5. Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками, к вопросу о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую.
6. Многоквантовая рекомбинация в ионизованном газе.  
(совм. с С.Т.Беляевым)
7. Эксперименты с плотной горячей плазмой  
(совм. с С.Г.Алихановым, А.В.Коминым, В.А.Поляковым, Б.С.Эстриным)
8. Получение мегагаусных полей методом магнитодинамической кумуляции (совм. с С.Г.Алихановым, В.Г.Белан, А.И.Иванченковым, Г.Н.Кичигиным)

- 
9. Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы (совм. с В.В.Мирновым, Д.Д.Рютовым)
  10. Газодинамика плотной плазмы в гофрированном магнитном поле (совм. с В.В.Мирновым, Д.Д.Рютовым)
  11. Эксперименты по удержанию плазмы в многопробочном магнитном поле (совм. с В.В.Даниловым, Э.П.Кругляковым, Д.Д.Рютовым, Е.В.Шунько)
  12. Управляемый термоядерный синтез в установках с плотной плазмой.
  13. Удержание плазмы в многопробочном магнитном поле.  
(совм. с В.В.Даниловым, В.А.Корниловым, Э.П.Кругляковым, В.Н.Лукьяновым, В.В.Мировым, Д.Д.Рютовым)
  14. Термоядерные реакции в потенциальной яме отрицательного заряда.
  15. Релятивистская плазма в переменных полях  
(совм. с С.Т.Беляевым)

- 
16. Кинетическое уравнение для электронного газа при редких столкновениях. (совместно с С.Т.Беляевым)
  17. Релятивистское кинетическое уравнение. (совместно с С.Т.Беляевым)
  18. Релятивистский стабилизированный электронный пучок.
  19. Плазма с релятивистскими электронами в ловушке с магнитными пробками. (совместно с В.И.Волосовым, С.С.Моисеевым, В.Е.Пальчиковым, Ф.А.Цельником)
  20. К вопросу о характере и объеме исследовательских работ, необходимых для создания стабилизированного электронного пучка. (совместно с А.А.Наумовым)
  21. Перезарядная инжекция протонов в кольцевые ускорители (совместно с Г.И.Димовым)

# 1954 г – ЛОВУШКИ С МАГНИТНЫМИ ПРОБКАМИ

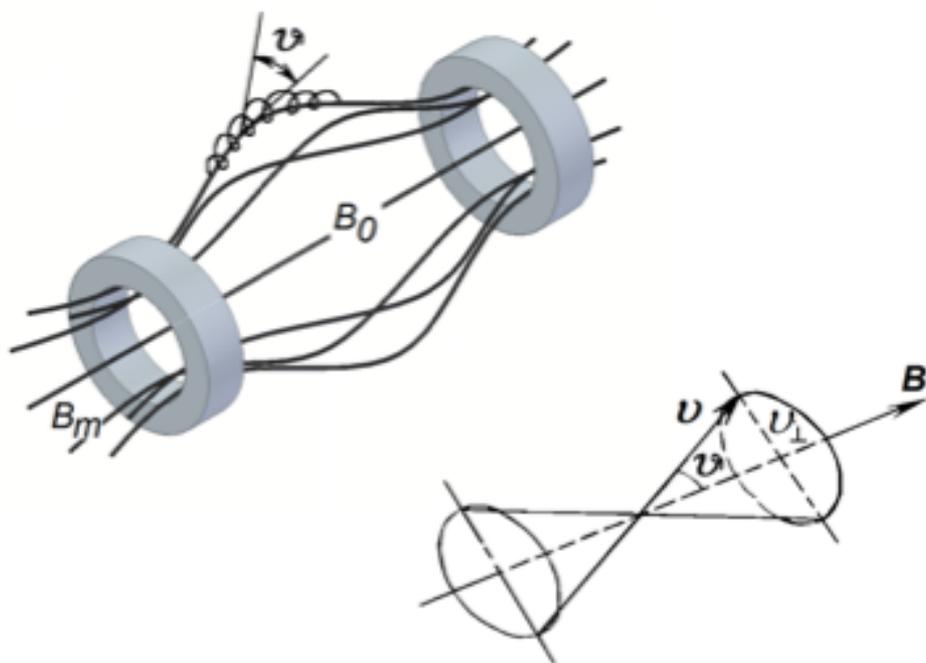
---



Будкер Г И,  
в сб. Физика плазмы и проблема  
управляемых термоядерных реакций, т.3,  
М.: Изд. АН СССР, 1958

Post R F,  
in *Proc. of Second U.N. Int. Conf. on Peaceful  
Uses of Atomic Energy* (Geneva, 1958) v. 32,  
p. 245

Г.И.Будкер, Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками, к вопросу о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую



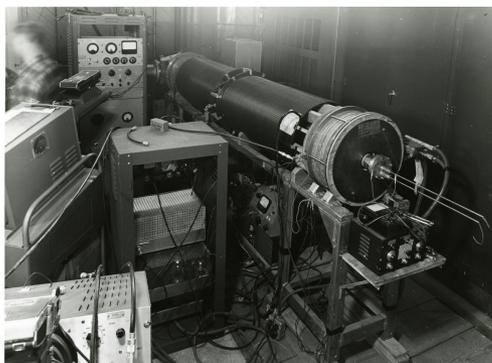
$$f = q_0 e^{-p^2} \ln \frac{\sin \vartheta}{\sin \vartheta_0}$$

Функция распределения ионов

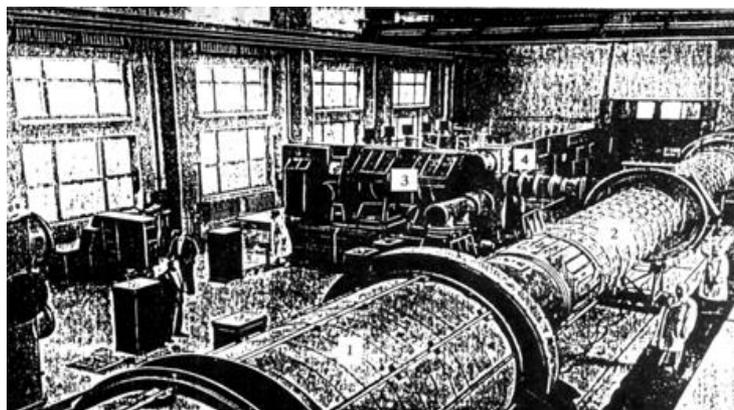
$$I = \frac{6.1}{\ln R} \cdot \frac{Le^4 n^2}{\sqrt{mT}^{3/2}}$$

Поток ионов в конус потерь

# Первые эксперименты на установках с магнитными зеркалами



Экспериментальная  
Пробочная ловушка  
"Cucumber", LLNL (1955)



Установка ОГРА, ИАЭ, 1958

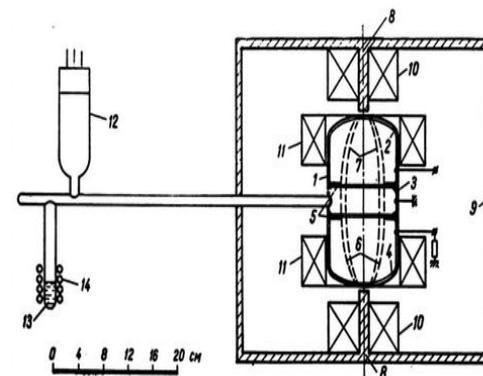


Рис. 1. Схематический разрез установки:  
1—стеклянная камера; 2—высоковольтный электрод; 3—охранное кольцо;  
4—коллектор; 5—стеклянные нольцевые выступы; 6—границы рабочего объема  
для медленных ионов и электронов; 7—границы рабочего объема для быстрых  
 $\beta$ -частиц; 8—полка алюминатита; 9—проб; 10, 11—нагнетки; 12—манометри-  
ческая лампа; 13—УТ; 14—нагреватель УТ.

Опыты С.Н.Родионова, 1959

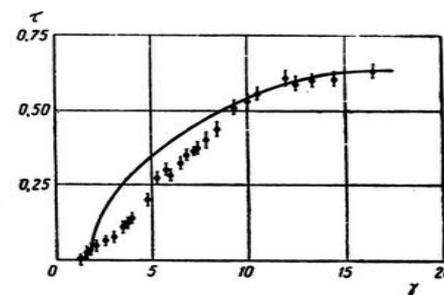


Рис. 6. Зависимость времени жизни  $\beta$ -частицы в ловушке  $\tau$  от  $\gamma$ . (Сплошная кривая—теоретическая.)

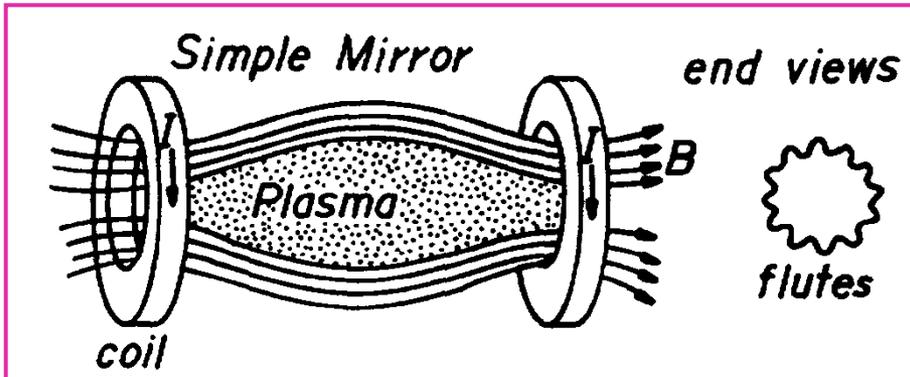
# Общие характеристики открытых магнитных ловушек

---

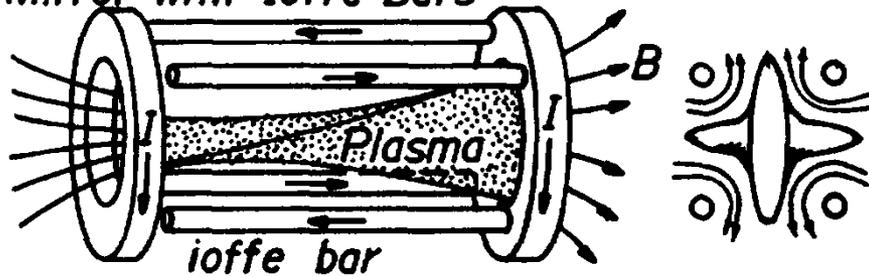
- неоднородности плотности/давления → конвекция плазмы
- анизотропия плазмы → кинетические неустойчивости
- большие продольные потери частиц в результате столкновений
- аномальные поперечные потери, связанные с отсутствием аксиальной симметрии.
- охлаждение плазмы из-за контакта с торцом

# Конфигурации магнитного поля с $\min\text{-}B$

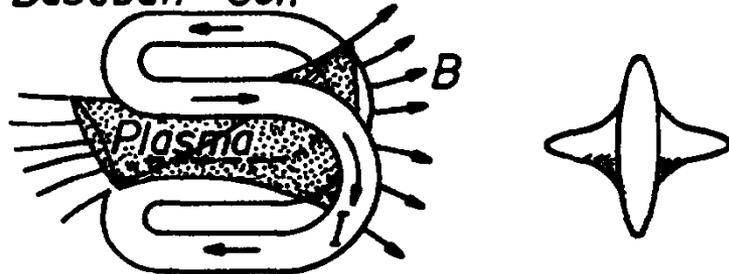
## Singe mirror (unstable)



## *Mirror with Ioffe Bars*

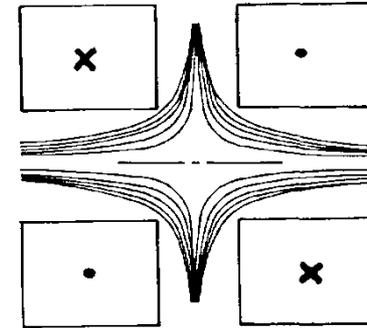


## *Baseball Coil*



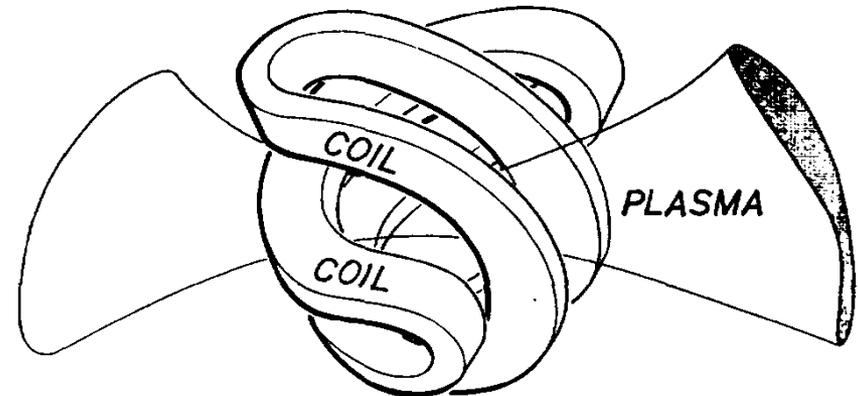
## «Ioffe bars» и Baseball coil

## Magnetic cusp (stable outward)



в такой системе нет  
сохранения адиабатического  
инварианта – магнитного  
момента

## Ying Yang coil



# Развитие идеи пробкотрона Будкера-Поста

Стабилизация желобковых мод  $m$ -В, Готт Ю.В., Иоффе М.С., Тельковский В.Г., *Nucl. fusion*, 1962, suppl. 3, 1047

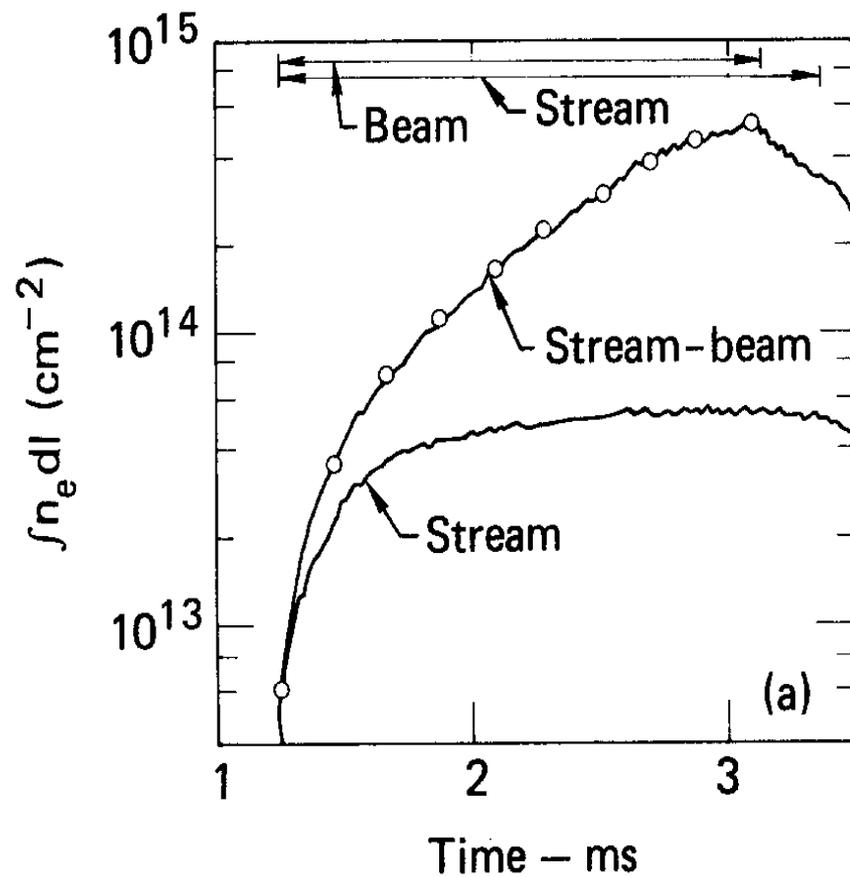
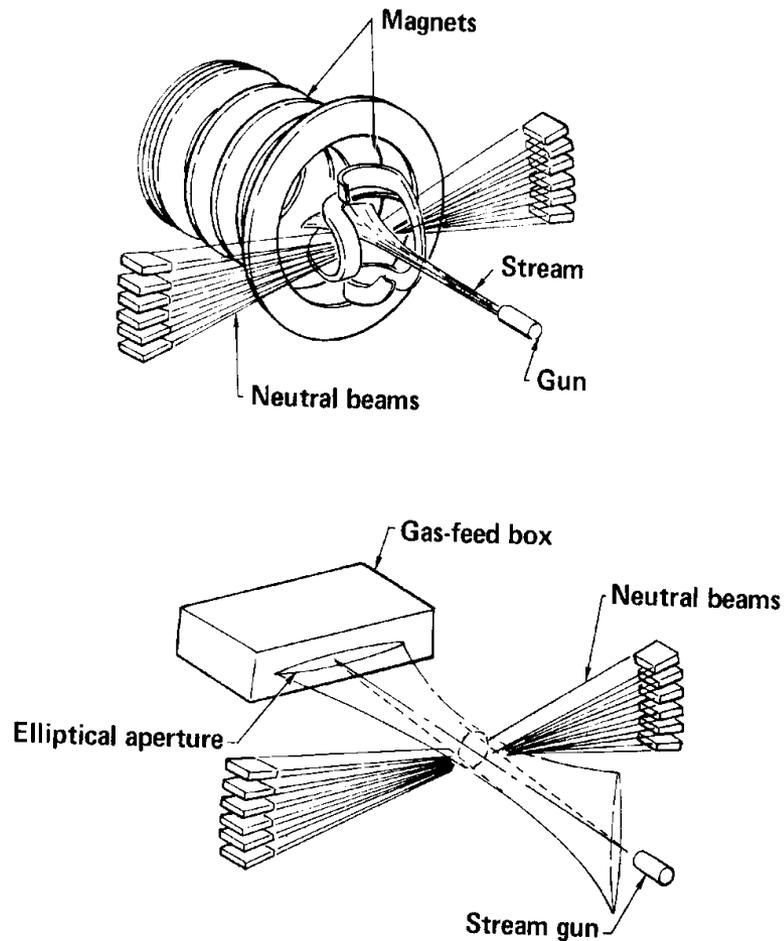
Стабилизация желобковых мод обратными связями— В.В.Арсенин, В.А.Чуянов, УФН, 123, вып.1, 83(1977)

Демонстрация удержания в пробкотроне 2XIIВ с  $m$ -В плазмы с  $T_i \approx 10$ кэВ,  $T_e = 260$ эВ и  $\beta \sim 1$ , F.H.Coensgen, et al, Proc. VI Int. Conference on Plasma Phys. And Contr. Nuclear Fusion Res., 1977, 3, 135

Многopробочная ловушка— Г.И.Будкер, В.В.Мирнов, Д.Д.Рютов, письма ЖЭТФ, 1971, 14, 320 / В.Г. Logan, А.Л. Lichtenberg, М.А. Lieberman, А. Makijani, *Phys. Rev. Lett.*, 28, 144 (1972).

Подавление дрейфово-конусной неустойчивости добавкой холодных Ионов—М.С.Иоффе, Кадомцев Б.Б. УФН, 100,601(1970)/Post R.F."Mirror confinement and its optimization", UCRL-70681,(1967)

# Эксперименты по подавлению кинетической неустойчивости (DCLC)



View of 2XIB experiment in LLNL

---

Амбиполярная ловушка – Димов Г.И., Закайдаков В.В., Кишиневский М.Е. Физика плазмы, 2, 597(1976); Fowler T K, Logan B G, Comm. Plasma Phys. Controlled Fusion, 2, 167(1977)

Термобарьеры в плазме – Baldwin D E, Logan B G, Phys. Rev. Lett. 43, 1318(1979)

Газодинамическая ловушка – Мирнов В.В., Рютов Д.Д. Письма в ЖТФ, 5, 678(1979)

Подавление электронного потока тепла расширением плазмы – Конкашбаев И.К., Ландман И.С., Улинич Ф.Р. ЖЭТФ 74, 956(1978)

Стабилизация МГД неустойчивости в осесимметричной ловушке средним  $m\text{-}n$  – Мирнов В.В., Рютов Д.Д. Письма ЖТФ, 5, 678(1979)

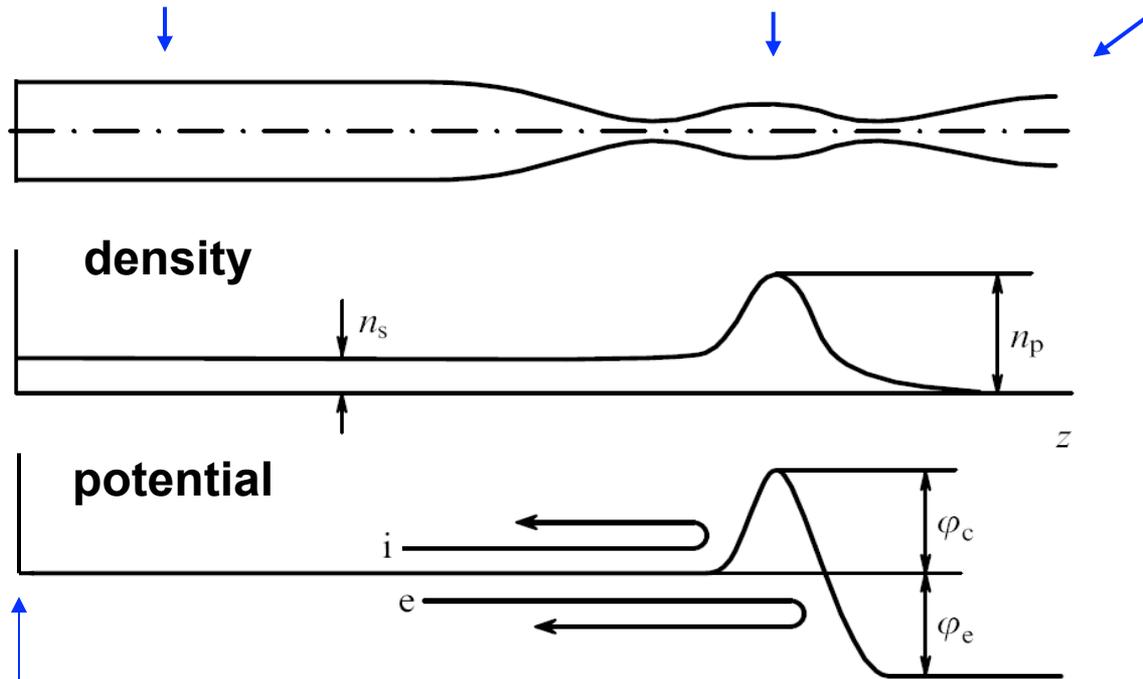
Подавление поперечного переноса в осесимметричной ловушке с помощью дифференциального вращения плазмы – Veklemishev A D, Phys. Plasmas, 22 103506(2015)

# Амбиполярная ловушка

Suppression of axial ion losses by peaks of ambipolar potential at the ends

Central solenoid

end plug plasma expander



G.Dimov, et al 1976

$$e\varphi_c = kT_e \ln \frac{n_p}{n_s}$$

$$e\varphi_c \geq kT_e$$

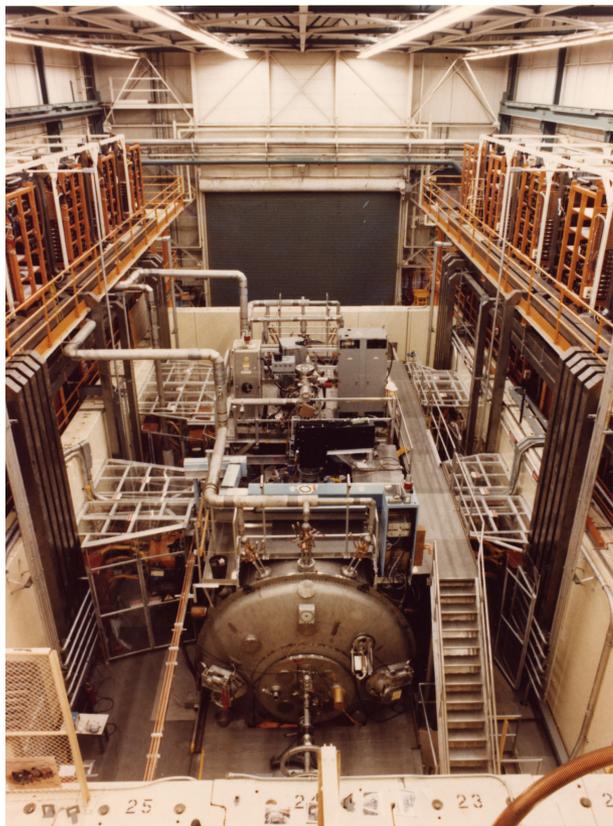
Pastuhov's formula – axial lifetime in the central solenoid

midplane

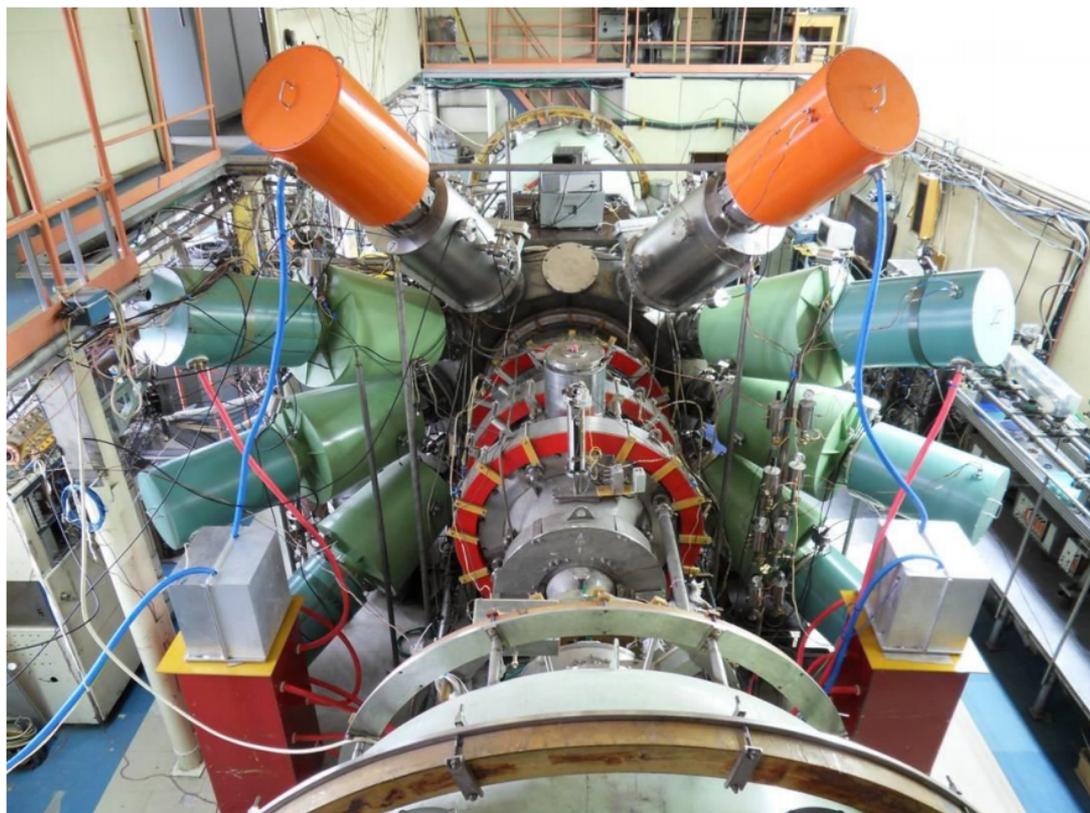
$$\tau_{\parallel} \sim \tau_i \frac{e\varphi_c}{kT_i} \exp \frac{e\varphi_c}{kT_i}$$

# Эксперименты на открытых ловушках с улучшенным удержанием

---

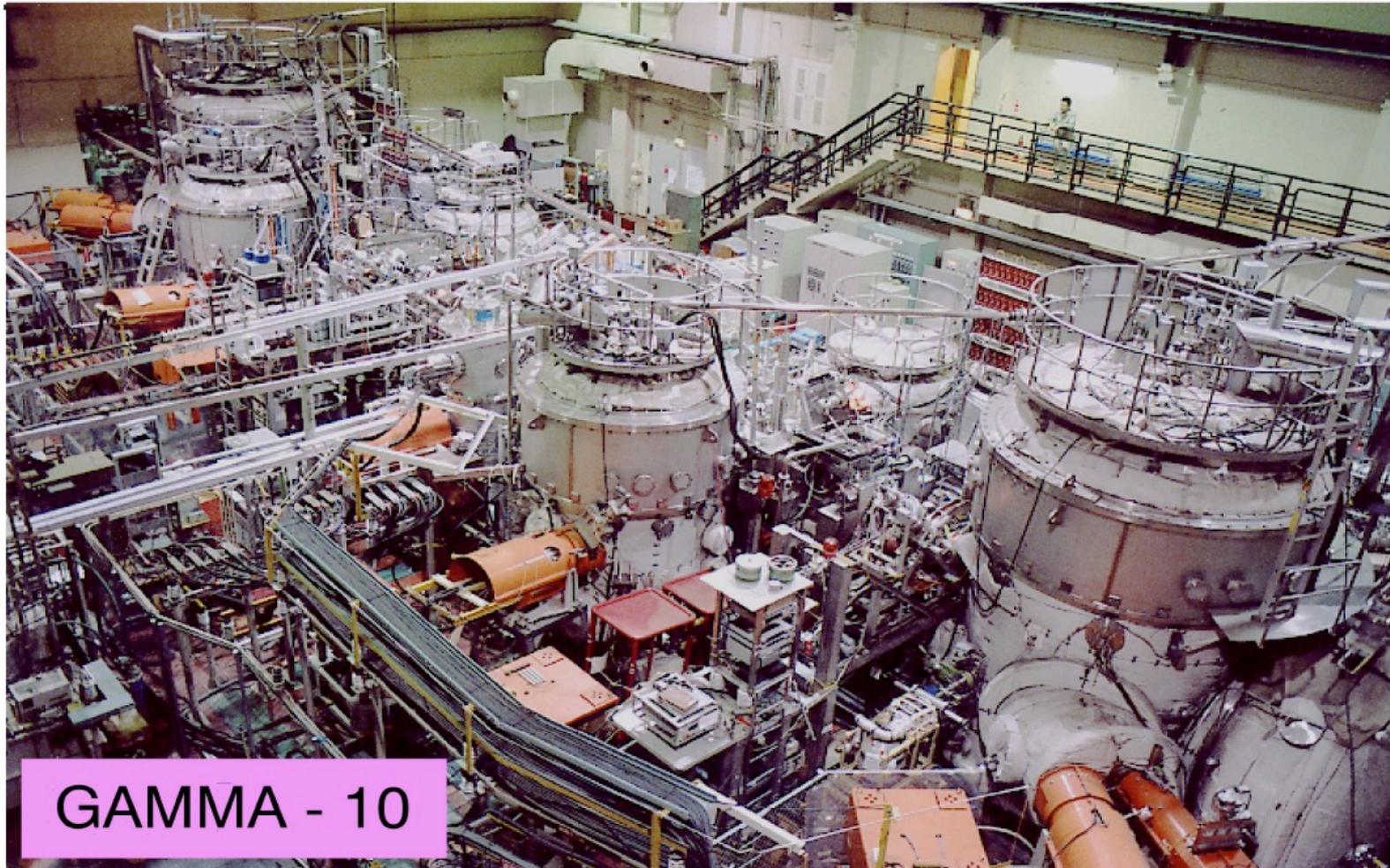


**Установка ТМХ-У, LLNL, 1987**



**Установка ГДЛ, ИЯФ, 1986**

# Амбиполярная ловушка GAMMA-10, Цукуба, Япония



# Эксперименты в ИЯФ - достижения

---

Стабилизация перестановочной неустойчивости средним  $mip$ -В в осесимметричной ловушке

Подавление продольного электронного потока тепла расширением плазмы за пробкой

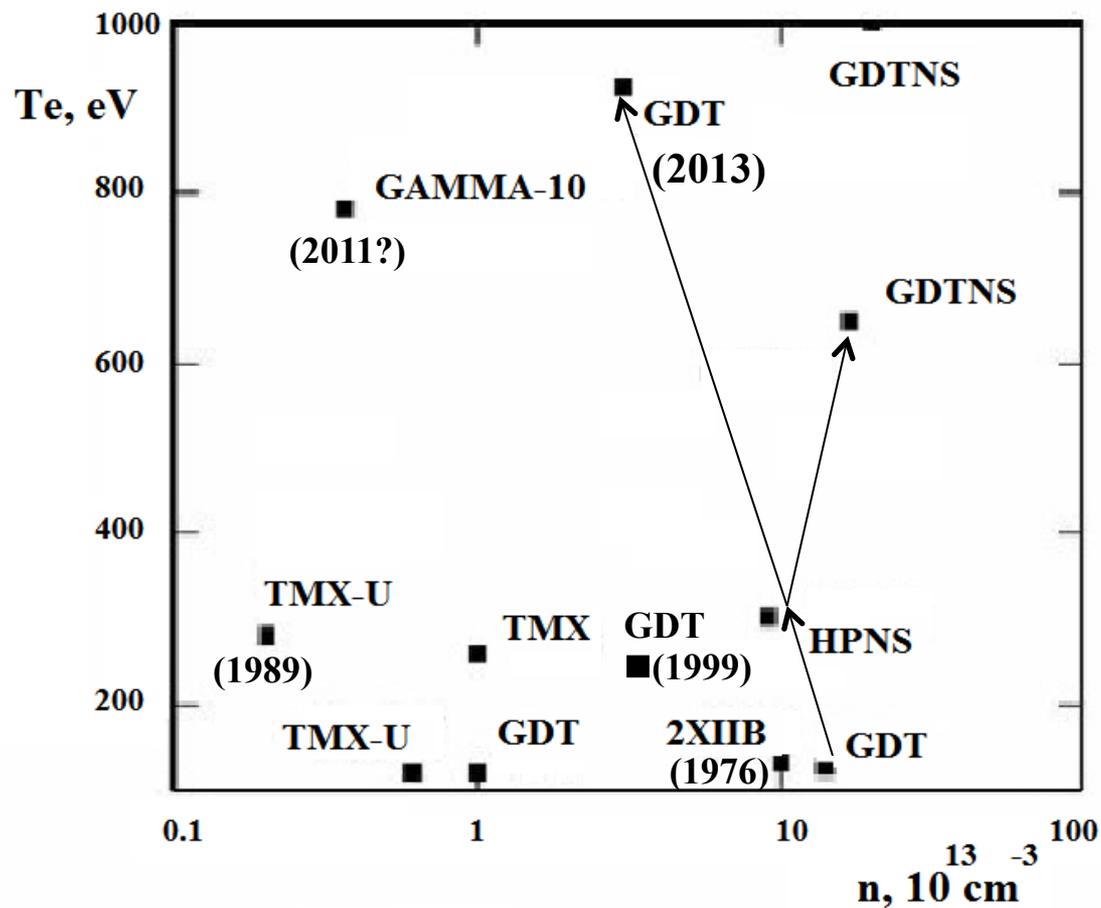
Удержание анизотропной ионно-горячей плазмы с давлением, близким к давлению магнитного поля

Подавление поперечного переноса контролируемым дифференциальным вращением плазмы

Подавление продольных потоков частиц многопробочным полем при относительно низкой плотности плазмы (ГОЛ-3)

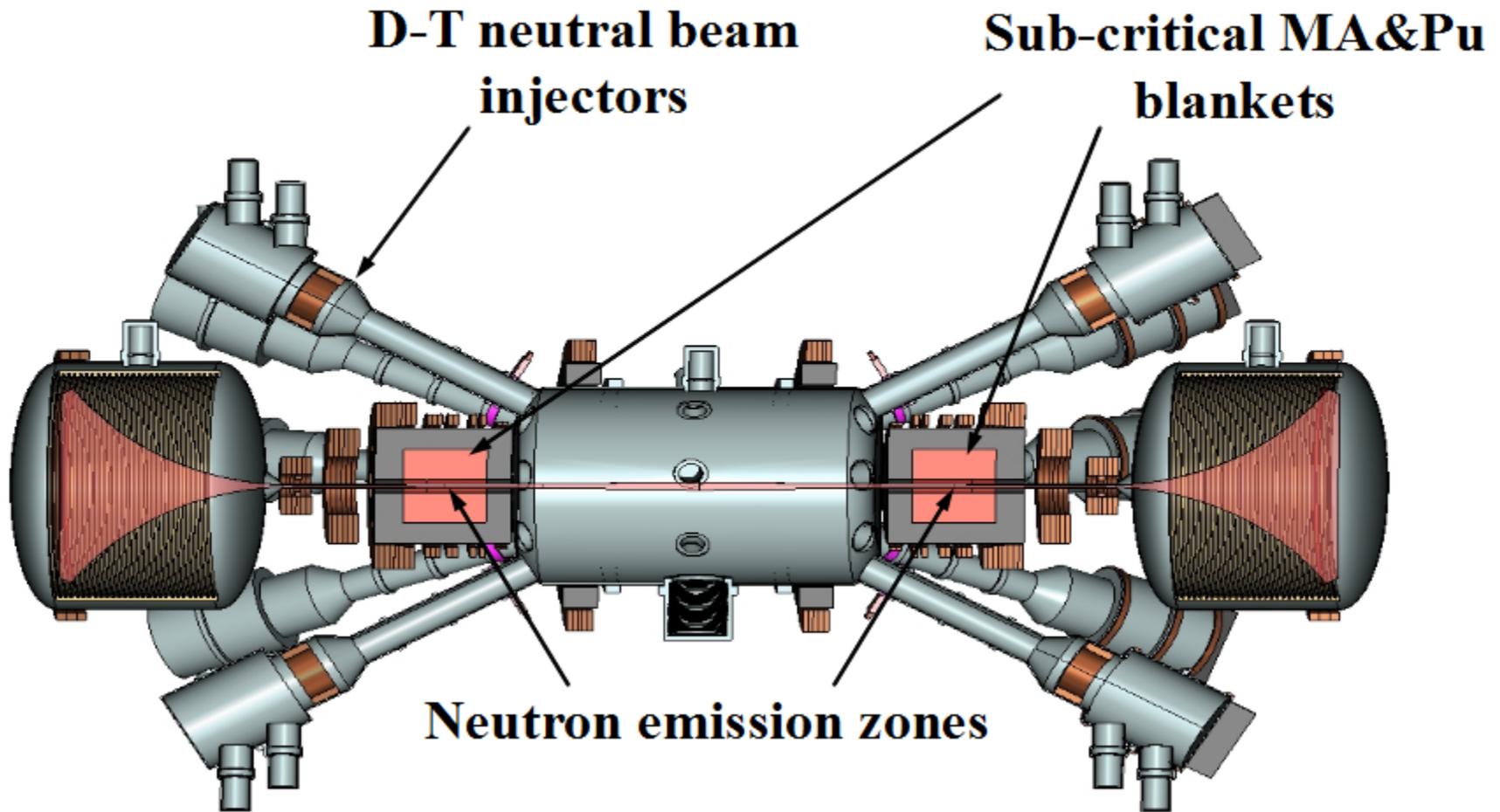
Получение электронно-горячей плазмы в пробкотроне при дополнительном СВЧ нагреве ( $\sim 1$ кэВ)

# Параметры плазмы в открытых ловушках



# GDT-based 14 MeV neutron source for materials testing

---



Neutron flux density in the testing zones scales as:

$$p \text{ [MW/m}^2\text{]} = 2.5 \cdot T_e \text{ [keV]}$$

# Установка ГДМЛ -переход к стационарному удержанию плазмы

## Модульная конструкция из крупных блоков

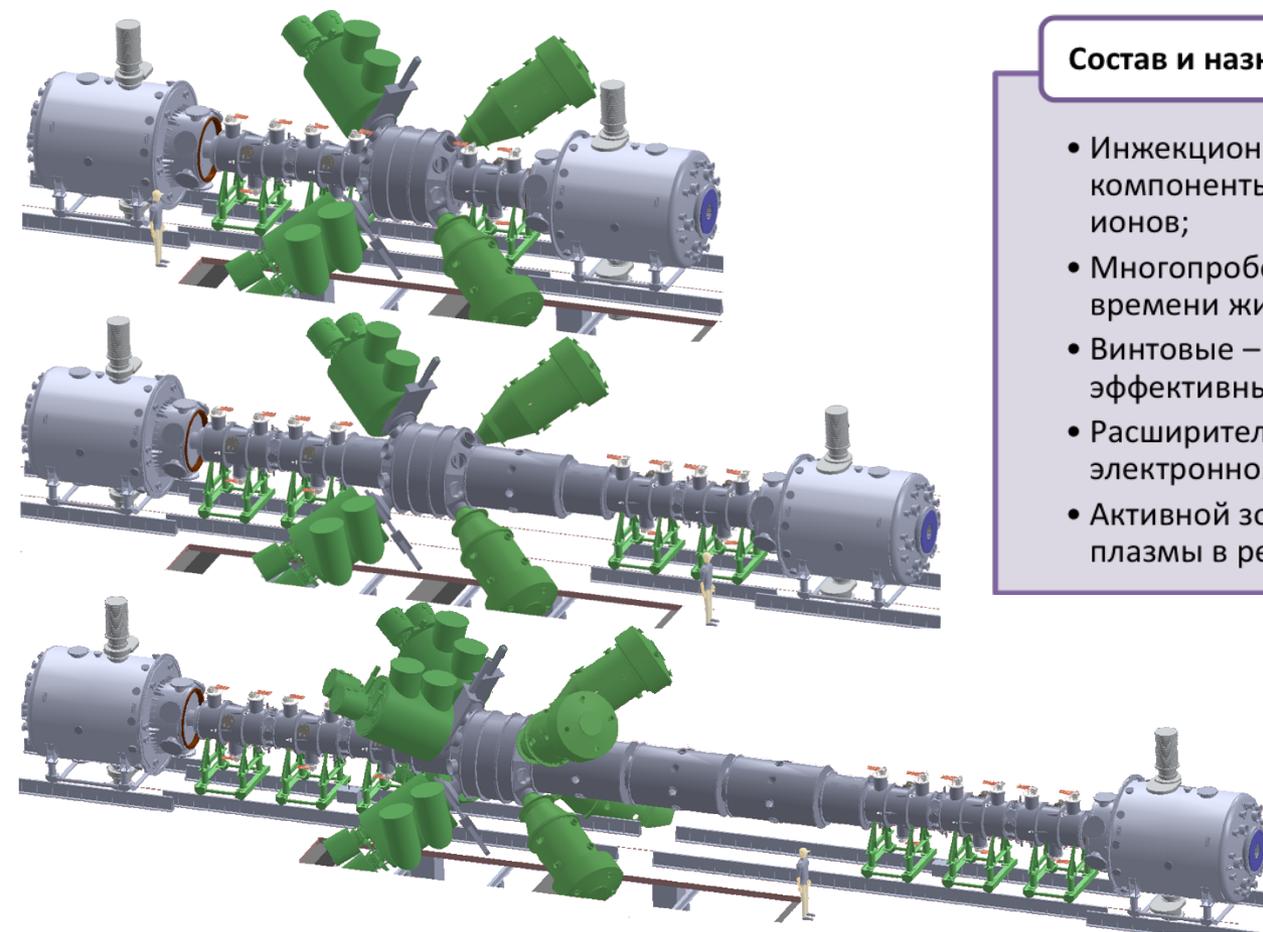
- придаёт гибкость и надёжность системе;
- позволяет решать задачи с разными составом и конфигурацией установки.

## Состав и назначение модулей

- Инжекционные – для нагрева ионной компоненты плазмы и создания плещущихся ионов;
- Многопробочные – для повышения продольного времени жизни частиц в плазме;
- Винтовые – новый, потенциально более эффективный вариант многопробочных;
- Расширители – для термоизоляции по электронному каналу;
- Активной зоны – для накопления горячей плазмы в режиме диамагнитного удержания.

## Параметры

- Длина – до 30 м;
- Сверхпроводящая магнитная система, на поле от 3 -13Тл;
- Мощность до 30МВт в импульсах 1с и более.



# Роль альтернативных систем, в частности открытых ловушек

---

- Развитие реакторных концепций альтернативных токамаку (advanced fuels, ...);  $\beta \approx 1$  экспериментально продемонстрировано
- Развитие физики горячей плазмы. Исследование общих фундаментальных физических явлений (тиринг моды в ГОЛ-3, транспортные барьеры в Гамма-10; ГДЛ, стабилизация МГД мод, ...)
- Источники термоядерных нейтронов (и установки для испытания материалов под воздействием мощных потоков плазмы)
- Плазменные двигатели
- Развитие технологических систем реактора

# В заключение: народная мудрость в УТС

---

- Л.А.Арцимович: Вряд ли есть какие-либо сомнения в том, что в конечном счете проблема управляемого синтеза будет решена. Природа может расположить на пути решения этой проблемы лишь ограниченное число трудностей, и после того, как человеку, благодаря непрерывному проявлению творческой активности, удастся их преодолеть, она уже не в состоянии будет изобрести новые. Неизвестно лишь, насколько затянется этот процесс...
- Л.А. Арцимович: Еще в 1958 г. на II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве, казалось, что до осуществления термоядерного синтеза рукой подать – нужно пройти небольшой путь между двумя точками; потом оказалось, что надо не пройти, а проехать на велосипеде; потом – что проехать на велосипеде, но по канату; потом оказалось, что велосипед одноколесный; потом – что ехать нужно с завязанными глазами; и наконец – что ехать необходимо задом наперед.
- Г.И.Будкер: Мне кажется, что успехи, достигнутые за прошедший период (до 1968 г) физиками в данной области, заставляют нас вернуться к идее создания термоядерного реактора. ... Это не означает, что мы не должны приостановить работу по физике плазмы. Наоборот, работы по ядерной физике только тогда получили бурное развитие, когда заработал первый ядерный реактор.

**Спасибо за внимание!**