



**ФИЗИКА ПЛАЗМЫ  
И  
УПРАВЛЯЕМЫЕ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ**

**Чирков Алексей Юрьевич**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Теплофизика» Э-6*

# Московский государственный Технический университет имени Н.Э. Баумана



## Факультеты (научно-учебные комплексы)

Фундаментальные науки

Машиностроительные технологии

Специальное машиностроение

Энергомашиностроение

Робототехника и комплексная автоматизация

Информатика и системы управления

Радиоэлектроника, лазерная и медицинская техника

Инженерный бизнес и менеджмент

# 1. ЧТО ТАКОЕ ПЛАЗМА?

**Плазма** – частично или полностью ионизированный газ, содержащий положительные и отрицательные заряженные частицы в таких пропорциях, что суммарный электрический заряд равен нулю

$$p_{\text{пл}} = n_i kT_i + n_e kT_e (+ n_0 kT_0)$$

Энергия ионизации  $E_{\text{ион}}$  – энергия, необходимая для отделения электрона от ядра

Для атома водорода  $E_{\text{ион}} = 13,6$  эВ

**Электронвольт (эВ)** – единица измерения энергетических величин в ядерной физике и физике плазмы

Электрический потенциал  $\phi$ : 1 эВ – 1 В

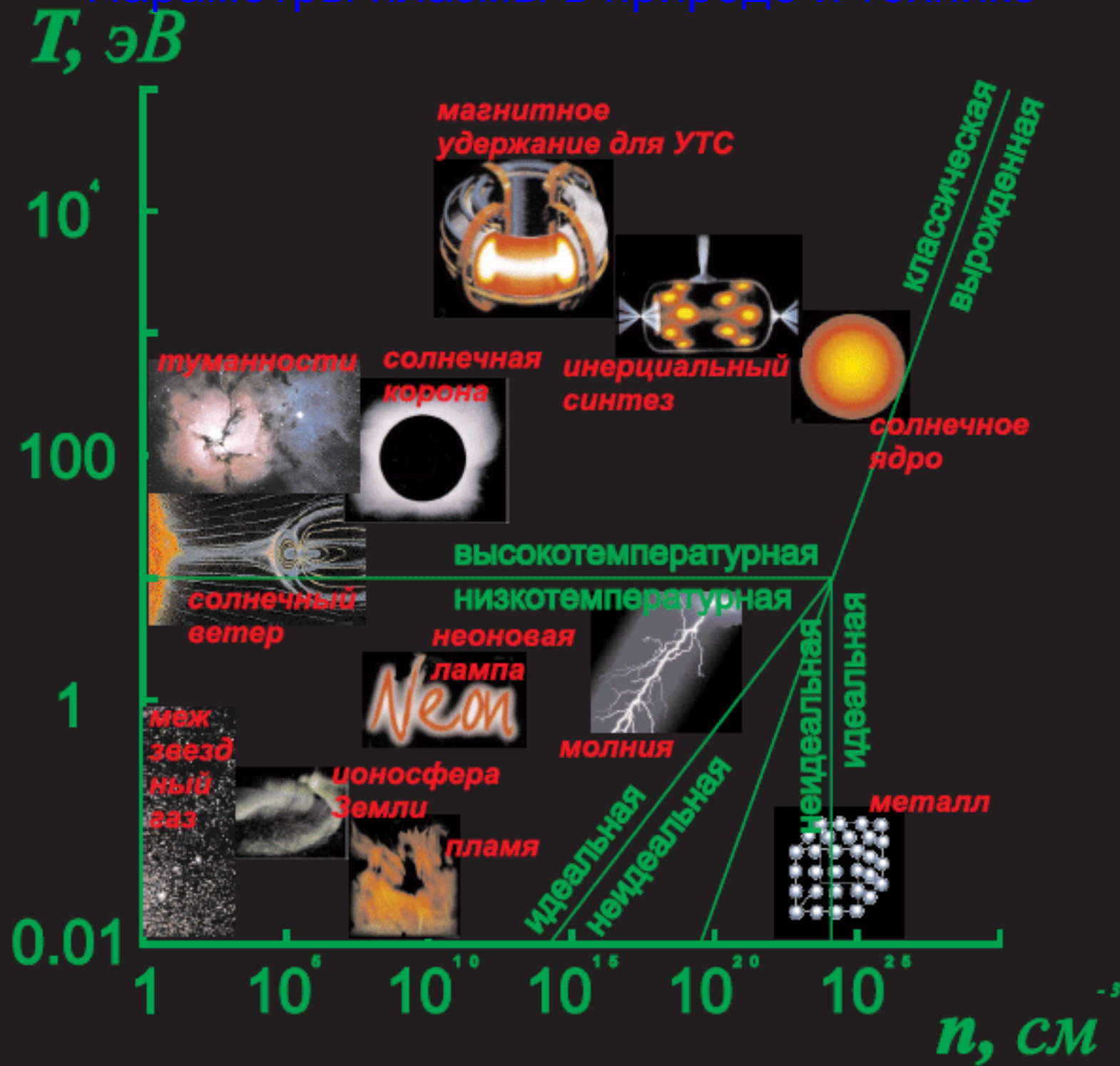
Энергия  $E$ : 1 эВ –  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж

Температура  $T$ : 1 эВ – 11600 К

Сильная ионизация при  $T \approx 10$  эВ  $\approx 100\,000$  К

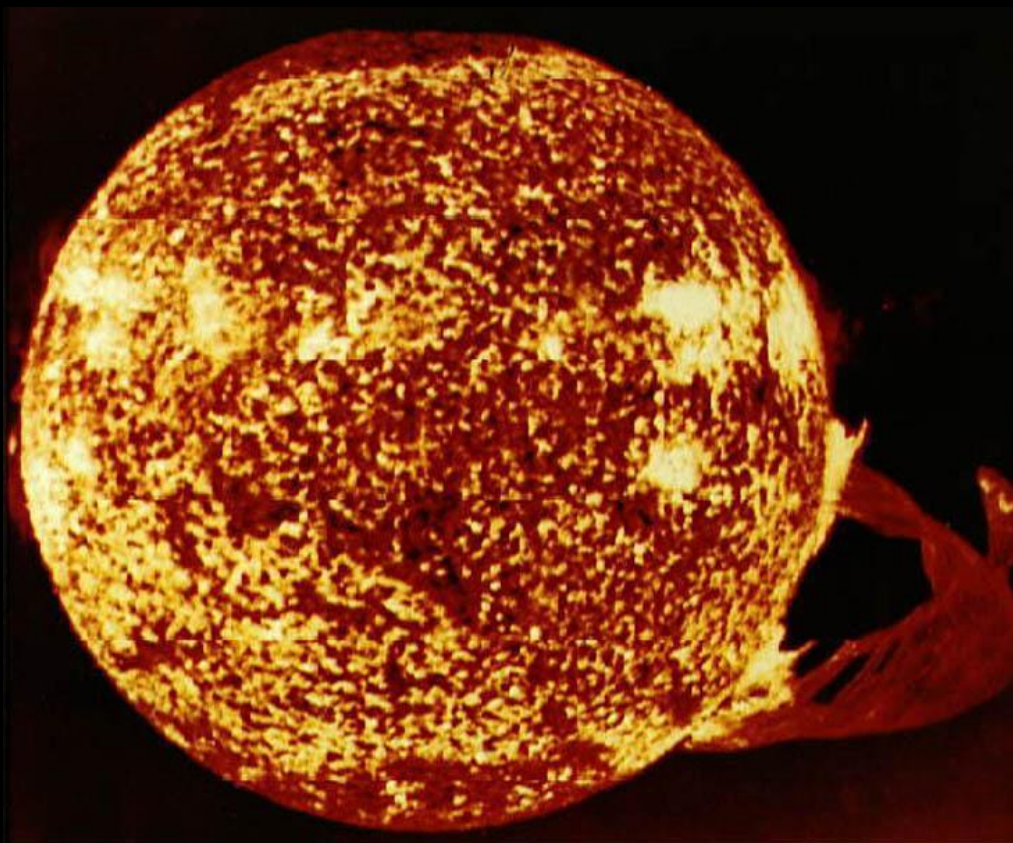
Для термоядерного синтеза  $T > 10$  кэВ  $\approx 100$  млн. К

# Параметры плазмы в природе и технике



## 2. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В ДЕЙСТВИИ

Солнце



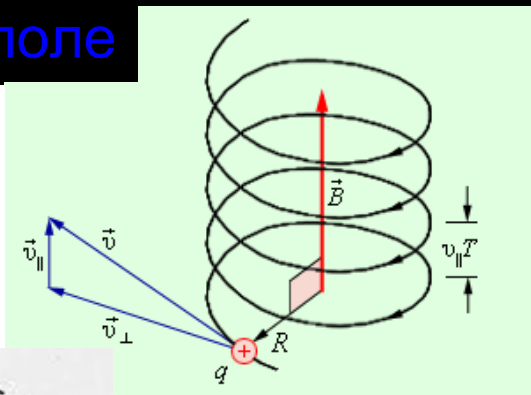
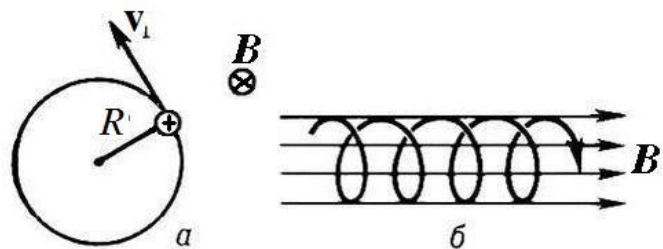
Термоядерный взрыв



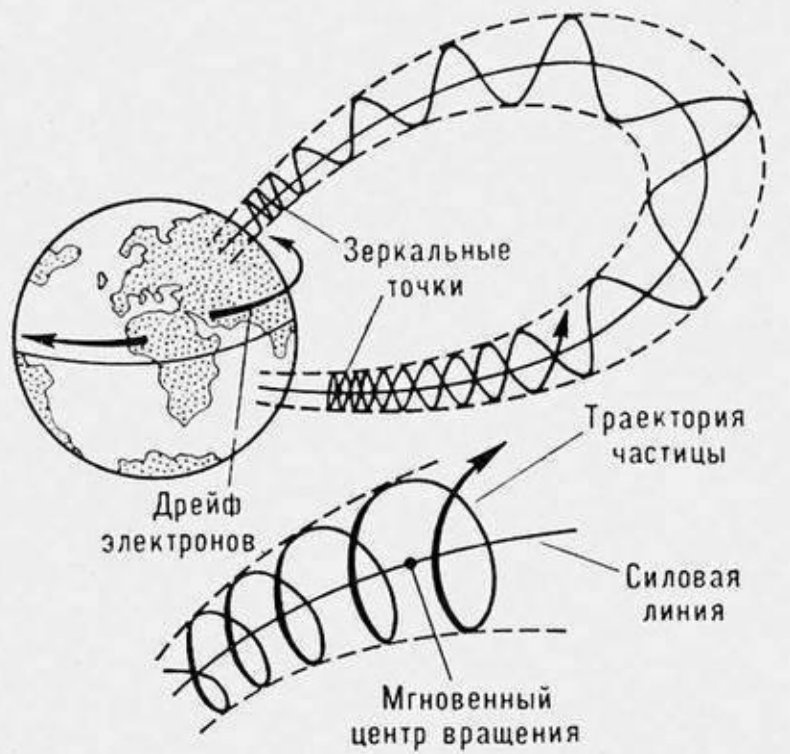
# 3. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В ЛАБОРАТОРИИ

## 3.1. Магнитное удержание

### Частицы в магнитном поле



### Плазма в магнитном поле



### Давление плазмы

$$p_{пл} = n_i k T_i + n_e k T_e$$

### Давление магнитного поля (магнитное давление)

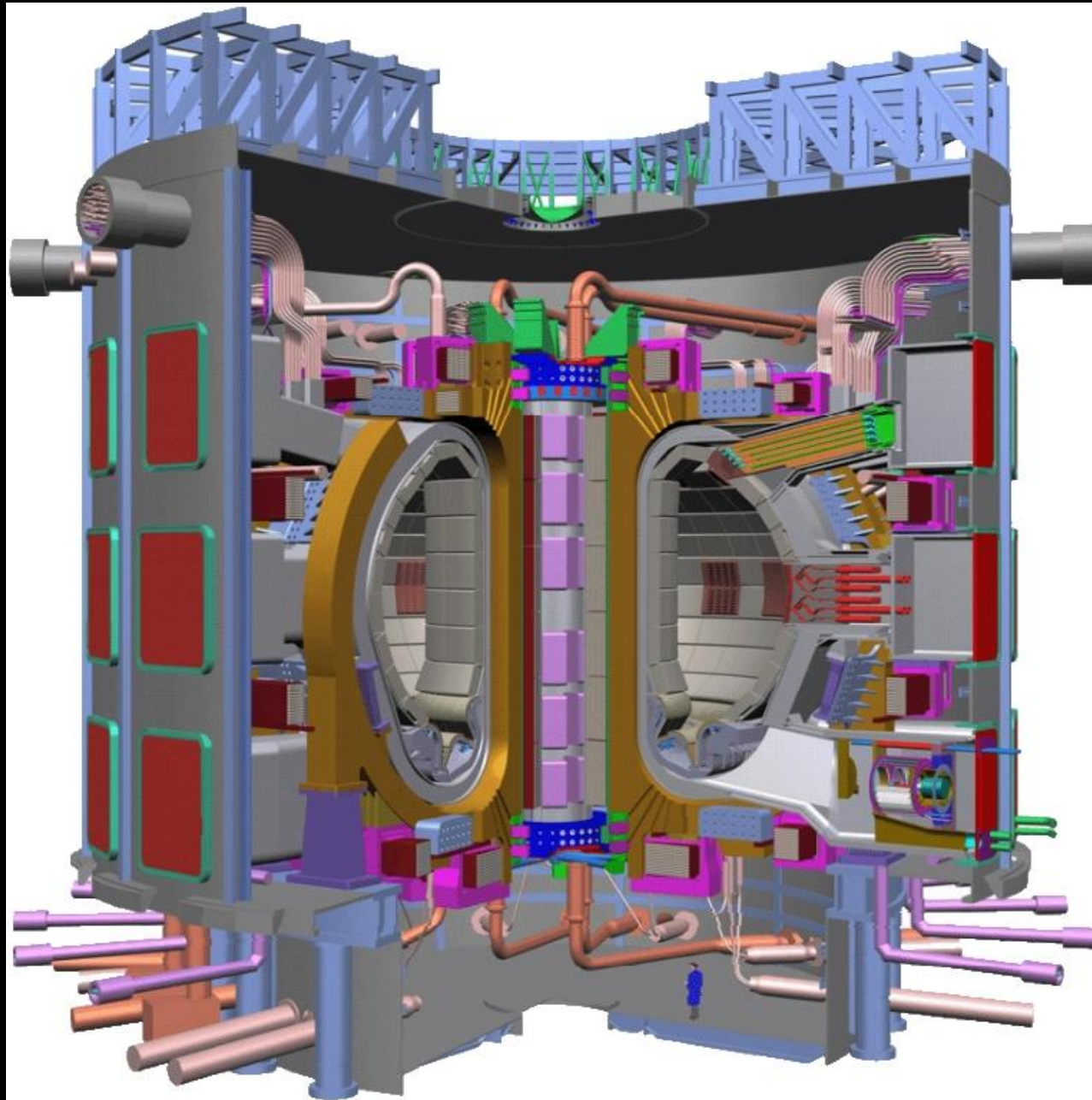
$$p_M = \frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

### Параметр бета

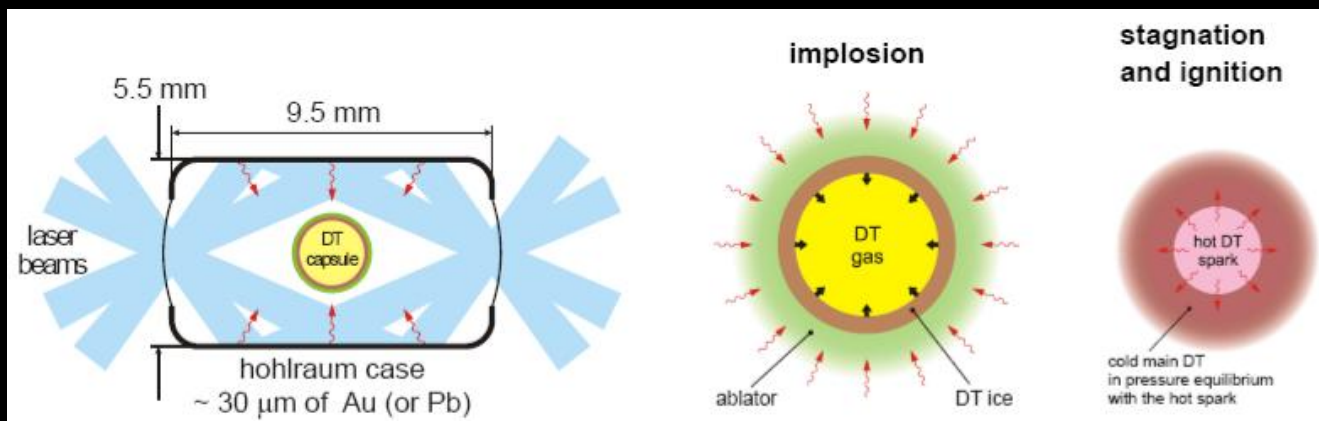
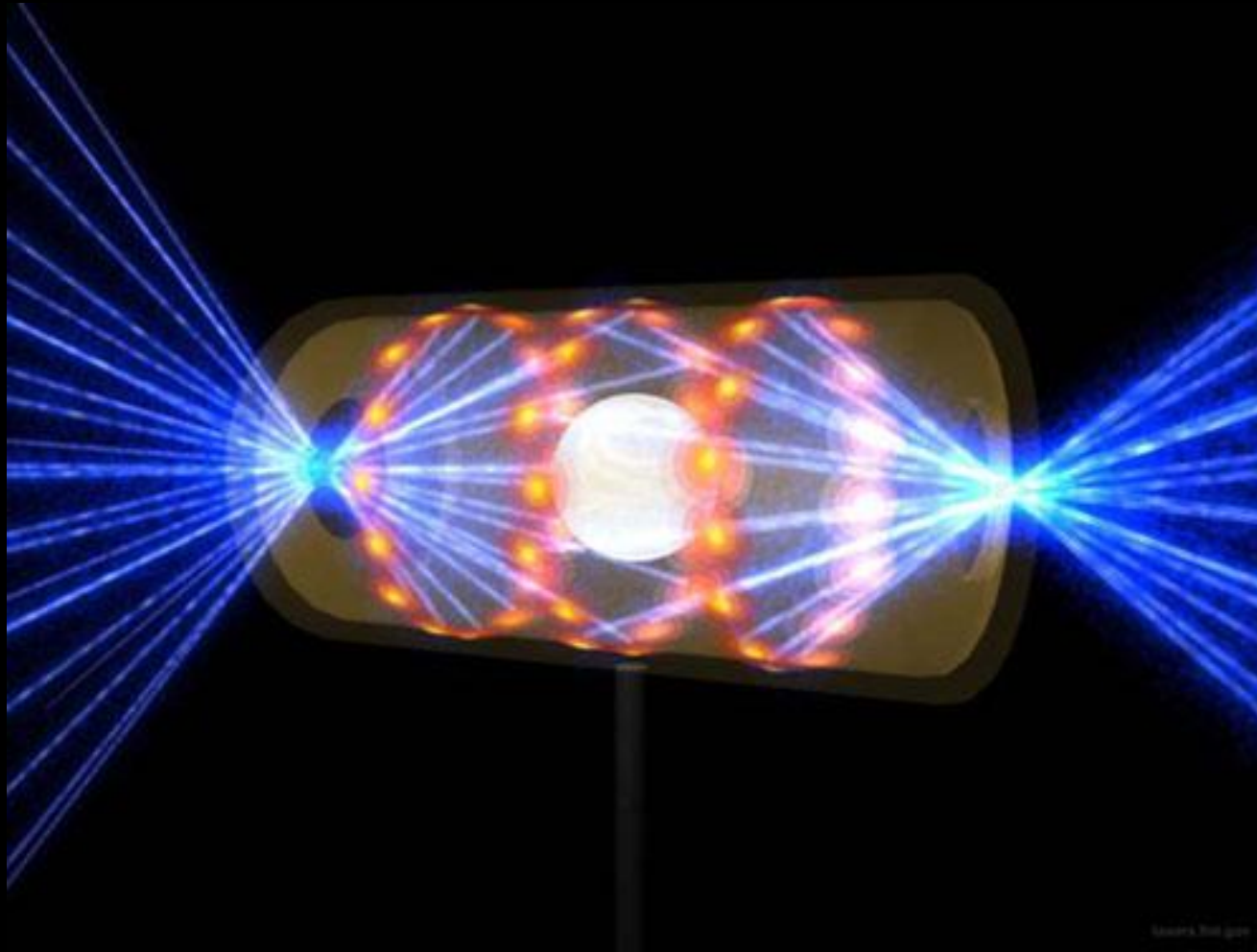
$$\beta = \frac{p_{пл}}{p_M} \leq 1$$

# ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

$$\beta \approx 0.1$$



## 3.2. Инерциальный синтез



# NIF (National Ignition Facility)



# 4. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Таблица 1. Термоядерные реакции, заслуживающие внимания

<i>Реакция</i>	<i>Обеспеченность топливом</i>	<i>Преимущества</i>	<i>Наиболее серьезные недостатки</i>
1) $D + T \rightarrow n (14.1 \text{ МэВ}) + {}^4\text{He} (3.5\text{МэВ})$	Требуется наработка трития	Наиболее легкие условия	Высокая радиоактивность
2) $D + {}^3\text{He} \rightarrow p (14.68 \text{ МэВ}) + {}^4\text{He} (3.67\text{МэВ})$	Изотоп ${}^3\text{He}$ отсутствует на Земле, возможна доставка его с Луны	Низкая радиоактивность	Низкая скорость
3) $D + D \rightarrow n (2.45 \text{ МэВ}) + {}^3\text{He} (0.817 \text{ МэВ})$ 4) $D + D \rightarrow p (3.02 \text{ МэВ}) + T (1.01 \text{ МэВ})$	Запасы дейтерия практически неограниченны	Возможность наработки трития и ${}^3\text{He}$	Низкая скорость
5) $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + 8.681 \text{ МэВ}$	Значительные запасы водорода и изотопа ${}^{11}\text{B}$	Радиоактивность практически отсутствует	Очень низкая скорость

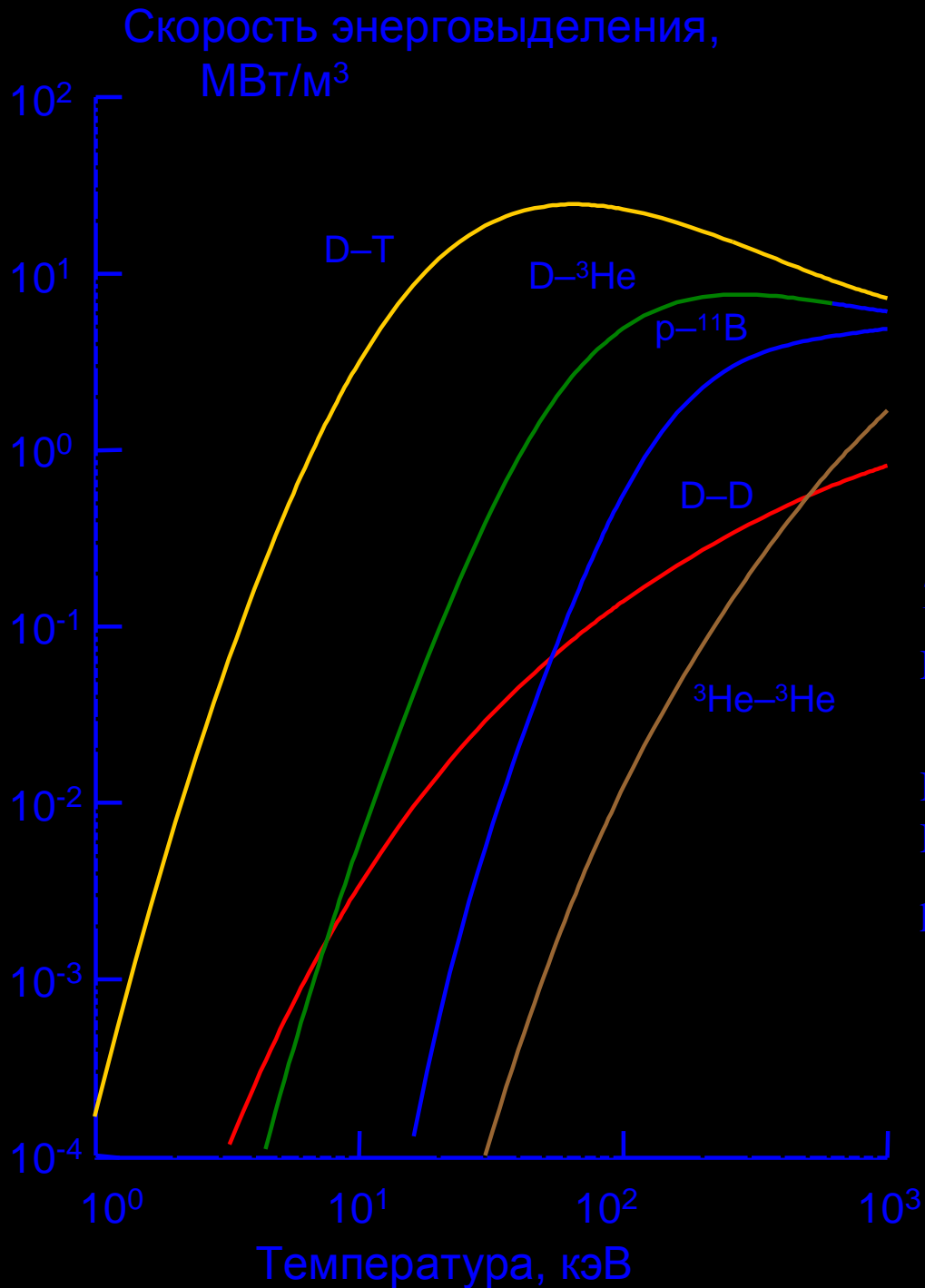


Таблица 2. Минимальные требования к параметрам плазмы и магнитной ловушки

Топливо	Температура	Параметр бета
D-T	$T_i \approx T_e \approx$ 10 – 15 кэВ	$\beta = 0,03 - 0,1$
D- <sup>3</sup> He, D-D	$T_i \approx T_e \approx$ 40 – 80 кэВ	$\beta > 0,5$
p- <sup>11</sup> B	$T_i \approx$ 150 – 200 кэВ $T_e < T_i$	$\beta \approx 1$

# 5. МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ

## 5.1. Системы для D–T-синтеза

Токамак = ТОроидальная КАмера МАгнитные Катушки  
 $\beta \approx 0,1$

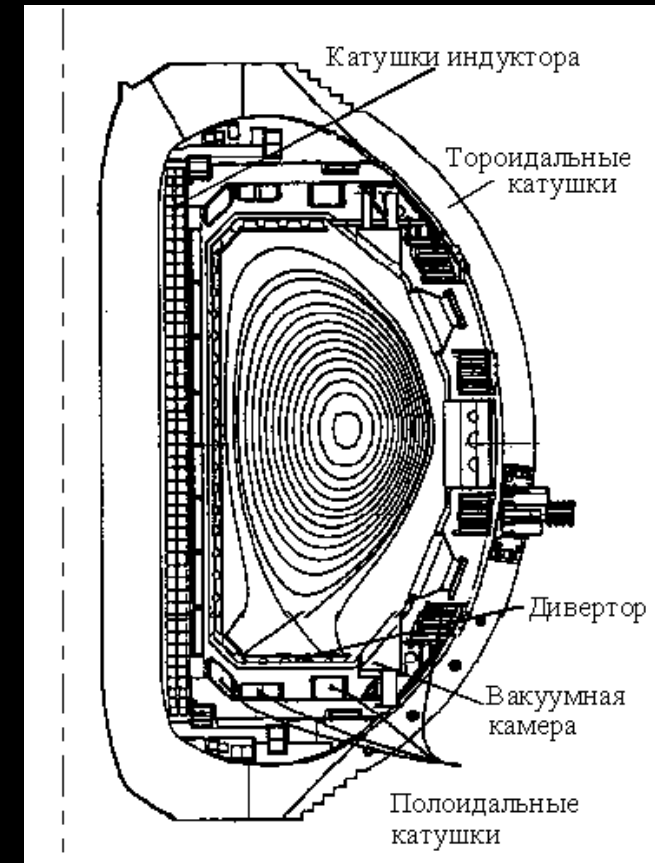
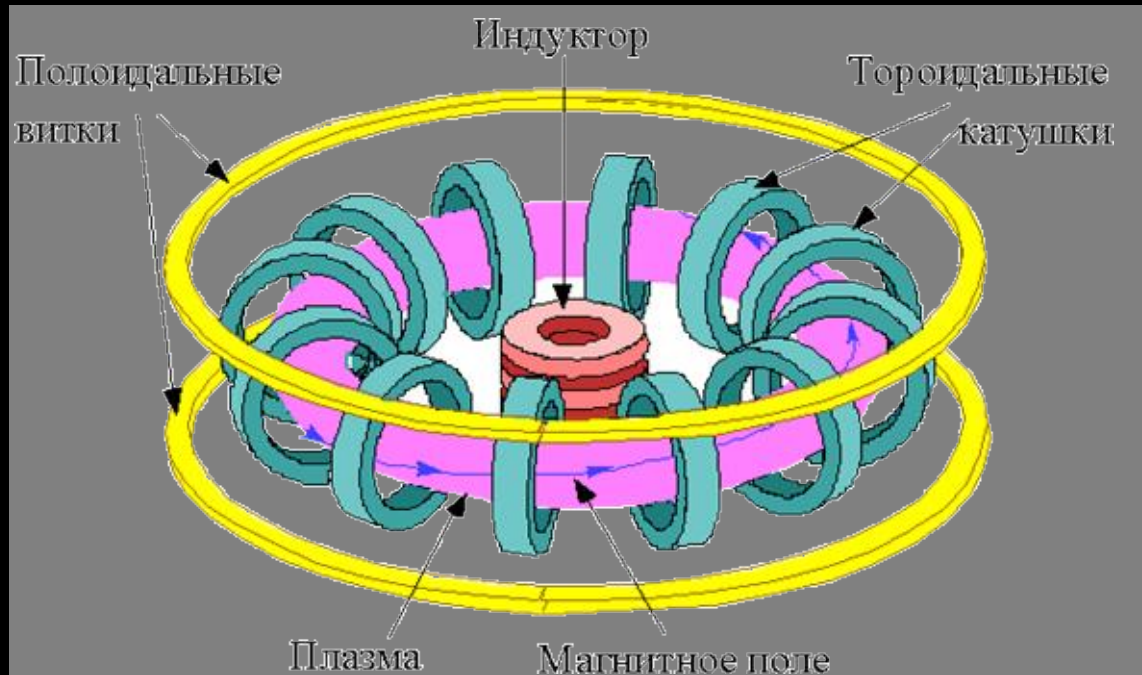


Рис. 5.1. Схема и поперечное сечение магнитной системы токамака

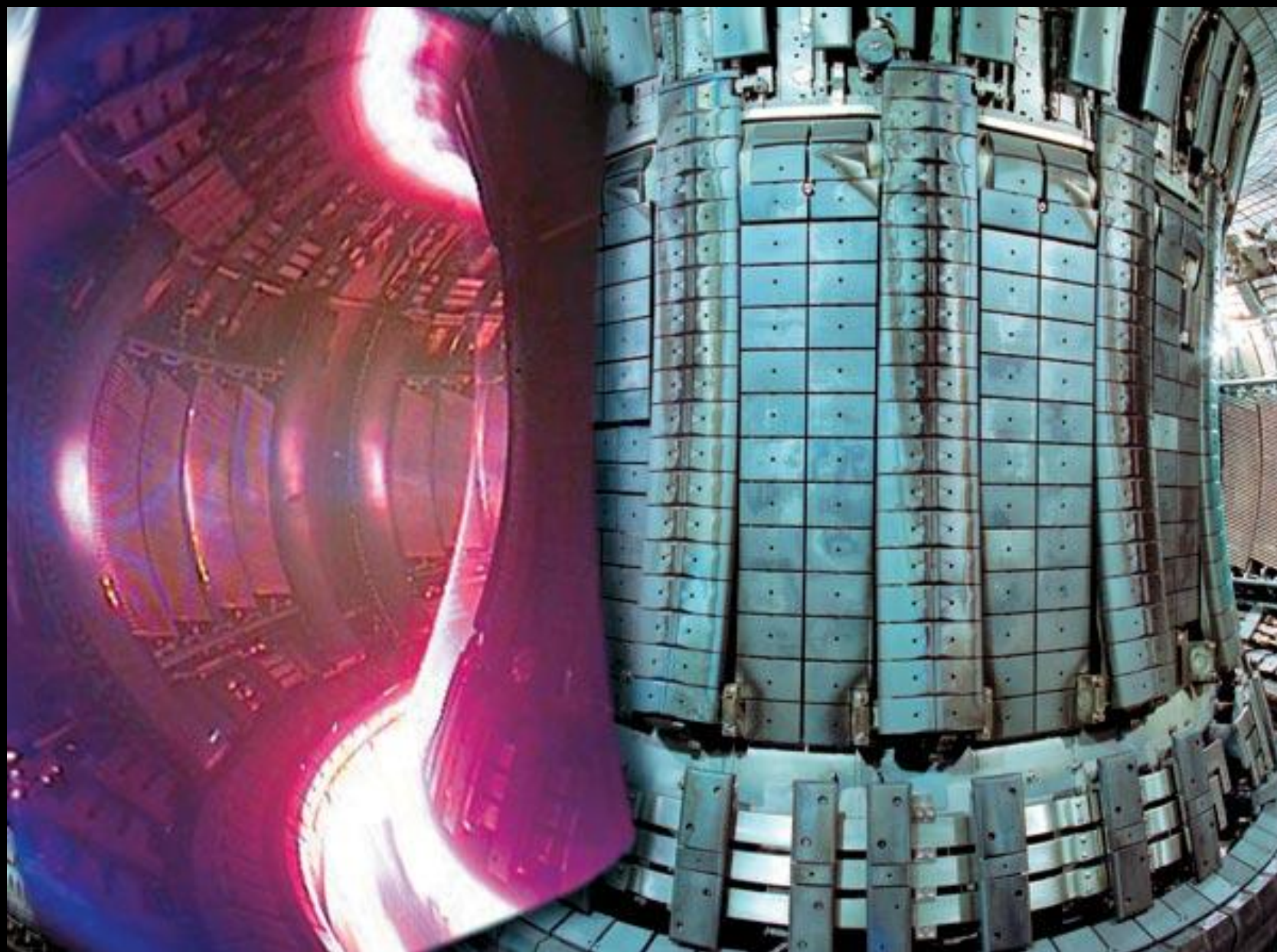


Рис. 5.2. Токамак JET: вид изнутри

Стелларатор  
 $\beta \approx 0,05$

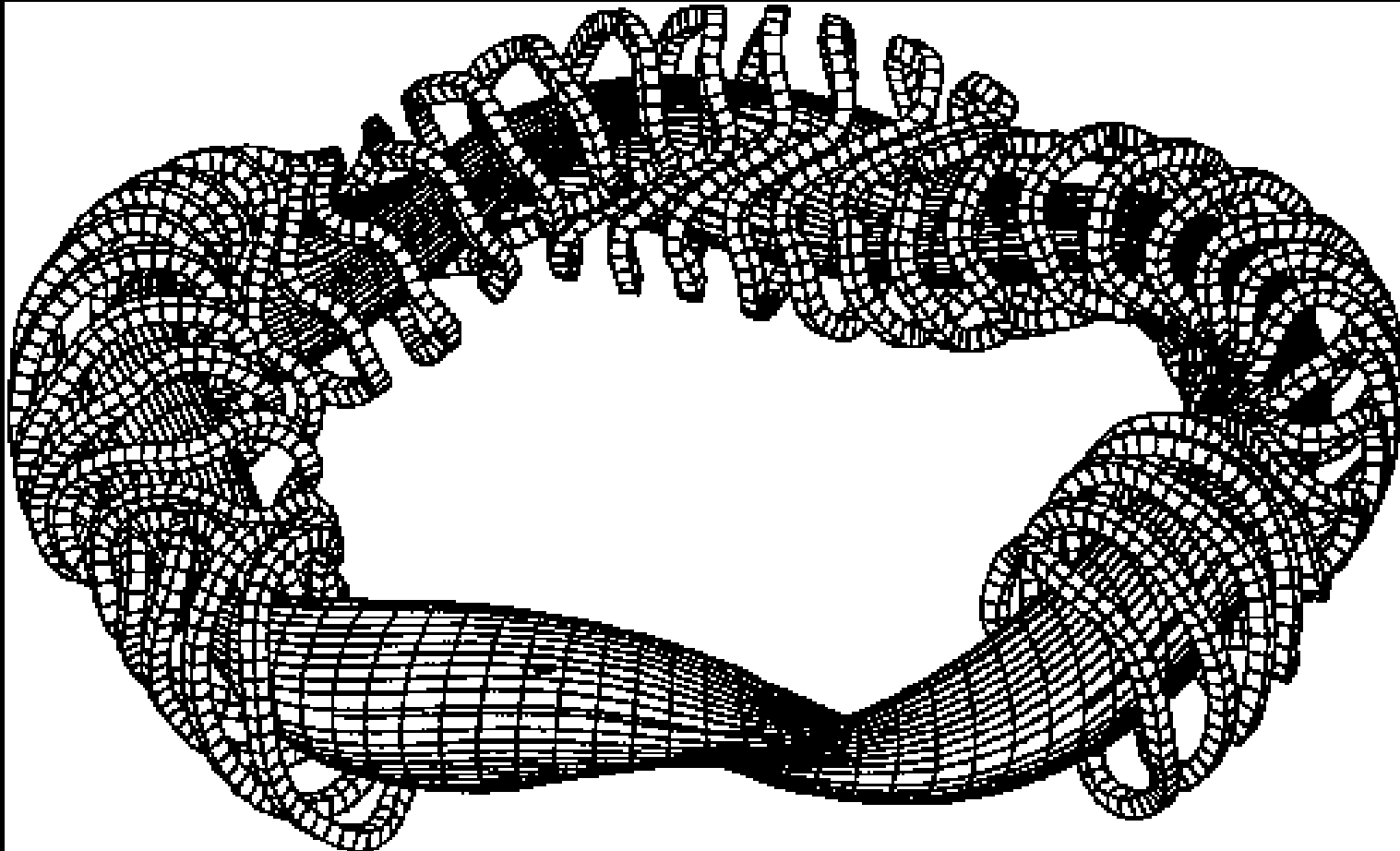


Рис. 5.5. Форма плазмы и магнитных катушек в стеллараторе

## 5.2. Сферический токамак ( $\beta \approx 0,4-0,6$ )

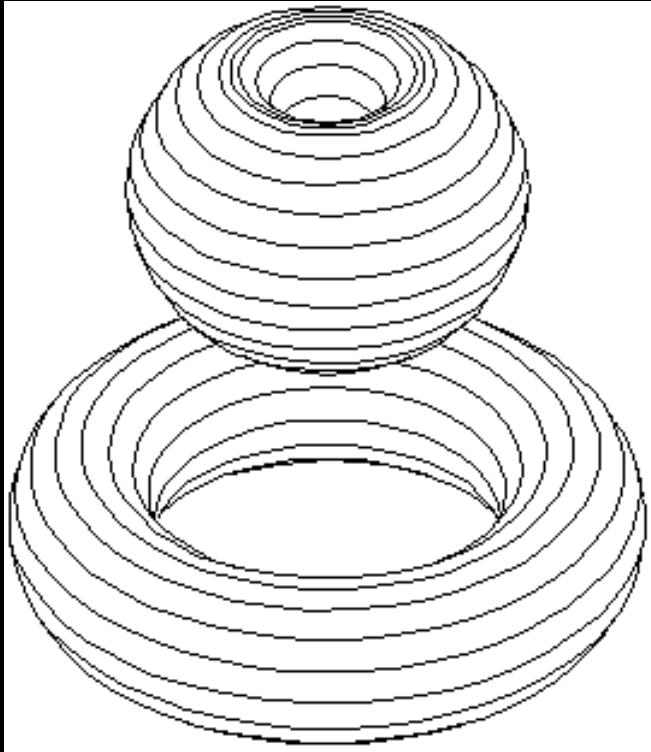


Рис. 5.3. Торoidalные магнитные поверхности в «обычном» (внизу) и сферическом (вверху) токамаках

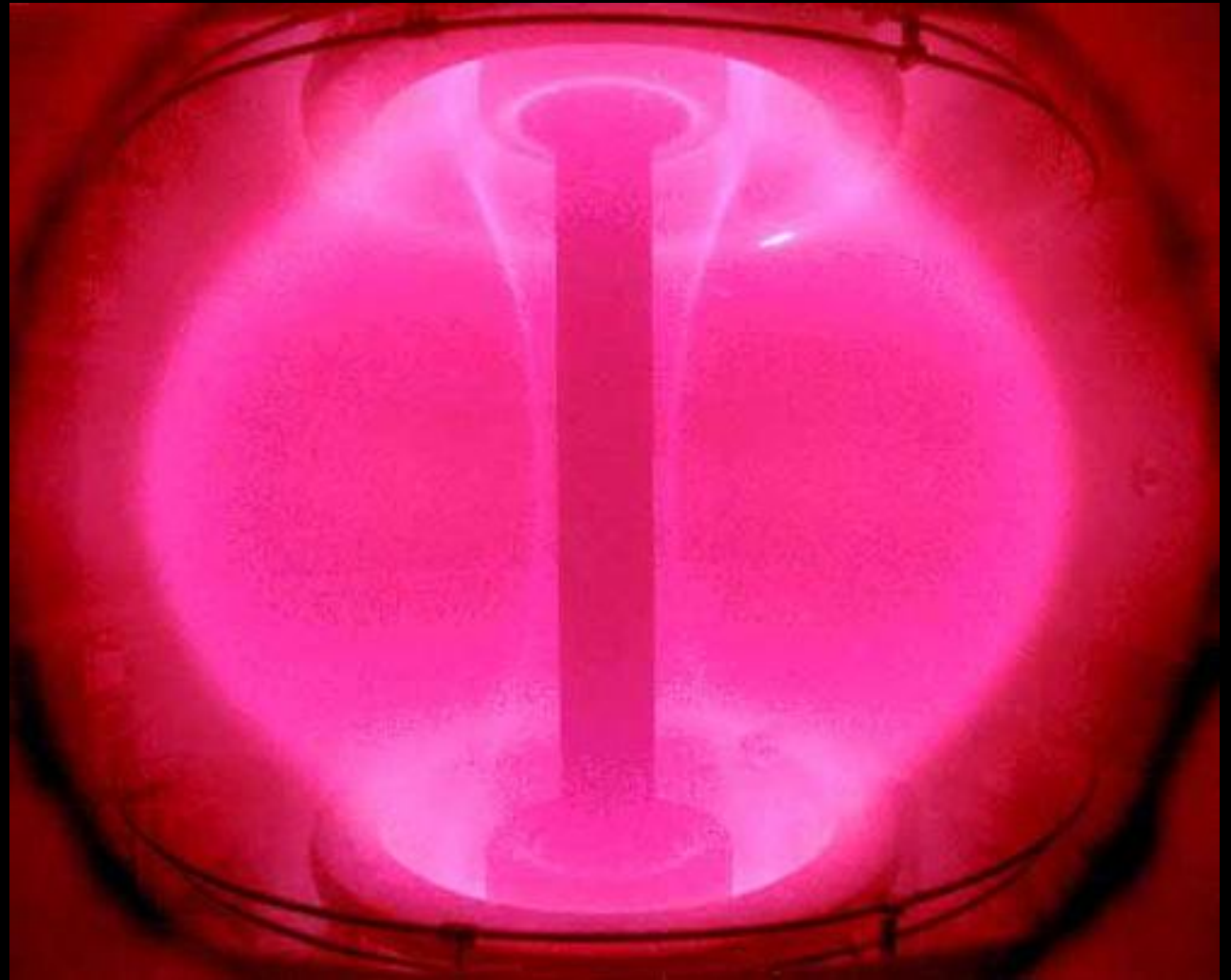


Рис. 5.4. Плазма в сферическом токамаке

## 5.3. Альтернативные системы с $\beta \approx 1$

Обращенная магнитная конфигурация (FRC = Field Reversed Configuration)

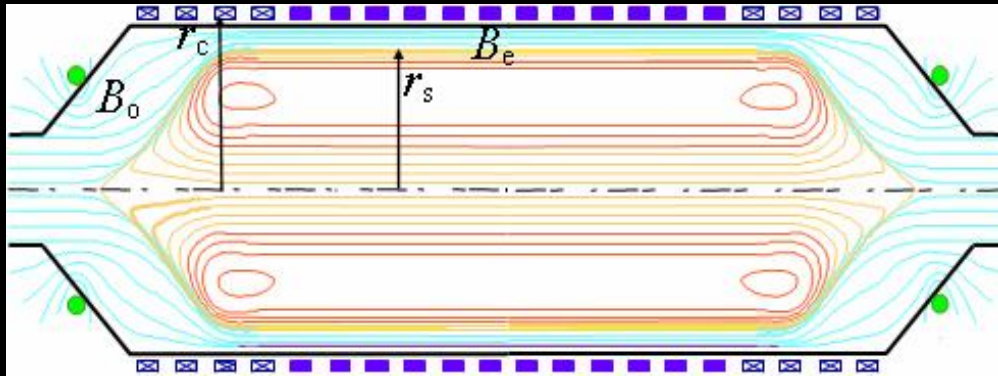


Рис. 5.5. Магнитные силовые линии в FRC (расчет)

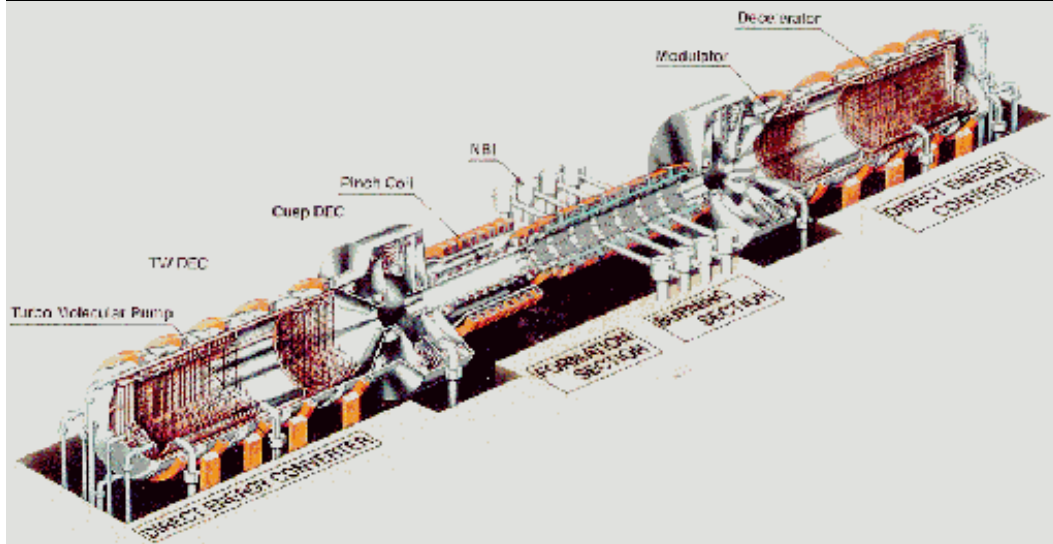


Рис. 5.7. Общий вид термоядерного реактора на основе FRC с системами прямого преобразования энергии (концептуальный проект ARTEMIS)



Рис. 5.6. Плазма в установке FRC с кварцевой камерой

## Магнитный диполь с левитирующим проводником

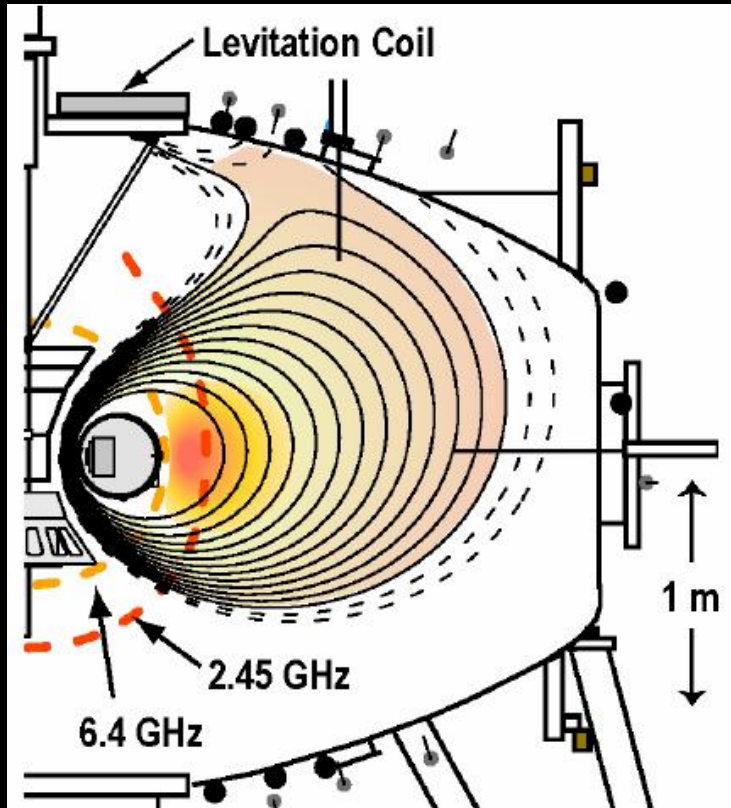


Рис. 5.9 Схема установки LDX (Levitated Dipole Experiment)

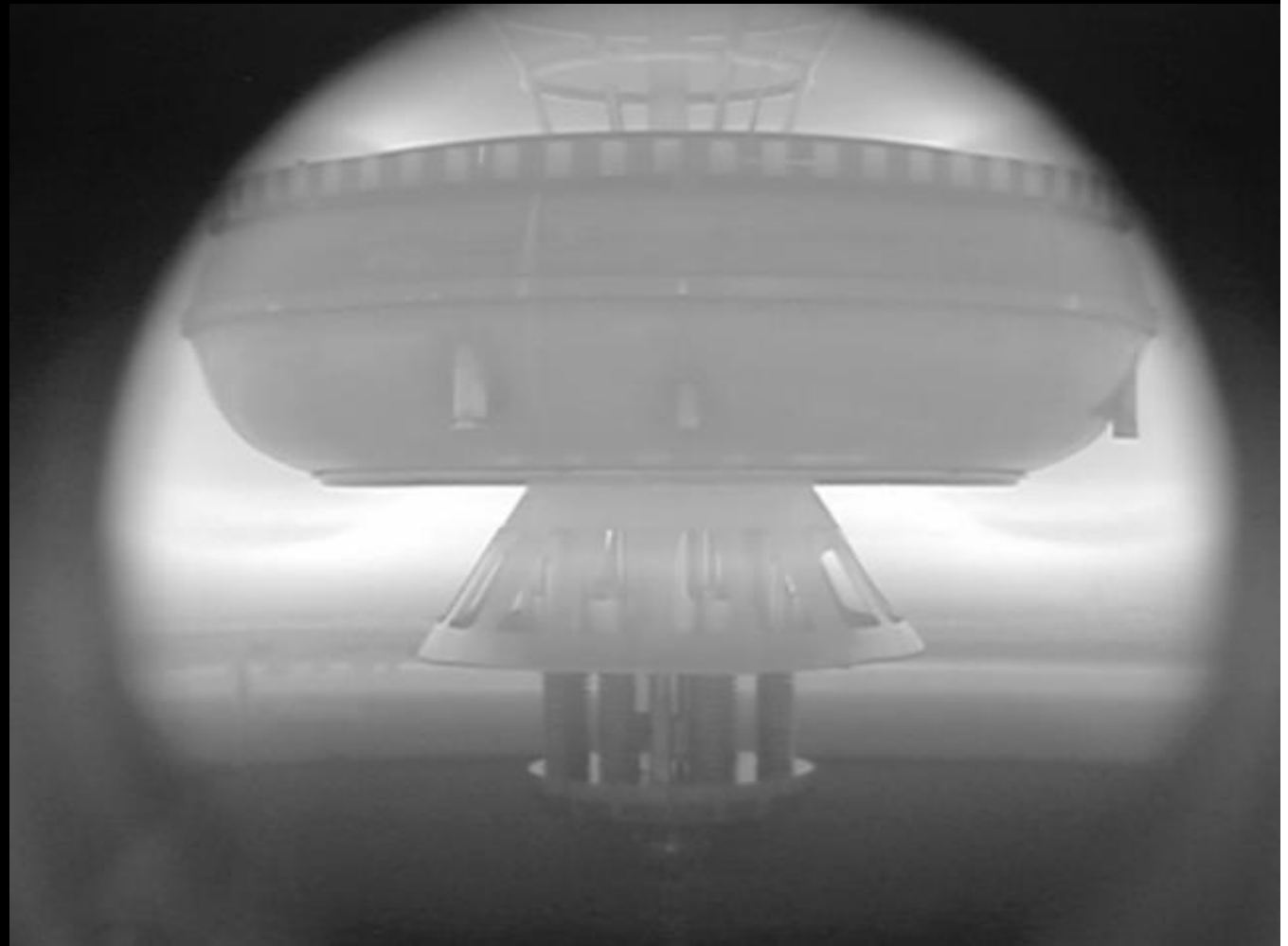


Рис. 5.10. Плазма в LDX

## Открытая ловушка

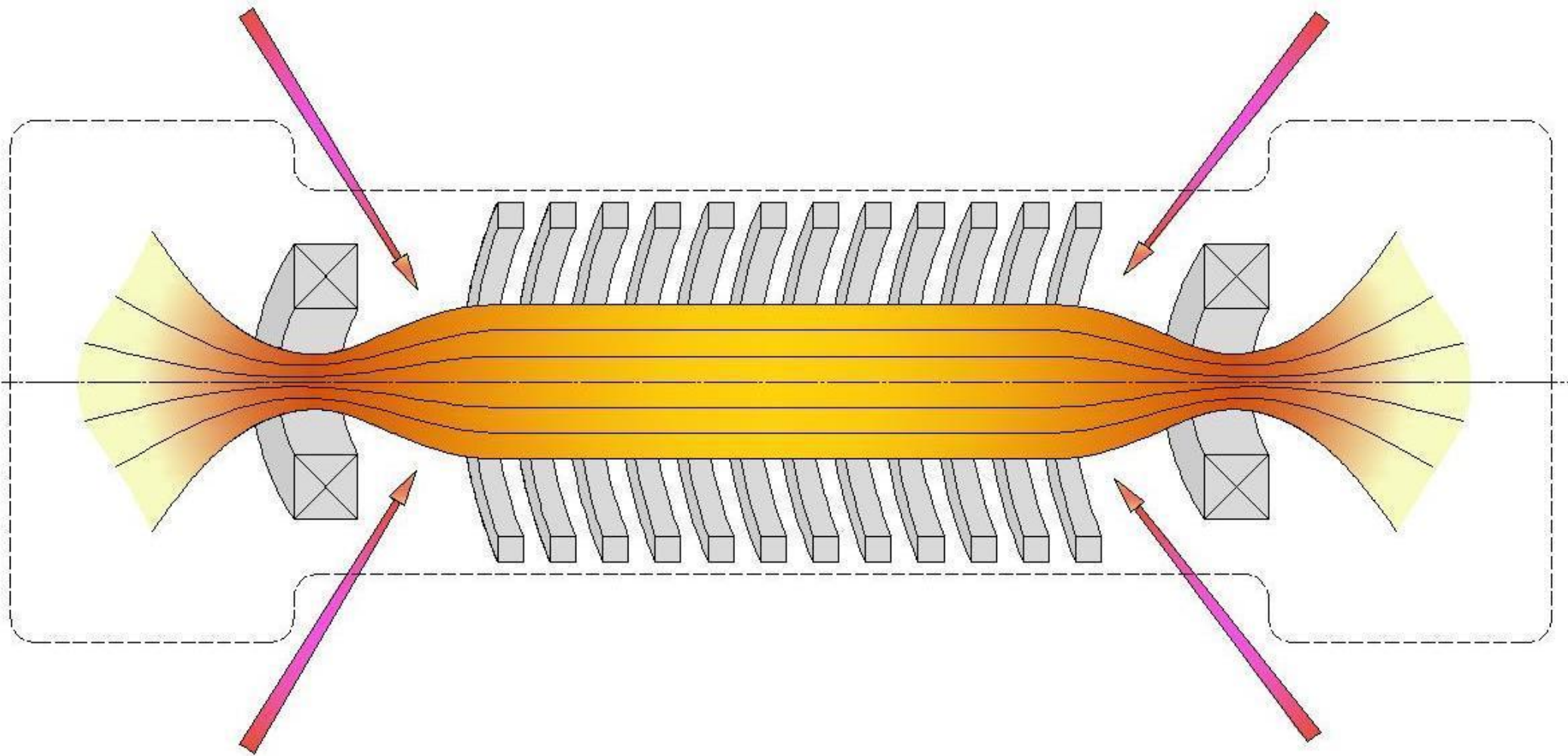


Рис. 5.11. Схема удержания плазмы в открытой ловушке с магнитными пробками

Спасибо за внимание!